

Carmen Pérez Marín

Estudio de la radiactividad de los electrodos toriados por espectrometría gamma y alfa. Dosimetría en los procesos de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas)

Director/es

Nuñez-Lagos Rogla, Rafael
Legarda Ibañez, Fernando

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

**ESTUDIO DE LA RADIATIVIDAD DE LOS
ELECTRODOS TORIADOS POR
ESPECTROMETRÍA GAMMA Y ALFA.
DOSIMETRÍA EN LOS PROCESOS DE
SOLDADURA TIG (TUNGSTEN INERT GAS)**

Autor

Carmen Pérez Marín

Director/es

Nuñez-Lagos Rogla, Rafael
Legarda Ibañez, Fernando

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

2008

*DEPARTAMENTO DE FISICA TEORICA
AREA DE FISICA ATOMICA, MOLECULAR Y NUCLEAR
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA*



**ESTUDIO DE LA RADIATIVIDAD DE LOS ELECTRODOS
TORIADOS POR ESPECTROMETRIA GAMMA Y ALFA.
DOSIMETRIA EN LOS PROCESOS DE SOLDADURA
TIG (TUNGSTEN INERT GAS)**



*MEMORIA PRESENTADA POR CARMEN PEREZ MARIN
PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
Septiembre 2008*

Portada: Soldadura TIG automática

**ESTUDIO DE LA RADIATIVIDAD DE LOS ELECTRODOS
TORIADOS POR ESPECTROMETRIA GAMMA Y ALFA.
DOSIMETRIA EN LOS PROCESOS DE SOLDADURA
TIG (TUNGSTEN INERT GAS)**

***MEMORIA PRESENTADA POR
CARMEN PEREZ MARIN
PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR***

***DEPARTAMENTO DE FISICA TEORICA
AREA DE FISICA ATOMICA, MOLECULAR Y NUCLEAR
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA***

SEPTIEMBRE 2008

A mi familia

Una vez finalizada esta memoria me gustaría expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas, que de una u otra forma, han colaborado para que finalmente se hiciera realidad.

A mis directores de tesis Dr. D. Rafael Núñez-Lagos y Dr. D. Fernando Legarda Ibáñez por su dirección y asesoramiento en el desarrollo de esta tesis. En este sentido quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Núñez-Lagos por su continua y paciente labor en la transmisión eficaz y amena de sus conocimientos.

Al Consejo de Seguridad Nuclear, que ha financiado este trabajo dentro del sexto Programa de Investigación y Desarrollo durante el periodo 2004-2007 sobre el “Estudio de la exposición debida a la utilización de torio en industrias no radiológicas”.

A la empresa Oerlikon de Air Liquide Welding y especialmente a D. Emilio Domingo (q.e.p.d.) que nos permitió el acceso a la misma para la realización de este proyecto, ofreciéndonos su apoyo y el de sus colaboradores, como Dña. Elena Martínez del Departamento de Calidad que nos facilitó la recogida de las materias primas de los electrodos revestidos. Y también a Dña. Montserrat Pablo Eguren, Directora del Centro de Desarrollo y Formación de Soldadura en cuyas instalaciones se llevaron a cabo los ensayos de soldadura.

A los profesores del Departamento de Física Nuclear; María Luisa Sarsa, Eduardo García y Jorge Puimedón que apoyaron este proyecto desde el principio. A todos los compañeros del Departamento, especialmente a Javier por su ayuda y consejos informáticos, a Silvia y Alfonso por los buenos ratos pasados durante todos estos años.

Al Dr. D. Angel Larrea, director de Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Zaragoza donde me dieron todo tipo de facilidades para realizar las imágenes de los electrodos y su posterior análisis. En particular al Dr. D. Victor Orera por su ayuda en la interpretación de las fotografías.

Al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y en particular a la Dr. Dña. Lourdes Romero por la posibilidad que me brindaron para la realización del patrón de calibración de suelos utilizado en este trabajo en el análisis de las materias primas.

Al profesor Dr. D. Alberto Carrión por su colaboración desinteresada y sus consejos “perfeccionistas” en las distintas presentaciones y ponencias que se han llevado a cabo durante el desarrollo de este trabajo. También a Alberto Virto por su buena disposición y por quedarse sólo ante el peligro en los largos y difíciles meses de agosto. A María Savirón, la verdadera “culpable” de haberme embarcado en este interesante proyecto.

No me gustaría olvidar a ninguno de los compañeros de las distintas Universidades y Centros que conforman la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental del Consejo de Seguridad Nuclear por su amistad y colaboración en mi formación como radioquímica.

A mis amigas Ana y Teresa por acompañarme estos años y saber que siempre puedo contar con ellas.

Para finalizar y sobretodo, quiero agradecer a mi familia que siempre está ahí cuando la necesito; a Agustín, a Leo, a mis padres y a mi hermana por sus consejos y ánimos durante todo este tiempo, siempre dispuestos para hacerse cargo del personal menudo y a los que va dedicada esta tesis.

INDICE**CAPITULO I**

INTRODUCCION	1
---------------------	---

CAPITULO II**EL TORIO Y OTROS RADIOISOTOPOS EN LOS ELECTRODOS DE SOLDADURA TIG**

II.1.- EL TORIO	5
II.1.1. Introducción	5
II.1.2. Radiactividad	7
II.1.3. Aplicaciones	9
II.2.- EL URANIO	10
II.3.- PROCESOS DE SOLDADURA TIG	12
II.3.1. Introducción	12
II.3.2. Equipo de soldadura TIG	13
II.4.- ELECTRODOS DE SOLDADURA TIG NO CONSUMIBLES	16

CAPITULO III**SISTEMAS EXPERIMENTALES**

III.1 SISTEMA DE ESPECTROMETRIA GAMMA	21
III.1.1. Introducción	21
III.1.2. Detectores de radiación gamma	22
III.1.3. Cadena electrónica	23
III.1.4. Blindaje pasivo	25
III.1.5. Blindaje activo	26
III.1.6. Eficiencia, Resolución y Calibración en energía	29
III.1.7. Patrones de calibración en capilares.	33

III.2.-PARAMETROS DEL ANALISIS POR ESPECTROMETRIA GAMMA	37
III.2.1.Actividad	37
III.2.2.Incertidumbre	38
III.2.3.Umbral de Decisión	40
III.2.4 Actividad Mínima Detectable AMD	42
III.3.-SISTEMA DE ESPECTROMETRIA ALFA	45
III.3.1.Introducción	45
III.3.2.Detectores de semiconductor	47
III.3.3.La cadena electrónica	49
III.3.4.Eficiencia, Resolución y Calibración en energía	50
III.4.- PARAMETROS DEL ANALISIS POR ESPECTROMETRIA ALFA	56
III.4.1.Actividad	56
III.4.2. Rendimiento químico	58
III.4.3.Incertidumbre	58
III.4.4.Umbral de Decisión	60
III.4.5.Actividad Mínima Detectable AMD	61
III.4.6.Parámetros variables del sistema	62

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTOS DE SEPARACIÓN RADIOQUÍMICA

IV.1.-PROCEDIMIENTO DE SEPARACION RADIOQUIMICA DE TORIO EN MUESTRAS SÓLIDAS DE ELECTRODOS.METODO DE COPRECIPITACION CONHIDROXIDO DE HIERRO.	63
IV.2.- PROCEDIMIENTO DE SEPARACION RADIOQUIMICA SECUENCIAL DE TORIO Y URANIO.	66
IV.3.- PROCEDIMIENTO DE SEPARACION RADIOQUIMICA DE TORIO EN MUESTRAS DE AEROSOLESEN FILTROS.	68

CAPITULO V

PREPARACIÓN DE FUENTES RADIATIVAS PARA ESPECTROMETRÍA ALFA. ELECTRODEPOSICION.	71
---	----

CAPITULO VI**ESTUDIO DE LOS ELECTRODOS TORIADOS**

VI.1.- ESTADO DE LA CADENA DE DESINTEGRACION DEL Th ²³²	75
VI.1.1.Introducción	75
VI.1.2.Planteamiento teórico I	77
VI.1.3.Resultados experimentales I	80
VI.1.4.Planteamiento teórico II	84
VI.1.5.Resultados experimentales II	88
VI.2.- ANALISIS DE LOS ELECTRODOS TORIADOS POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO. SEM.	90
VI.2.1.Introducción a la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	90
VI.2.2.Análisis por Microscopia Electrónica de los electrodos de marca 1.	99
VI.2.2.1. Análisis de la superficie de los electrodos	99
VI.2.2.2. Análisis de las secciones transversal y longitudinal.	104
VI.2.3 Análisis por Microscopia Electrónica de los electrodos de marca 2.	111
VI.2.3.1. Análisis de la superficie de los electrodos	111
VI.2.3.2. Análisis de las secciones transversal y longitudinal.	116
VI.2.4. Resultados del análisis por Microscopía Electrónica de Barrido	121

CAPITULO VII**RADIATIVIDAD DE LOS ELECTRODOS TORIADOS**

VII.1.- RADIATIVIDAD DE LOS ISOTOPOS DE TORIO: Th ²³² , Th ²³⁰ , Th ²²⁸ .	123
VII.2.- RADIATIVIDAD DE URANIO EN LOS ELECTRODOS TORIADOS.	128
VII.3.- RADIATIVIDAD EN LOS ELECTRODOS TIG CERIADOS Y LANTANADOS.	130

CAPITULO VIII**RADIOACTIVIDAD Y DOSIMETRÍA EN LOS PROCESOS DE SOLDADURA
CON LOS ELECTRODOS TORIADOS**

VIII.1.- RADIOACTIVIDAD DURANTE LOS ENSAYOS DE SOLDADURA	133
VIII.1.1.- Ensayo de soldadura TIG con equipo automático.	135
VIII.1.2.- Ensayo de soldadura TIG manual con operador.	137
VIII.1.3.- Ensayo de afilado de los electrodos	139
VIII.1.4.- Análisis por espectrometría gamma.	143
VIII.1.5.- Análisis por espectrometría alfa. Determinación de torio.	146
VIII.1.5.1.Resultados de los ensayos de soldadura automática.	146
VIII.1.5.2.Resultados de los ensayos de soldadura manual.	149
VIII.1.5.3.Resultados del ensayo de afilado de los electrodos.	154
VIII.2.- DOSIMETRIA EN LOS ENSAYOS DE SOLDADURA	157
VIII.2.1. Introducción	157
VIII.2.2. Magnitudes Dosimétricas	159
VIII.2.2.1. Introducción	159
VIII.2.2.2. Magnitudes utilizadas en Protección Radiológica	160
VIII.2.2.3 Límites Básicos de dosis	169
VIII.2.2.4 Estimación de dosis para el torio	170

CAPITULO IX**ELECTRODOS PARA SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO**

IX.1.INTRODUCCION	181
IX.2.SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO CON ELECTRODOS REVESTIDOS	183
IX.3. ELECTRODOS REVESTIDOS	188
IX.3.1. Tipos de electrodos revestidos	188
IX.3.2. Materias primas del revestimiento de los electrodos	192

IX.4. ANALISIS POR ESPECTROMETRIA GAMMA DE LAS MATERIAS PRIMAS DE LOS ELECTRODOS REVESTIDOS

IX.4.1. Introducción	196
IX.4.2. Procedimiento de preparación de patrón de calibración para espectrometría gamma.	198
IX.4.3. Resultados obtenidos por espectrometría gamma.	200
IX.4.4. Conclusiones del análisis gamma de las materias primas.	265

CAPITULO X

CONCLUSIONES	269
---------------------	-----

CAPITULO XI

BIBLIOGRAFIA	275
---------------------	-----

CAPITULO I

INTRODUCCION

Este trabajo se enmarca dentro del estudio sobre la utilización, por parte de la industria no nuclear de materiales que contienen isótopos naturales radiactivos, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). El proyecto está integrado en el sexto programa del Plan I+D, 2004-2007, del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) sobre la valoración cuantitativa del impacto radiológico de un radionucleido y sus descendientes, en aplicaciones industriales no radiológicas de las citadas en el Título VII del Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes. En concreto, hemos analizado el riesgo asociado a la utilización del torio en industrias no nucleares [1] y nos hemos centrado en el estudio de dicho elemento en los electrodos de soldadura y en procesos TIG (Tungsten Inert Gas), que es en estos momentos la aplicación más extendida en cuanto a usos del torio en nuestro país.[2]

Uno de los objetivos centrales de este trabajo es el estudio del torio en los electrodos de soldadura. La determinación de la radiactividad en los electrodos toriados se realizó mediante espectrometría gamma y alfa. Previamente a la determinación de las concentraciones de los radionucleidos, fue necesaria la calibración y puesta a punto de los dos sistemas de medida; el detector de germanio y el espectrómetro alfa. También se han adaptado diversos procedimientos radioquímicos según los diversos tipos de muestras analizadas.

Un segundo objetivo ha sido el estudio del campo de radiación y la contaminación que se puede producir en el usuario de la soldadura TIG. Asimismo se ha realizado la estimación dosimétrica durante los procesos de soldadura y afilado con estos electrodos toriados.

El último objetivo fue el estudio de la radiactividad mediante espectrometría gamma de las materias primas utilizadas para la elaboración del recubrimiento de los electrodos revestidos para soldadura.

La realización de este proyecto se inició con la identificación de los distintos tipos, usos y fabricación de los electrodos toriados en España. El mercado nacional de estos electrodos está comprendido entre 300.000 y 400.000 unidades por año. En relación con la fabricación, no existe en España ningún fabricante y se abastece de electrodos importados, de Austria, Alemania, Estados Unidos, Suecia y principalmente China, donde se fabrica el 80-90% de los electrodos toriados. Nuestro estudio se ha centrado en los dos distribuidores de electrodos toriados cuyas marcas cubren la mayor cuota de mercado en España.

Esta tesis comienza con una revisión de datos teóricos sobre el torio y el uranio, su radiactividad y sus aplicaciones, así como una explicación más detallada del proceso de soldadura específico para los electrodos aleados con óxido de torio, objeto de estudio de este trabajo.

La parte central de esta tesis consiste en el estudio de la radiactividad existente en los electrodos toriados con un contenido del 2% en óxido de torio. El análisis de su composición se ha llevado a cabo mediante espectrometría gamma y espectrometría alfa. Se han puesto a punto ambos sistemas de análisis, la optimización de dichos equipos viene detallada en el Capítulo tercero, así como las definiciones de los parámetros necesarios para realizar el análisis propiamente dicho.

En el estudio por espectrometría alfa se requiere un gran desarrollo experimental y la realización de nuevas técnicas de laboratorio en la preparación inicial de las muestras. El torio debe aislarse mediante procedimientos que eliminen las posibles interferencias de los elementos que lo acompañan. El uranio suele acompañar al torio en el mineral de partida, por lo que es necesario estudiar también el contenido en uranio en algunas de las muestras, para ello se aplica un procedimiento secuencial de separación de uranio y torio mejorado para este tipo de muestras.

En el Capítulo cuarto se detallan los procedimientos de separación radioquímica que se ponen a punto para su aplicación a este tipo de muestras sólidas que por su composición

requieren un tratamiento específico. En este capítulo se incluye también el procedimiento para aislar el torio a partir de un soporte de papel de filtro.

Las muestras una vez aisladas radioquímicamente deben quedar fijadas sobre un soporte especial para su medida en el equipo de espectrometría alfa. La preparación de estas fuentes se realiza por electrodeposición y según el método descrito en el Capítulo quinto.

En la actualidad estos electrodos de soldadura están siendo sustituidos por otros que reemplazan el óxido de torio por los de cerio o lantano. Se han analizado también electrodos de este tipo por espectrometría alfa para verificar su contenido.

Los resultados obtenidos mediante el análisis por espectrometría gamma y alfa proporcionan la información necesaria para abordar el estudio del estado de la cadena de desintegración del torio (Capítulo sexto) y analizar los posibles procesos metalúrgicos que se llevaron a cabo en la producción de los electrodos toriados. Se completan estos resultados con un apartado dedicado al estudio de la homogeneidad de los electrodos toriados mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), que se realizó en el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Zaragoza. Este estudio ha sido muy útil para averiguar, en la medida de lo posible, la distribución del torio a lo largo de la varilla y el proceso de fabricación de dichos electrodos.

El Capítulo siete recoge los resultados obtenidos del análisis por espectrometría alfa de los electrodos toriados de los dos distribuidores españoles con mayor proyección en nuestro país. Se determinan las concentraciones de actividad del torio en los electrodos toriados y en los electrodos ceriados y lantanados, que sustituyen en la actualidad a estos primeros. También se estudia la posible presencia de uranio.

En el Capítulo ocho se procede al estudio del campo de radiación y contaminación que se produce en el entorno del lugar de utilización de los electrodos toriados. Para ello se realiza la toma de muestras de los aerosoles y partículas de polvo producidos en

diversos procesos de soldadura manual, robot automático y en los procesos de afilado de dichos electrodos. Este estudio se desarrolló en un Taller-Escuela, que es centro de formación especializado en procesos de soldadura.

Los aerosoles y las partículas se recogieron mediante la actuación de un muestreador de bajo flujo, que permitió valorar la dosis recibida por los usuarios a nivel interno y por lo que respecta a nivel externo mediante la recogida del material depositado sobre la piel durante las diversas etapas del proceso de soldadura y afilado. Las muestras obtenidas en los diversos ensayos se someten a análisis por espectrometría gamma y alfa para determinar el contenido en torio y poder estimar la dosimetría en la utilización de este tipo de electrodos.

Existe una gran variedad de electrodos utilizados en diversos procesos de soldadura. Se trata de un amplio campo de estudio y el Capítulo noveno sirve de muestra. Se analizaron por espectrometría gamma las materias primas que forman parte del recubrimiento de los electrodos de aportación más ampliamente utilizados en otros tipos de soldadura. En concreto se utilizan para la soldadura con arco eléctrico, de la que se hace una pequeña introducción. Existe una gran variedad de electrodos revestidos, se hace en este Capítulo una revisión de los más importantes.

El análisis por espectrometría gamma ha requerido de la preparación de un patrón específico que se realizó en el Centro de Investigaciones Energéticas Mediambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y se utilizó para la calibración de nuestro sistema.

Para finalizar en el Capítulo décimo se presentan las conclusiones más importantes del presente trabajo.

CAPITULO II

EL TORIO Y OTROS RADIOISOTOPOS EN LOS ELECTRODOS DE SOLDADURA

II.1.- EL TORIO

II.1.1. Introducción

El torio es un material radiactivo de origen natural, que está presente en pequeñas cantidades en todas las rocas, el suelo, el agua de superficie y subterránea, las plantas y los animales. Estas cantidades pequeñas de torio son en parte responsables de la radiación natural de esas sustancias. El suelo por lo general contiene un promedio de seis partes de torio por millón de partes de suelo, lo que supone unos 9,6 mg/Kg en la superficie y $1 \cdot 10^{-6}$ mg/L en el océano. Las rocas en algunas minas subterráneas también pueden contener torio en forma más concentrada.

El torio fue descubierto por Berzelius en 1828; su nombre hace referencia al dios de la guerra Thor de la mitología escandinava. El torio puro es un metal plateado [3], estable al aire, en el que mantiene su brillo durante meses, pero si tiene impurezas de óxido se empaña adquiriendo primero un color gris y finalmente negro. Se conocen dos formas alotrópicas, una cristalina y otra amorfa. El torio puro es blando, muy dúctil y se puede enrollar en frío, estampar y estirar. Sus propiedades físicas están directamente afectadas por la contaminación de óxido que contenga. Pertenece al grupo de los actínidos en la tabla periódica. Sus características principales [4] son: número atómico $Z = 90$, número másico $A = 232,038$, punto de fusión 1.750°C , punto de ebullición 4.790°C , densidad $11,7 \text{ gr/ml}$ y valencias $+4, +3, +2$.

Todos los elementos no metálicos, excepto los gases nobles, forman compuestos binarios con él [3]. Con pocas excepciones, el torio exhibe una valencia de $+4$ en todas sus sales. El Th^{+4} es un catión ácido que precipita el hidróxido $\text{Th}(\text{OH})_4$ a pH próximo a

3,5. Este hidróxido es insoluble en medio alcalino; evoluciona hasta el óxido anhidro ThO_2 , más insoluble.

Químicamente, tiene algunas semejanzas con el zirconio y el hafnio. El compuesto más soluble del torio es el nitrato. El compuesto más importante comercialmente es el óxido, ThO_2 . Es blanco, higroscópico, muy refractario y absorbente de gases. Origina luminiscencia y tiene importantes efectos catalíticos. Tiene un punto de fusión de 3.300°C que es el más alto de todos los óxidos, sólo superado por unos pocos elementos como el wolframio y algunos compuestos como el carburo de tántalo. El torio también puede combinarse con halógenos para formar gran variedad de sales [5]. El sulfato de torio se puede obtener en forma anhidra o como cierto número de hidratos. Se conocen bien los carbonatos, fosfatos, yodatos, cloratos, cromatos, molibdatos y otras sales inorgánicas. El torio forma también sales con muchos ácidos inorgánicos, de los cuales el oxalato insoluble en agua $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, es importante en la preparación de compuestos puros de torio.

Los minerales de torio son extraordinariamente raros. La mena principal del elemento son las monacitas y arenas monacíticas [6], que contienen *torita*, silicato de torio. Diversos compuestos de torio acompañan a muchos minerales de uranio y de las tierras raras. El nitrato de torio mezclado con una pequeña cantidad de una sal de cerio, se ha empleado mucho en la fabricación de camisas de incandescencia para el alumbrado por gas. El metal, aleado con una pequeña cantidad de wolframio, aumenta considerablemente su ductilidad; los filamentos de esta aleación se utilizan como emisores de electrones y en lámparas eléctricas.

De los distintos isótopos del torio, el más estable y abundante es el Th^{232} , emisor de partículas alfa y gamma; es el primer elemento de una serie radiactiva que incluye entre sus isótopos el gas Rn^{220} , fuerte emisor alfa, por lo que es conveniente mantener una buena ventilación en los locales en los que se almacena o maneja torio.

II.1.2. Radiactividad

El único isótopo existente en la tierra de forma natural es el ${}_{90}\text{Th}^{232}$ que constituye el 100% del torio natural. Es radiactivo [7] con un periodo de $1,405 \cdot 10^{10}$ años. En su familia radiactiva (Tabla II.1) se origina ${}_{90}\text{Th}^{228}$, también radiactivo con un periodo de 1,9116 años por lo que se encuentra presente en el mineral.

La familia comporta 7 desintegraciones alfa y 5 desintegraciones beta hasta terminar en el ${}_{82}\text{Pb}^{208}$, núcleo con 82 protones y 126 neutrones, uno de los más estables de la naturaleza.

Cadena Principal			Cadena Secundaria		
Elemento	Desintegración	Periodo	Elemento	Desintegración	Periodo
Th^{232}	Alfa	$1,405 \cdot 10^{10}$ años			
Ra^{228}	Beta	5,75 años			
Ac^{228}	Beta	6,13 horas			
Th^{228}	Alfa	1,911 años			
Ra^{224}	Alfa	3,66 días			
Rn^{220}	Alfa	55,6 s.			
Po^{216}	Alfa	0,145 s.			
Pb^{212}	Beta	10,64 horas			
Bi^{212}	Alfa (64,06%)	60,55 min.	Bi^{212}	Beta (35,94%)	60,55 min.
Tl^{208}	Beta	3,053 min.	Po^{212}	Alfa	0,3 μs .
Pb^{208}		Estable	Pb^{208}		Estable

Tabla II.1: Familia radiactiva del ${}_{90}\text{Th}^{232}$. (LBNL Isotopes Project. Lunds University.)

El torio se encuentra de forma natural en el mineral torita (ThSiO_4), en la torianita ($\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$) y en la monacita (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y) PO_4 , que es un fosfato complejo de torio, uranio, cerio y lantánidos. Su abundancia en la corteza terrestre es semejante a la del plomo y a la del molibdeno, lo que supone que es unas tres veces mayor que la del uranio.

Hay varios métodos de producción de torio, normalmente a partir del mineral de monacita que contiene del 3 al 9 % de ThO_2 junto con otras tierras raras. El mineral se obtiene principalmente como una arena y se separa de otras arenas por medios físicos o mecánicos. Se digiere con hidróxido sódico, precipitando los hidróxidos de torio, junto con uranio y cerio. La separación de torio se consigue por extracción posterior con tributilfosfato.

Debido a la extrema lentitud de la desintegración, la cantidad de torio natural en la tierra permanece casi constante, pero este elemento puede ser trasladado de un lugar a otro ya sea por la naturaleza o por acción del hombre. Por ejemplo el viento y el agua erosionan las rocas, el torio o sus compuestos se unen al suelo. La lluvia puede arrastrar a los ríos y lagos las partículas de suelo que contienen torio. También es liberado al medio ambiente a través de actividades como la quema de carbón, que contiene pequeñas cantidades de torio, la minería, la trituración del torio o la elaboración de productos que lo contienen.

Dado que el torio se encuentra en casi todas partes, la población [8] siempre estará expuesta a pequeñas cantidades de este metal presentes en el aire, los alimentos y el agua debido a su existencia natural en la tierra. Todo el mundo absorbe algo de este elemento a través de la comida o el agua, y las cantidades en el aire son tan pequeñas, que son normalmente ignoradas.

Un sitio no controlado de desechos peligrosos podría tener más cantidad de torio que la normal, si han sido depositados de forma indebida. Las personas que vivieran cerca de estos lugares podrían estar expuestas a una radiación superior a la normal por el posible polvo arrastrado por el viento. El personal de las industrias dedicadas a la explotación o trituración del torio o a la fabricación de productos que lo contienen, pueden también experimentar exposiciones superiores a la normal.

La Nuclear Regulatory Comisión (NRC 10 Code of Federal Regulations CFR 40.13) [9] deja exentos de regulación determinados productos si las cantidades de torio que contienen son menores de 2 gramos o inferiores al 0,25% del peso en torio. En esta

regulación quedan reflejados productos como las rejillas incandescentes de las lámparas, válvulas de vacío, electrodos de soldadura, lámparas eléctricas, lámparas germicidas y lámparas solares.

II.1.3 Aplicaciones

En la industria no nuclear, el torio tuvo diversas aplicaciones [10] entre las que destacan las aleaciones con magnesio, de uso en la industria aeroespacial para la fabricación de piezas de reactores; fabricación de filamentos de wolframio para lámparas de incandescencia; electrodos de tubos electrónicos (magnetrones); fabricación de material cerámico de alta temperatura; rejillas de incandescencia para faroles; fabricación de lentes especiales para cámaras y binoculares para incrementar el índice de refracción; utilización como catalizador para ciertas reacciones de química orgánica y en otros procesos químicos industriales, etc.

Junto a estas aplicaciones el torio se emplea en la fabricación de electrodos, objeto de estudio de esta tesis, para soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) de alta precisión, que son los utilizados para acero inoxidable, aluminio, aleaciones de níquel y otras aleaciones. En consecuencia, probablemente sea el torio el elemento radiactivo más abundante en estos dispositivos y, sorprendentemente, su influencia radiológica se encuentra muy poco estudiada. En España no existe ningún estudio sobre la radiactividad en los electrodos de soldadura y en el contexto internacional son pocos los estudios que existen al respecto.

Aunque el torio sea el único isótopo radiactivo que de forma explícita se declara en la fabricación de ciertos tipos de electrodos, probablemente la falta de estudios puede deberse a su relativamente escasa utilización industrial, frente a otros materiales radiactivos, y por ello su incidencia en la industria no nuclear es prácticamente desconocida.

II.2. EL URANIO

El uranio existente en la naturaleza, y que suele acompañar al torio en el mineral de partida, es una mezcla de tres isótopos [11], todos ellos radiactivos, emisores alfa. El U^{234} con una abundancia del 0,0054% y un periodo de semidesintegración de $2,45 \cdot 10^5$ años, el U^{235} con una abundancia del 0,711% y un periodo de $7,04 \cdot 10^8$ años y el U^{238} con una abundancia del 99,283% y un periodo de $4,46 \cdot 10^9$ años. En promedio hay cinco partes por millón de uranio en la corteza terrestre. El U^{234} es descendiente de la cadena radiactiva del U^{238} . Tanto el U^{238} como el U^{235} originan cadenas radiactivas que se especifican en las siguientes Tablas (II.2 y II.3).

Cadena Principal			Cadena Secundaria		
Elemento	Desintegración	Periodo	Elemento	Desintegración	Periodo
U^{238}	Alfa	$4,47 \cdot 10^9$ años			
Th^{234}	Beta	24,1 días			
Pa^{234}	Beta	6,70 horas			
U^{234}	Alfa	245.500 años			
Th^{230}	Alfa	75.380 años			
Ra^{226}	Alfa	1.600 años			
Rn^{222}	Alfa	3,82 días			
Po^{218}	Alfa (99,98%)	3,10 min.	Po^{218}	Beta (0,02%)	3,10 min.
Pb^{214}	Beta	26,8 min.	At^{218}	Alfa	1,5 s.
Bi^{214}	Beta (99,97%)	19,9 min.	Bi^{214}	Alfa (0,021%)	19,9 min.
Po^{214}	Alfa	164,3 ms.	Tl^{210}	Beta	1,30 min.
Pb^{210}	Beta (100%)	22,3 años	Pb^{210}	Alfa ($1,9 \cdot 10^{-6}$)	22,3 años
Bi^{210}	Beta	5,01 días *	Hg^{206}	Beta	8,15 min.
Po^{210}	Alfa	138,4 días	Tl^{206}	Beta	4,2 min.
Pb^{206}		Estable	Pb^{206}		Estable

Tabla II.2: Familia radiactiva del U^{238} . (LBNL Isotopes Project. Lunds University) [7].

(* Hay una transición del Bi^{210} mediante una desintegración alfa a Tl^{206} pero con una probabilidad del 0,000132%)

Como puede observarse en la Tabla II.2, el Th^{230} pertenece a la cadena de desintegración del U^{238} , de manera que la aparición de este isótopo en el análisis que se lleva a cabo por espectrometría alfa es debida a la presencia de uranio acompañando al torio en el mineral de partida.

Cadena Principal			Cadena Secundaria		
<i>Elemento</i>	<i>Desintegración</i>	<i>Periodo</i>	<i>Elemento</i>	<i>Desintegración</i>	<i>Periodo</i>
U^{235}	Alfa	$7,04 \cdot 10^8$ años			
Th^{231}	Beta	25,52 horas			
Pa^{231}	Alfa	32.760 años			
Ac^{227}	Beta	21,77 años	Ac^{227}	Alfa	21,77 años
Th^{227}	Alfa	18,72 días	Fr^{223}	Alfa	21,8 s.
Ra^{223}	Alfa	11,43 días	At^{219}	Alfa	56 s.
Rn^{219}	Alfa	3,96 s.	Bi^{215}	Beta	7,6 min.
Po^{215}	Alfa	1,78 ms.	Po^{215}	Beta	1,78 ms.
Pb^{211}	Beta	36,1 min.	At^{215}	Alfa	0,10 ms.
Bi^{211}	Alfa	2,14 min.	Bi^{211}	Beta	2,14 min.
Tl^{207}	Beta	4,77 min.	Po^{211}	Alfa	0,516 s.
Pb^{207}		Estable	Pb^{207}		Estable

Tabla II.3: Familia radiactiva del U^{235} . (LBNL Isotopes Project. Lunds University) [7].

II.3.- PROCESOS DE SOLDADURA TIG

II.3.1. Introducción

De acuerdo con lo establecido en el informe de Protección Radiológica de la Comisión Europea [10], uno de los principales usos del torio, actualmente, es la fabricación de electrodos toriados para soldadura.

Los electrodos que se analizan en este trabajo son los utilizados en el proceso denominado TIG (Tungsten Inert Gas), procedimiento de soldadura por arco [12], en atmósfera de un gas protector con un electrodo no consumible. Utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre el electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aportación, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas.

El proceso TIG también recibe las denominaciones de:

- GTAW, Gas Tungsten Arc Welding (ANSI/AWS A3.0)
- Soldeo por arco con electrodo de wolframio y gas inerte (UNE-EN ISO 4063).
- Soldeo por arco con electrodo de wolframio (UNE 14100).
- Gas-Shielded Tungsten-Arc Welding (Reino Unido).

Este proceso resulta adecuado para unir la mayoría de los metales, aunque esencialmente manual, se ha automatizado para algunas fabricaciones en serie, como tubería de pequeño espesor soldada longitudinalmente o helicoidalmente y para la fijación de tubos a placas en intercambiadores de calor. Se consigue un arco estable y concentrado, no se producen proyecciones ya que no existe transporte de metal en el arco. Tampoco hay producción de escoria.

Se obtienen soldaduras lisas, regulares y de gran calidad. Es posible utilizar metal de aportación en función de la aplicación y puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones con una alta velocidad de soldeo por debajo de 3-4 mm. de grosor. Por otra

parte no requiere el empleo de fuentes de energía excesivamente caras y permite un control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación. Como desventaja su tasa de deposición es menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco. Su aplicación manual requiere de gran habilidad por parte del soldador. No resulta económico para espesores mayores de 10 mm. y en presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.

El proceso TIG se puede utilizar para todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones. Como las soldaduras obtenidas son de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es idónea para soldaduras en las industrias del petróleo, alimentación, generación de energía nuclear y aeroespacial.

II.3.2. Equipo de soldadura TIG

El equipo básico consiste en una fuente de energía, portaelectrodo, electrodo, cables de soldeo, botella de gas inerte y mangueras para la conducción del gas.

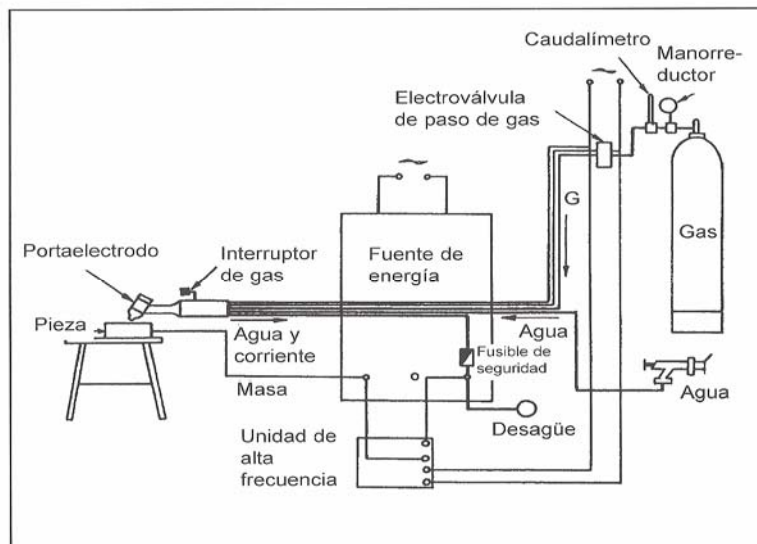


Figura II.1: Esquema de una instalación para soldadura TIG.

El proceso TIG puede utilizarse tanto con corriente continua [12] como con corriente alterna; la elección del tipo de corriente y polaridad se hace en función del material a soldar. La corriente alterna se emplea para favorecer el decapado de la capa de óxido en aleaciones de aluminio y magnesio, también se utiliza para el soldeo de materiales de bajo espesor. La corriente continua se utiliza en el soldeo de aceros al carbono, baja aleación, inoxidable, cobre, titanio, etc; es el tipo de corriente utilizada con electrodos aleados con torio ya que con corriente alterna es difícil mantener la punta del electrodo con la forma adecuada.

<i>Tipo de electrodo</i>	<i>Tipo de corriente</i>	<i>Aplicación común</i>
<i>Volframio puro</i>	<i>Corriente alterna</i>	<i>Aluminio y magnesio</i>
<i>Volframio con torio, cerio o lantano</i>	<i>Corriente continua</i>	<i>Aceros al carbono, baja aleación, inoxidable, cobre, titanio.</i>
<i>Volframio con zirconio</i>	<i>Corriente alterna</i> <i>Corriente continua</i>	<i>Aluminio y magnesio</i> <i>Cobre, titanio</i>

Tabla II.4: Tipos de electrodo, tipo de corriente utilizada y material al que normalmente se aplica cada tipo.

La fuente de energía para el soldeo TIG debe ser capaz de suministrar una intensidad tan alta como sea requerida por los espesores y el material a soldar. Se da a continuación una indicación de las intensidades requeridas por milímetro de espesor de chapa para diferentes materiales:

Acero de baja aleación	30-40 A/mm.
Aluminio	45-50 A/mm.
Cobre	75-80 A/mm.
Acero inoxidable	30-40 A/mm.

Las fuentes de energía para corriente continua constan de un transformador, que convierte la corriente de la red en corriente adecuada para el soldeo, disminuyendo la tensión de red e incrementando la intensidad. Un rectificador para convertir la corriente alterna en corriente continua. Un ventilador para enfriar el transformador y el rectificador y evitar el sobrecalentamiento. Un controlador de la presión del agua de refrigeración. Una válvula magnética para la apertura y cierre del gas de protección mediante medios electromagnéticos y para finalizar, un panel de control para el encendido y apagado de la corriente de soldeo, y para control del gas de protección y otras funciones.

El portaelectrodo tiene la misión de conducir la corriente eléctrica y el gas de protección hasta la zona de soldeo. Pueden ser de refrigeración natural (por aire) o de refrigeración forzada (mediante circulación de agua). Los primeros se emplean para espesores finos, que no requieran grandes intensidades y los de refrigeración forzada se recomiendan para trabajos que exijan intensidades superiores a los 150 amperios. En estos casos la circulación del agua por el interior del portaelectrodo evita el sobrecalentamiento del mismo. A partir de 300 amperios en régimen discontinuo es necesario que también la tobera esté refrigerada por agua.

El electrodo de wolframio que transporta la corriente hasta la zona de soldeo se sujeta rígidamente mediante una pinza alojada en el cuerpo del portaelectrodos. Cada portaelectrodos dispone de un juego de pinzas, de distintos tamaños, que permite la sujeción de electrodos de diferentes diámetros.

El gas de protección llega hasta la zona de soldeo a través de una tobera de material cerámico, sujeta en la cabeza del portaelectrodos; la tobera tiene la misión de dirigir y distribuir el gas protector sobre la zona de trabajo. Hay que tener en cuenta que el electrodo de wolframio debe estar perfectamente centrado dentro de la tobera para que el chorro de gas inerte proteja bien el baño de fusión.

II.4.- ELECTRODOS DE SOLDADURA TIG NO CONSUMIBLES

La misión de este electrodo no consumible en este proceso es únicamente la de mantener el arco sin aportar material al baño de fusión. Por este motivo y para evitar su desgaste es importante que posea una alta temperatura de fusión. Se emplean diferentes tipos de electrodos según su composición esencialmente de wolframio, bien puro o bien aleado con pequeñas cantidades de torio, zirconio, lantano o cerio.

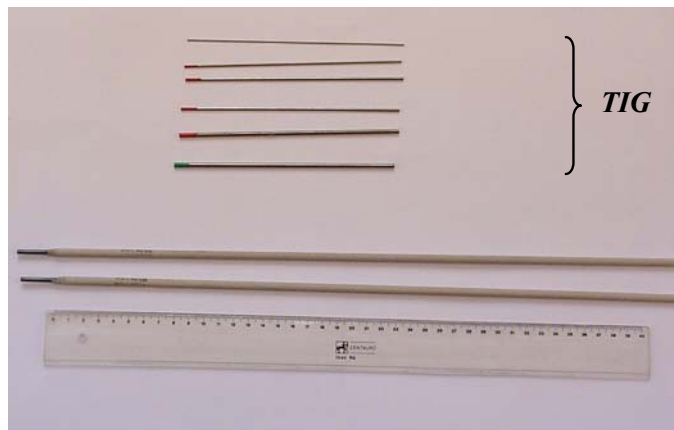


Figura II.2: Varillas TIG de 15 cm. de longitud y electrodos usuales de aportación con recubrimiento.

El componente principal de las varillas es el wolframio, también denominado tungsteno en la literatura química francesa y anglosajona; elemento químico de número atómico 74 y peso atómico 183,85, con una densidad de 19,3 gr/ml. Este metal presenta un aspecto brillante de color gris plateado; su punto de fusión de 3.410 °C [4] es el más alto de todos los metales y su punto de ebullición es de 5.660 °C [4]. El wolframio es extremadamente duro y desde el punto de vista químico relativamente inerte ya que no le atacan los ácidos comunes, álcalis o agua regia. Reacciona con mezcla de ácidos nítrico y fluorhídrico y los compuestos con estados de oxidación 2+ y 6+ son muy estables. Es por ello uno de los mejores componentes para fabricación de materiales y herramientas de alta dureza y que deben mantener sus propiedades a altas temperaturas.

Al principio los electrodos para soldadura TIG fueron de wolframio puro, pero posteriormente se comprobó que al añadir óxido de torio, zirconio, cerio o lantano aumenta la emisividad, incrementándose el flujo de electrones, favoreciendo el encendido del arco y por lo tanto su estabilidad. Por otra parte permiten aumentar la intensidad de corriente, evitando el fenómeno de desgaste del electrodo de wolframio puro que además contaminaría el baño de fusión.

Los diámetros disponibles son 1; 1,6; 2; 2,4; 3,2; 4; 4,8; 5 y 6,4 mm. siendo los más empleados los de 1, 1,6; 2,4 y 3,2 mm.; la longitud estándar de estos electrodos es de 150 mm., aunque hay algunos de 170 mm.

Simbolización

La siguiente Tabla II.5 ha sido obtenida de la Norma UNE 14208 (EN 26848) y de la Norma AWS-A5.12. La primera letra simboliza el componente principal, wolframio, la segunda representa las adiciones de óxido, la letra elegida es la inicial del elemento que forma el óxido adicionado, el número corresponde al contenido medio multiplicado por diez.

Los electrodos se distinguen de acuerdo con esta tabla por el extremo coloreado en el caso de los electrodos normales y con dos anillos de dos colores en el caso de que sean compuestos. El ancho de cada anillo deberá ser igual o superior a 3mm.

Los óxidos adicionados generalmente están finamente dispersos en la matriz de wolframio, pero existen los electrodos compuestos formados por un alma de wolframio con revestimiento exterior de óxido. Tienen el inconveniente de que no pueden afilarse los extremos.

Símbolo	Composición			Color (1)	Equivalencia AWS(2)
	Oxido adicionado		Contenido mínimo volframio		
	Naturaleza Oxido	%			
WP			99,8	verde	EWP
WT4	ThO ₂	0,35 a 0,55	resto	naranja	EWTh-3
WT10	ThO ₂	0,80 a 1,20	resto	amarillo	EWTh-1
WT20	ThO ₂	1,70 a 2,20	resto	rojo	EWTh-2
WT30	ThO ₂	2,80 a 3,20	resto	violeta	
WT40	ThO ₂	3,80 a 4,20	resto	naranja	
WZ3	ZrO ₂	0,15 a 0,50	resto	marrón	EWZr-1
WZ8	ZrO ₂	0,70 a 0,90	resto	blanco	
WL10	LaO ₂	0,90 a 1,20	resto	negro	EWLa-1
WC20	CeO ₂	1,80 a 2,20	resto	gris	EWCe-2(3)

Tabla II.5: Simbolización según UNE/EN y AWS de los electrodos de volframio

- (1) Los electrodos compuestos se identifican con un segundo anillo de color rosa.
- (2) Se indica la simbolización según AWS de los electrodos más usuales.
- (3) Color naranja.

Electrodos de volframio puro

Tienen un punto de fusión de 3.400°C aproximadamente. Es necesario que su extremo sea redondeado. Se utiliza normalmente con corriente alterna en la soldadura del aluminio y sus aleaciones, ya que con esta corriente se mantiene la punta del electrodo en condiciones óptimas y permite una buena estabilidad del arco.

Electrodos de volframio aleado con torio, lantano y cerio

El punto de fusión de esta aleación es de 4.000°C aproximadamente. Es necesario el afilado del extremo del electrodo. Se utiliza con corriente continua para la soldadura de aceros al carbono, baja aleación, cobre, titanio, etc; no se suelen utilizar con corriente

alterna porque es difícil mantener la punta del electrodo afilada con ese tipo de corriente.

El precio de estos electrodos es de un 10% a un 15% superior a los anteriores, pero el contenido en torio conlleva un incremento del flujo de electrones (una mayor emisividad), mejor cebado, mayor resistencia a la contaminación y proporciona un arco más estable y por tanto una soldadura de mayor calidad.

Los electrodos de wolframio aleados con óxidos de lantano y cerio se pueden utilizar en los mismos casos que los toriados y puesto que no son radiactivos están sustituyendo de forma mayoritaria a los que contienen torio, pero las soldaduras presentan una calidad inferior a las realizadas con los toriados, debido a las elevadas temperaturas de trabajo que permiten los electrodos que contienen óxido de torio y que proporcionan una gran estabilidad al arco durante el proceso de soldadura.

CAPITULO III

SISTEMAS EXPERIMENTALES

III.1.- SISTEMA DE ESPECTROMETRIA GAMMA

III.1.1. Introducción

Los rayos gamma (radiación o fotones gamma) [13] no poseen ni masa ni carga y su emisión por parte de un núcleo no conlleva cambios en su estructura, sino simplemente la pérdida de una determinada cantidad de energía y cambios en el momento angular total. Los rayos gamma se originan en núcleos atómicos que se encuentran en un estado excitado y que para volver a su estado fundamental emiten radiación electromagnética. Dado que los núcleos sólo existen en unos niveles de energía definidos y concretos, los rayos gamma son emitidos con energías discretas y características para cada radionucleido. En general, los fotones gamma se emiten como resultado de un ajuste de energía en el núcleo después de una emisión alfa o beta, aunque pueden emitirse de forma directa sin que tenga lugar la emisión anterior de una partícula si el núcleo se encuentra en un nivel excitado. Un nucleido puede emitir uno o varios rayos gamma de diferentes energías, dependiendo de su modo de desintegración y de los niveles de energía del núcleo excitado.

El objetivo de la espectrometría gamma es obtener el espectro de energías de las radiaciones gamma emitidas por los radionucleidos de la muestra y a partir de dicho espectro identificar cuales son y en que concentración se encuentran en la muestra, teniendo en cuenta la contribución del fondo ambiental. La espectrometría gamma clásica [14] está asociada a los detectores de centelleo, especialmente con cristales de ioduro sódico, pero la aparición en los años sesenta de los detectores de semiconductores de germanio, debido a su elevado poder de resolución, revolucionó esta técnica haciendo posible la espectrometría gamma de alta resolución.

Con el equipo utilizado en esta tesis para las medidas de emisiones gamma se ha realizado también un estudio detallado de la reducción en el fondo del detector [15]; cuando se habla de fondo se hace referencia a aquellos impulsos de origen distinto a los producidos por los fotones procedentes de la muestra objeto de estudio. Se ha cuantificado la influencia que los blindajes ejercen sobre el fondo radiactivo que registran los equipos de espectrometría gamma y se ha optimizado todo el sistema.

III.1.2. Detectores de radiación gamma

Los detectores de radiación gamma deben convertir la energía del fotón en energía cinética de electrones y positrones. Transforman esta energía en pares electrón-hueco, ión electrón o estados excitados moleculares y recogen y miden el número de portadores de carga creados o los fotones emitidos en la desexcitación de los estados moleculares. Se necesita para ello materiales de alta densidad y alto número atómico y con un volumen de detección suficiente para que el fotón deposite en él toda su energía. Los detectores de semiconductor son los que ofrecen mejor resolución y dentro de ellos el detector de germanio es el más adecuado para medir la radiación gamma. El aspecto fundamental en este tipo de detectores es que a través de diferentes mecanismos de interacción de la radiación gamma con la materia, la radiación cede su energía al cristal semiconductor generando un impulso electrónico, y además da información cuantitativa de la energía depositada, es decir se comporta como un espectrómetro y no sólo como un mero detector. La relación entre la radiación absorbida y la que tiene la muestra (actividad) viene determinada por la eficiencia del sistema que se definirá más adelante.

El proceso de detección [14] está basado en que cuando un fotón interacciona con la materia se pueden producir esencialmente tres procesos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. La energía que depositan en el cristal semiconductor de germanio las radiaciones ionizantes, producen pares electrón-hueco. Cuando un electrón salta a la banda de conducción, genera una vacante en la banda de valencia denominada hueco, cuyas propiedades se asemejan a las de un ión positivo. La cantidad de electrones y huecos es proporcional a la energía. Los portadores de corriente creados se recolectan mediante la aplicación de un campo eléctrico, formándose un pulso de

corriente, testigo del paso de la radiación y de la energía de la misma, que es tratado posteriormente con la electrónica adecuada. Para reducir la generación térmica de estos portadores de carga, el cristal de germanio trabaja a la temperatura del nitrógeno líquido. Para ello va montado sobre un criostato compuesto por una cámara de vacío acoplada a un recipiente dewar (doble pared, aislado al vacío), de unos 30 litros de capacidad que contiene nitrógeno líquido a 77 K (-196°C) y que mantiene refrigerado el detector a través de un dedo de cobre que va sumergido en el nitrógeno líquido y por el otro extremo está en contacto con el cristal de germanio.

También hay que indicar que el tipo de detector adecuado a cada necesidad dependerá del rango de energías en el que se esté interesado así como de la resolución y eficiencia que se necesite. El detector de espectrometría gamma utilizado en este trabajo es un detector de germanio de bajo fondo Extended Range de Canberra. Se toma como referencia para la eficiencia la de un cristal de INa dopado con Tl de 3x3 pulgadas de tamaño, se obtiene un valor de 43,7 % de eficiencia relativa y 1,77 keV de resolución para la línea de 1.332 keV del Co⁶⁰. El criostato es del tipo 7500SL-RDC-6-ULB con una capacidad para 30 litros de nitrógeno líquido.

III.1.3. Cadena electrónica

Para interpretar la información de los espectros, habrá que procesar la señal eléctrica que produce el detector [11,14]. Se necesita almacenar las señales, extraer información sobre las energías que las producen o el tiempo relativo entre dos señales; para ello se dispone de distintos sistemas modulares. Los componentes electrónicos [16] asociados al detector utilizado y que completan el sistema de medidas se exponen a continuación.

Para posibilitar la colección de la carga eléctrica liberada por la radiación incidente en el detector, se necesita aplicar una alta diferencia de potencial (varios miles de voltios), que es proporcionada por una fuente de alta tensión que se conecta al detector. En nuestro sistema la fuente de alta tensión es de Canberra, modelo 3106D. Lo habitual es que dicha conexión se haga a través de un preamplificador, en el sistema utilizado este módulo es el 2002 CSL. La tensión de trabajo ha sido de 4.000 voltios. Para la mayoría

de los detectores la carga generada al paso de la radiación incidente es demasiado pequeña para formar una señal eléctrica que pueda ser procesada por el sistema de espectroscopia, por lo que se hace necesario el uso del preamplificador. El impulso generado a su salida es proporcional al de la entrada y tiene una amplitud suficiente para poder ser enviado a un amplificador que en este caso es uno lineal, modelo 2021 de Canberra, que además de incrementar su amplitud, modifica su forma, adaptándola a la de una función generalmente del tipo gaussiana o triangular. La altura del impulso final es proporcional a la energía depositada en el detector y su anchura adecuada al ritmo de conteo para su digitalización. Una vez que el pulso ha pasado por el preamplificador y el amplificador, y se le ha dado una forma convenientemente es necesario almacenarlo según su amplitud. Para ello se digitaliza mediante un convertidor analógico digital de Canberra ADC 8701 que divide la posible gama de energías depositadas por los fotones en el detector en 4096 canales, que son almacenados mediante un módulo accuspec y un ordenador.

Como resumen se puede indicar que el detector está acoplado a una fuente de alta tensión y a una cadena electrónica convencional, que suministra la información a un analizador multicanal. Los impulsos de voltaje del amplificador, que dependerá de la energía de emisión gamma detectada, se transmiten al convertidor analógico digital que les asocia una señal digital proporcional al pulso eléctrico de entrada. Posteriormente el analizador multicanal asigna a cada señal digital un determinado canal. El resultado final es un espectro que representa número de cuentas frente a número de canal, que debe ser examinado adecuadamente con un programa de análisis. La visualización de los espectros de medida se realiza desde un ordenador personal (PC) así como el control de determinados parámetros del sistema. El tratamiento de datos se realiza mediante un software diseñado por nuestro laboratorio que permite el ajuste en una región del espectro de hasta 5 gaussianas sobre un fondo cuadrático.

El detector dispone de un blindaje pasivo y otro activo para minimizar los efectos de la radiactividad ambiental que se describe a continuación y además se encuentra ubicado en el sótano de la Facultad de Ciencias, en una habitación recubierta de placas de plomo de 3 mm. de grosor.

III.1.4. Blindaje pasivo

El blindaje con plomo utilizado en los detectores de germanio por la mayoría de los laboratorios de medida de la radiactividad ambiental, reduce el fondo y mejora por tanto la mínima radiactividad que el sistema puede detectar, pero no está claro en que medida lo reduce y mucho menos cual es el grosor óptimo [17]. En nuestro caso se ha utilizado para el blindaje del detector, ladrillos de plomo de 20x10x5 cm. de 11,35 Kg., suministrados por Mifer y sometidos a limpieza mecánica en seco, que constituyen un blindaje de 15 cm. de grosor. La zona de detección se aísla del plomo mediante una caja de cobre electrolítico de 4 mm. de espesor, 30x30 cm. de base y 30 cm. de altura. Así mismo se lleva a cabo una ventilación inicial con nitrógeno durante 5 minutos antes de cada medida para desplazar el aire contenido en la caja y por tanto el radón y se mantiene posteriormente la sobrepresión de nitrógeno mediante un sistema de tubos que comunica el gas de evaporación del dewar con la caja manteniendo así un flujo continuo de gas en el volumen en que se encuentra el detector. En las siguientes fotografías se puede observar las diversas etapas del blindaje del detector.



Fotografías III.1: Blindaje del detector de germanio con ladrillos de plomo y caja de cobre.

III.1.5. Blindaje activo

Se completa el sistema de espectrometría gamma [15] con un detector plástico de centelleo (veto cósmico) de Bicrón PF-370, 5BC408 de 60x60x5 cm. situado en la parte superior del blindaje de plomo. Este tipo de plástico genera un destello en la región del visible cuando es atravesado por un muón cósmico. El destello es captado por un fotomultiplicador alimentado por una fuente Bertan 362. El impulso eléctrico generado, tras la correspondiente amplificación en un preamplificador modelo 2005 y en un amplificador 2015A de Canberra, sirve para iniciar, en un módulo LeCroy Dual Gate Generador 222, una ventana (impulso eléctrico digital) cuya duración se ha fijado en 1 milisegundo. Mientras esta ventana está abierta, el convertidor analógico-digital de la cadena electrónica del detector de germanio está inhibido y los impulsos que llegan del germanio no son digitalizados.

Con este sistema los fotones que se generan como consecuencia de la interacción de la radiación cósmica (esencialmente muones) con el detector y el blindaje, y que incrementarían el fondo detectado, quedan en gran parte suprimidos [17]. El tiempo de apertura de la ventana se ha fijado en un compromiso entre la frecuencia de los sucesos cósmicos y el tiempo muerto aceptable del sistema. Este blindaje activo se coloca en la parte superior del sistema como puede observarse en la siguiente fotografía.



Fotografía III.2: Detector de germanio con blindaje de plomo y veto cósmico.

Para analizar la influencia que los sucesivos blindajes tienen sobre el espectro de emisiones del fondo, se han realizando sucesivos análisis del fondo del detector y se han comparado los resultados obtenidos de los distintos espectros de emisiones gamma en las distintas etapas. La variación en el espectro de fondo que ejerce el blindaje [15] es evidente (ver Figura III.1 de los espectros desplazados para apreciar la disminución en el número de radionucleidos presentes) y se puede concluir que:

El blindaje de plomo de 15 cm. es suficiente para reducir de forma significativa la presencia de la mayoría de los radionucleidos presentes de forma natural en el ambiente. El blindaje de cobre electrolítico de 4 mm. sirve para reducir los rayos x característicos del plomo y permite, a su vez, proteger el detector al quedar alojado en una cavidad más estanca. La presencia de radón se disminuye con una ventilación inicial de nitrógeno y un flujo forzado por la evaporación desde el dewar.

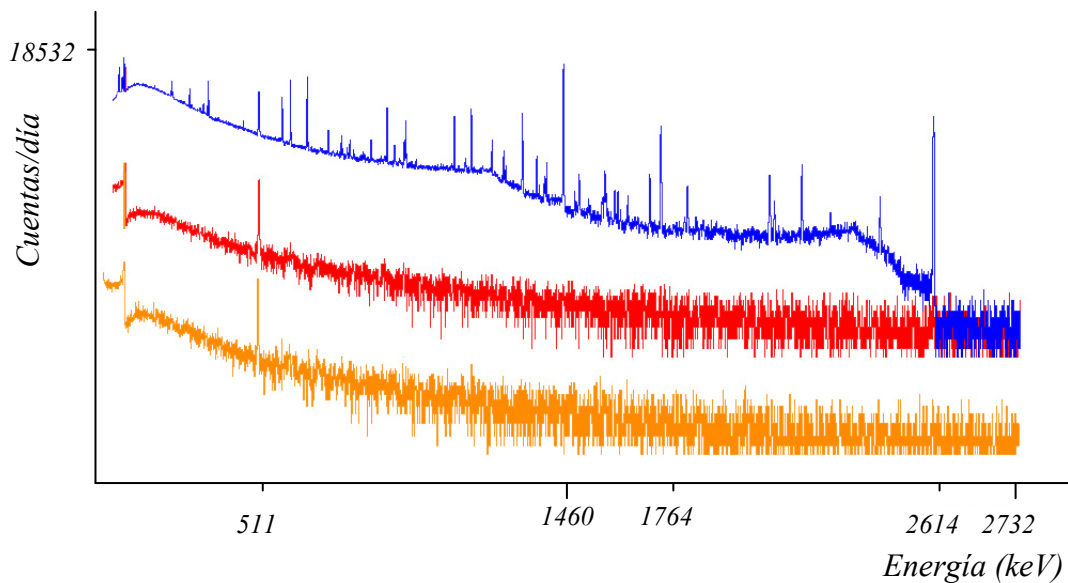


Figura III.1: Espectros gamma (desplazados) del fondo sin blindaje (espectro superior), con 15 cm. de plomo (espectro intermedio), con 15 cm. de plomo con veto cósmico (espectro inferior).

Al calcular el número de cuentas del fondo totales en tramos de 900 keV y comparar estos tramos para las tres situaciones, es decir el detector primeramente sin blindaje, luego con 15 cm. de plomo y para finalizar añadiendo el blindaje activo del veto

cósmico, el resultado de esta comparación es que se han conseguido reducciones importantes para cada uno de los tramos, como puede comprobarse en la siguiente tabla.

<i>Energía (keV)</i>	<i>Cuentas/día</i>	<i>Cuentas/día (Porcentajes)</i>	
	<i>Sin blindaje</i>	<i>15 cm. plomo, caja cobre y flujo de N₂</i>	<i>15 cm. plomo, caja cobre, flujo de N₂ y veto cósmico</i>
<i>0-900</i>	<i>3.862.854</i>	<i>119.748(96,9%)</i>	<i>2.275(99%)</i>
<i>900-1800</i>	<i>433.594</i>	<i>9.539(97,8%)</i>	<i>143(99%)</i>
<i>1800-2700</i>	<i>67.364</i>	<i>4.244(93,7%)</i>	<i>161(99%)</i>

Tabla III.1.: Número de cuentas totales en tramos de energía de 900 keV y porcentajes de reducción respecto de la primera etapa sin blindaje.

En la siguiente Fotografía III.3 se muestra el detector con todos los blindajes y a continuación el esquema del sistema de espectrometría gamma, detector y cadena electrónica asociada.



Fotografía III.3: Detector de germanio con blindajes activo y pasivo.

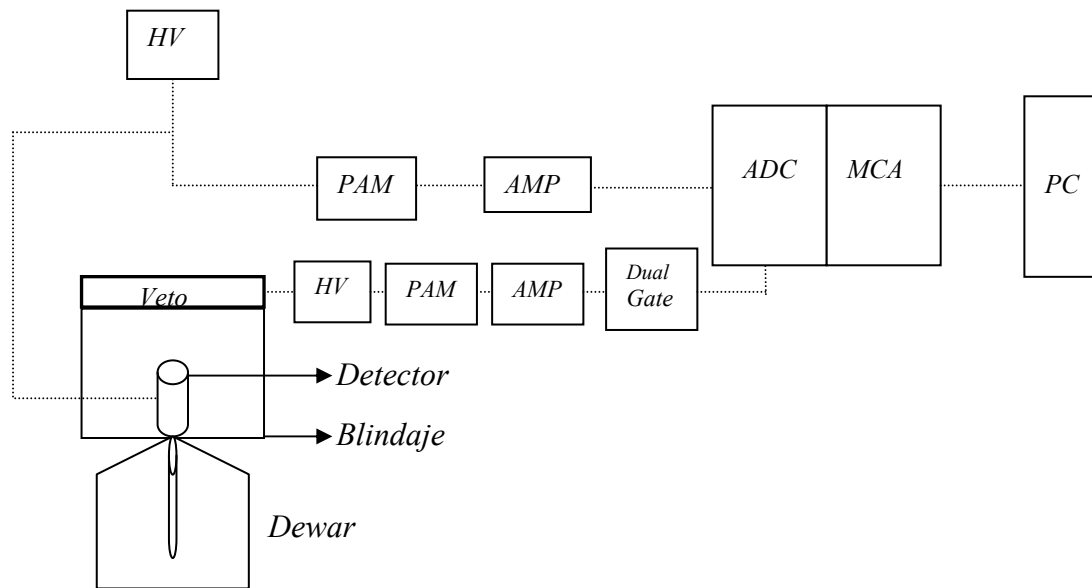


Figura III.2: Diagrama del sistema de espectrometría gamma: HV, fuente de alta tensión; PAM, preamplificador; AMP, amplificador; ADC, convertidor analógico digital; MCA, analizador multicanal; Dual Gate Generator; PC, ordenador personal.

III.1.6. Eficiencia, Resolución y Calibración en energía

Eficiencia

La eficiencia del detector [13] es una magnitud fundamental en cualquier sistema de espectrometría y marca la diferencia entre los distintos tipos de detectores. Indica la relación entre la radiación detectada y la emitida por la fuente, es decir mide la capacidad de los fotones para perder toda su energía y producir un fotopico en el espectro gamma. Este valor depende entre otros parámetros de la geometría del dispositivo detector-muestra. Además su valor varía con la energía, tipo de detector y el tamaño de su volumen activo.

Uno de los grandes problemas de la espectrometría gamma es determinar, con precisión, la eficiencia en función de la energía [18] para una muestra dada. Este problema es especialmente importante en muestras volumétricas, donde los efectos de la autoabsorción son importantes para un amplio rango de energías. Los principales

factores de los que depende la autoabsorción [19] son la densidad y la composición de la matriz. El primero sólo influye significativamente por debajo de los 100 keV y el segundo en todo el intervalo de energías.

La eficiencia se define como el número total de pulsos registrados en el espectro y el número de fotones emitidos por la fuente, de esta forma se contabilizan las interacciones producidas en el detector. La eficiencia del detector, calculada con las emisiones de 1.332 keV de una muestra puntual de Co^{60} es de 43,7 % (eficiencia relativa a un detector de yoduro sódico estándar de 3"x3"). Este valor es un indicativo estándar para poder comparar distintos detectores.

Se define la eficiencia del fotopico o eficiencia del pico de absorción total (Full Energy Peak Efficiency, FEPE) como la relación entre el número de cuentas netas de un pico para una geometría de detección determinada y el número total de fotones de esa energía emitidos por la fuente. La eficiencia [13] así definida depende de la geometría de la muestra analizada y de su posición relativa al detector. Para cada configuración, se obtiene una curva de eficiencia en función de la energía. Por tanto la calibración ha de realizarse en las mismas condiciones a las de medida de las muestras reales, en el presente caso de medida por espectrometría gamma de los electrodos, se prepararon unos patrones de calibración buscando la geometría más semejante a la de estas varillas y que se comentarán en el siguiente apartado.

El método más común para la determinación de la eficiencia requiere que el patrón contenga radionucleidos que emitan con diversas energías que cubran todo el intervalo en el que se desea calibrar. Para evitar efectos de picos suma se procura utilizar emisores monoenergéticos.

De las áreas de los fotopicos producidos por cada una de estas emisiones se obtienen las eficiencias experimentales para cada energía, que se pueden calcular con la siguiente ecuación (Ec.III.1)

$$\varepsilon = \frac{C}{tAI} F \quad (\text{Ec. III.1})$$

Donde

C: Área neta en el fotopico considerado, se calcula como el área del pico en el espectro medido, menos el área de ese mismo pico en el espectro de fondo (se supone medido el mismo tiempo que el anterior).

t : Tiempo de medida.

A: Actividad en la fuente del radionucleido que emite el fotón de energía E con probabilidad de emisión I.

F: Factor de corrección (autoabsorción diferente a la de la muestra).

Los sistemas de análisis de espectros cuentan con programas de cálculo que permiten realizar un tratamiento de los espectros adquiridos y obtener las curvas de calibración correspondientes. Una forma habitual de representar la curva eficiencia-energía es mediante la siguiente función:

$$\ln \varepsilon = \sum_{i=0}^{i=1} a_i \ln \left[\frac{E}{E_0} \right]^i \quad (\text{Ec. III.2})$$

Siendo

ε : Eficiencia del detector.

E: Energía del fotopico (en keV).

E_0 : Igual a 1 keV, que se introduce para dar carácter adimensional a los datos de entrada para el ajuste.

a_i : Coeficientes que se determinan en el proceso de calibración.

Esta función se emplea para calcular los valores de eficiencia en zonas diferentes a las obtenidas con el patrón. Para la calibración en eficiencia es conveniente usar patrones con mezcla de emisores monoenergéticos. Si se utilizan emisores multigamma hay que tener en cuenta los posibles efectos debidos a los picos suma [20], situación bastante común y difícil de estimar.

Resolución

La resolución en energía es la capacidad que tiene el detector para distinguir entre radiaciones diferentes de energías próximas. Para una radiación monoenergética, el detector ideal debería producir como señal una función delta, sin embargo el resultado es una gaussiana de anchura medible, causada por la fluctuación en el número de ionizaciones y excitaciones.

En detectores de germanio viene indicada en términos de su FWHM [13] (Full Width at Half Maximum), anchura del pico a la mitad de su altura, en unidades de keV. Por convenio se especifica la resolución de las emisiones 5,9 keV del Fe^{55} , 122 keV del Co^{57} y 1.332 keV del Co^{60} . La resolución varía con el tamaño del detector, para 5,9 keV varía entre 150 eV y 400 eV; para 122 keV varía entre 0,5 keV y 1,2 keV; (detector coaxial de gran volumen). Y para 1.332 keV entre 1,8 keV y 2,3 keV. El detector utilizado trabaja con una resolución para las emisiones de 122 keV del Co^{57} y 1.332 keV del Co^{60} de 0,853 keV y 1,77 keV respectivamente.

Calibración en energía

Para la medida de los emisores gamma es imprescindible la identificación de los fotopicos presentes en los espectros y para ello es necesaria una calibración precisa para poder asignar la energía correspondiente a cada pico del espectro. En aplicaciones ambientales [18], el rango de interés para la calibración suele ser desde 60 keV a unos 2 ó 3 MeV. Ello se debe a que la emisión más energética de las tres cadenas naturales es la del 2.614,7 keV correspondiente al Tl^{208} .

La calibración en energía del detector de germanio, es decir la relación entre el número de canal del analizador multicanal y la energía, se hace de modo que cubra todo el rango energético de acuerdo con el tipo de muestras a analizar.

La fuente de calibración en energía debe ser medida un tiempo lo suficientemente largo para producir fotopicos bien definidos. Representando los valores del número del canal

donde se encuentra el centroide de los fotopicos frente a su energía y haciendo un ajuste por mínimos cuadrados se consigue la curva de calibración.

A partir de una o varias fuentes de calibración con emisión de fotones de energías conocidas E_i , se puede ajustar por mínimos cuadrados el conjunto de puntos (c_i , E_i) canal-energía, a un polinomio de primer grado, en una recta de regresión del tipo

$$E = a C + b$$

Donde

E: Energía de los fotones gamma absorbidas

C: Número de canal correspondiente a la posición del fotopico de dicha energía

a y b: Coeficientes que resultan del ajuste

De esta forma y teniendo en cuenta las mismas condiciones de medida, podemos obtener las energías de cada radiación emitida por cualquier fuente, conociendo el canal de los máximos de los picos. Por tanto la calibración en energías tiene como objetivo la determinación de una relación entre los números de los canales proporcionados por el analizador multicanal y la energía de los fotones.

Para la calibración en energías del sistema, se pueden utilizar patrones con un multiemisor gamma cuyos fotones cubran el intervalo de energías de interés o mezclas de diferentes emisores gamma monoenergéticos. En este caso los efectos de los picos suma carecen de importancia.

III.1.7 Patrones de calibración en capilares

Para abordar el estudio de los electrodos por espectrometría gamma es necesaria la calibración del sistema con un patrón de geometría similar a la de la muestra que se analiza. En el presente estudio se llevó a cabo el análisis gamma de electrodos de tungsteno toriados de tres diámetros diferentes 1; 2,4 y 4 mm.

El objeto de este análisis es conocer el estado de equilibrio de la cadena de desintegración del Th^{232} . En la fabricación del óxido de torio que contiene el electrodo, tiene lugar un proceso químico o metalúrgico para extraer el torio del mineral de partida. Dicho tratamiento inicial de la monazita supone la rotura de la cadena radiactiva (ver Tabla II.1) y para estudiarla es preciso conocer la parte de la cadena comprendida entre los dos isótopos de torio, Th^{232} y Th^{228} , de forma que calcularemos el contenido en Ac^{228} por espectrometría gamma. También hay que determinar el contenido de alguno de los radionucleidos que se encuentran por debajo del Rn^{220} , para estudiar la posible emanación de radón, por lo que calcularemos el contenido de Tl^{208} .

Se preparan tres patrones de calibración siguiendo las recomendaciones de preparación de disoluciones patrón del procedimiento 1.4 [19] del CSN, utilizando como recipientes tres tubos de vidrio de aproximadamente 1, 2 y 4 mm de diámetro. El patrón de referencia utilizado es una muestra líquida radiactiva certificada por el Laboratorio de la Unidad de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) que contiene los siguientes nucleidos: Am^{241} , Cd^{109} , Co^{57} , Co^{60} , Cs^{137} , Sr^{85} , Sn^{113} , Y^{88} y Te^{123m} en medio clorhídrico de concentración 2M y en las concentraciones indicadas en la siguiente Tabla III.2.

RADIONUCLEIDO	CONCENTRACION DE ACTIVIDAD
Am^{241}	2.999±54
Cd^{109}	25.042±500
Co^{57}	2.621±78
Co^{60}	2.678±27
Cs^{137}	3.573±36
Sr^{85}	735±14
Sn^{113}	2.115±63
Y^{88}	1.682±50
Te^{123m}	5.392±129

Tabla III.2: Concentraciones de actividad (Bq/gr) de los radionucleidos de la solución patrón (Incertidumbre con factor $k=2$).

Se introducen en cada capilar los siguientes volúmenes del patrón anterior; 18 μl en el de 1 mm. de diámetro, 80 μl para el de 2 mm. y 200 μl para el de 4 mm. Finalmente los tubos son sellados con material epoxi-Araldit resistente a las disoluciones ácidas. Se miden los capilares en el detector de germanio y se obtiene el siguiente espectro gamma de la Figura III.3.

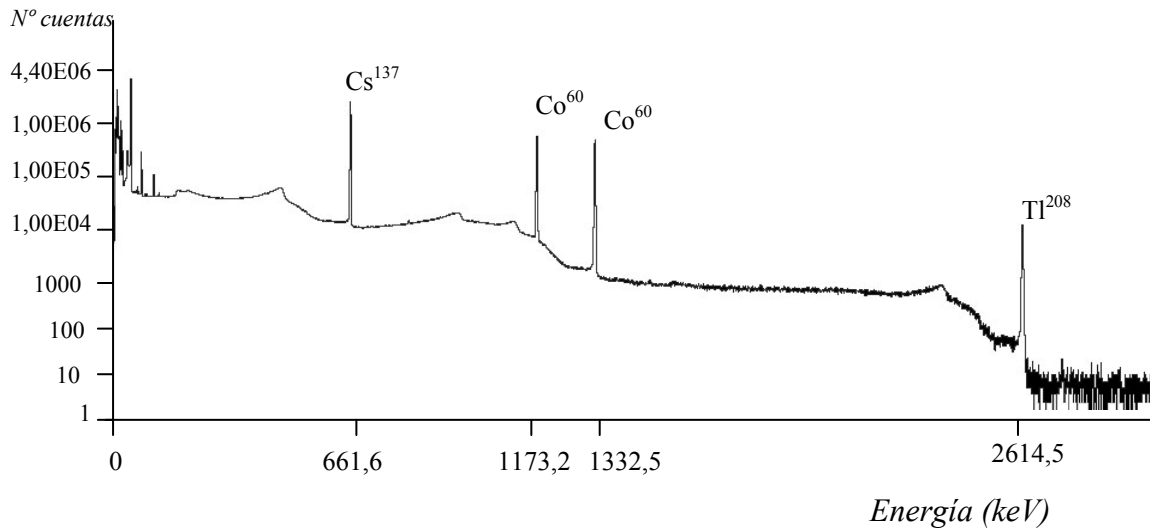


Figura III.3: Espectro gamma del capilar de 4mm de diámetro con cóctel gamma.

Se realiza la medida de cada uno de los capilares en el detector y debido a su reducido volumen, es necesario ampliar el tiempo de medida hasta 216.000 segundos. Se incluyen a continuación las correspondientes curvas de calibración para cada uno de los patrones. Se representan los valores de eficiencia para el Co⁵⁷, Cs¹³⁷ y Co⁶⁰.

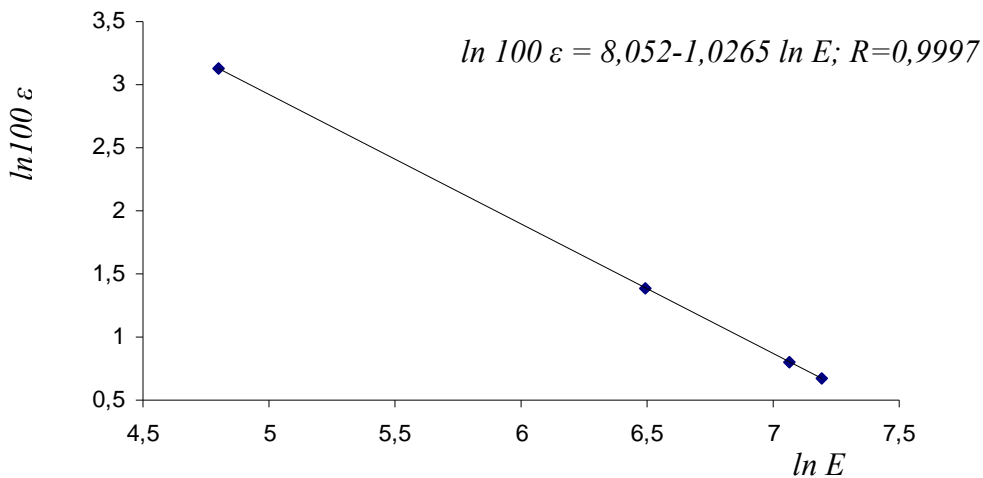


Figura III.4: Curva eficiencia-energía del patrón gamma de 1mm de diámetro.

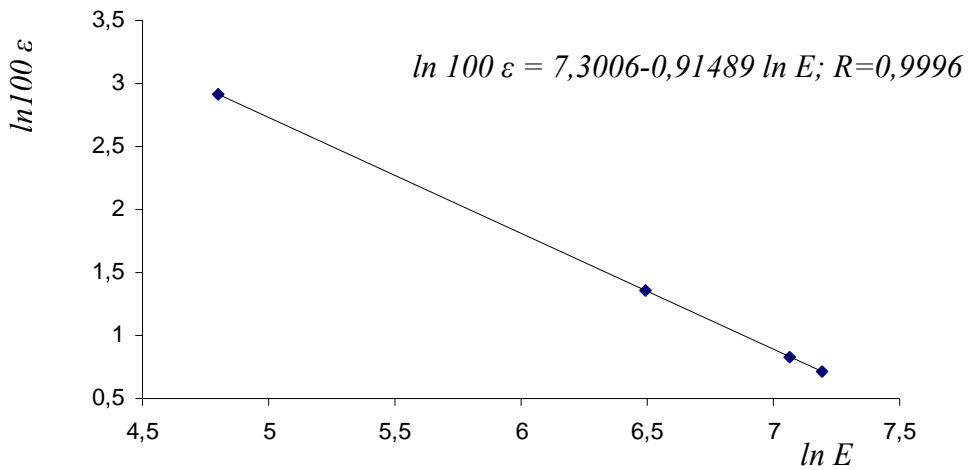


Figura III.5: Curva eficiencia-energía del patrón gamma de 2mm de diámetro.

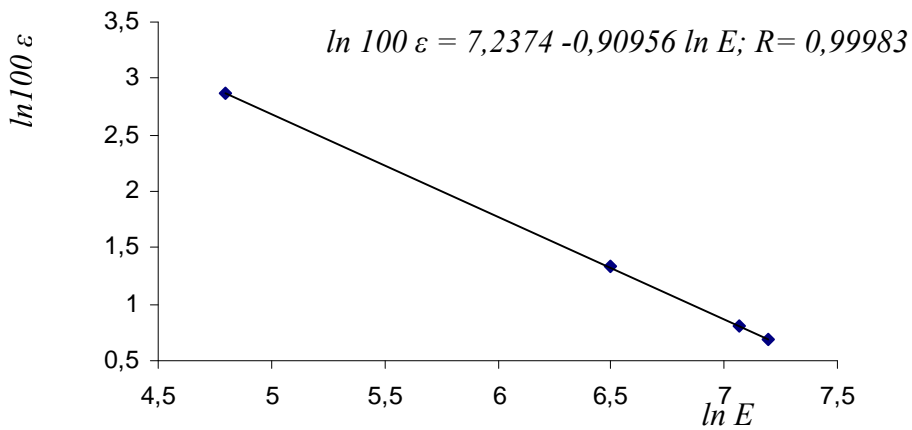


Figura III.6: Curva eficiencia-energía del patrón gamma de 4mm de diámetro.

Con las curvas de calibración en eficiencia para los distintos diámetros se puede, una vez conocida la energía de emisión del isótopo, calcular la eficiencia por interpolación en la función correspondiente.

III.2. PARAMETROS DEL ANALISIS POR ESPECTROMETRIA GAMMA

III.2.1. Actividad

Una vez calibrado el sistema de espectrometría gamma en energía, se pueden identificar los radionucleidos emisores gamma presentes en la muestra, calculando en primer lugar la eficiencia a través de la energía atribuida al fotopico y del número neto de cuentas y a continuación la actividad específica de cada nucleido de la muestra.

La concentración de actividad [21] o actividad por unidad de masa o volumen, C , se obtiene a partir del área neta del fotopico o del número neto de cuentas registradas entre los canales que definen el fotopico correspondiente, A , mediante la expresión

$$C = \frac{A}{P\varepsilon tM} \quad (\text{Ec.III.3})$$

Siendo:

A : Número de cuentas neto en el fotopico considerado, se calcula como el área del pico en el espectro medido, menos el área de ese mismo pico en el espectro de fondo (se supone medido el mismo tiempo que el anterior).

P : Probabilidad de emisión del fotón gamma.

ε : Eficiencia de fotopico correspondiente a una energía dada y a la geometría de recuento utilizada para la medida.

t : Tiempo de medida de la muestra.

M : Masa o volumen de la muestra.

En general, las medidas de radiactividad deben referirse a un tiempo determinado, o tiempo de referencia que suele ser anterior al de medida. Por lo tanto, los valores obtenidos en el análisis en un tiempo t_m deberán corregirse por decaimiento para referirlos a un tiempo t_0 , mediante la expresión:

$$A(t_0) = A(t_m) e^{\frac{-\ln 2 * \Delta t}{T_{1/2}}} \quad \text{donde } \Delta t = t_m - t_0 \quad (\text{Ec.III.4})$$

III.2.2. Incertidumbre

La incertidumbre es una medida de las diferencias entre cada uno de los valores experimentales y su valor medio. Mide la mayor o menor dispersión [22] de los resultados experimentales alrededor del valor medio, es decir la precisión de los mismos. La incertidumbre calculada a continuación es la que se obtiene por combinación de las diversas componentes de la incertidumbre que se hayan identificado.

Al realizar el proceso de medición, el valor obtenido y asignado a la medida debe ir acompañado de la correspondiente incertidumbre que se debe estimar teniendo en cuenta las diversas componentes [23] que la constituyan (Ec.III.3). Las posibles fuentes de incertidumbre son las siguientes:

$u(A)$, incertidumbre del área del fotopico

$u(P)$, incertidumbre de la probabilidad de emisión

$u(t)$, incertidumbre de la determinación del tiempo de medida

$u(\varepsilon)$, incertidumbre de la eficiencia de detección

$u(M)$, incertidumbre de la determinación de la masa.

La expresión de la incertidumbre para la actividad A (Ec. III.3) según la Guía 1.3. para la evaluación de incertidumbres del CSN [21], viene definida por la siguiente ecuación.

$$u^2(C) = \left(\frac{\partial C}{\partial A}\right)^2 u^2(A) + \left(\frac{\partial C}{\partial P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{\partial C}{\partial \varepsilon}\right)^2 u^2(\varepsilon) + \left(\frac{\partial C}{\partial M}\right)^2 u^2(M) + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)^2 u^2(t)$$

(Ec. III.5)

Si calculamos las correspondientes derivadas, queda la siguiente expresión,

$$u^2(C) = \left(\frac{1}{P\varepsilon Mt}\right)^2 u^2(A) + \left(-\frac{A}{P^2\varepsilon Mt}\right)^2 u^2(P) + \left(-\frac{A}{P\varepsilon^2 Mt}\right)^2 u^2(\varepsilon) + \left(-\frac{A}{P\varepsilon M^2 t}\right)^2 u^2(M) + \left(-\frac{A}{P\varepsilon M t^2}\right)^2 u^2(t)$$

(Ec. III.6)

De donde,

$$\frac{u^2(C)}{C^2} = \frac{u^2(A)}{A^2} + \frac{u^2(P)}{P^2} + \frac{u^2(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{u^2(M)}{M^2} + \frac{u^2(t)}{t^2}$$

(Ec. III.7)

La incertidumbre de las probabilidades de emisión $\frac{u^2(P)}{P^2}$ aparece junto con los valores de emisión de energía en las tablas correspondientes de los distintos isótopos; en este trabajo se han utilizado los valores facilitados por la Universidad de Lund. Si el área del pico considerado es una suma de cuentas de canales del espectro, y se supone estadística de Poisson, se verifica que $u^2(A) = A$, con lo que la ecuación III.7 queda

$$\frac{u^2(C)}{C^2} = \frac{1}{A} + \frac{u^2(P)}{P^2} + \frac{u^2(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{u^2(M)}{M^2} + \frac{u^2(t)}{t^2}$$

(Ec. III.8)

La expresión de la incertidumbre combinada III.8 puede escribirse como

$$u(C) = C \sqrt{\frac{1}{A} + \frac{u^2(P)}{P^2} + \frac{u^2(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{u^2(M)}{M^2} + \frac{u^2(t)}{t^2}}$$

(Ec. III.9)

Una componente adicional de esta expresión anterior puede ser la incertidumbre sobre la corrección por decaimiento (ver Ec. III.4). Si las medidas se refieren a un tiempo determinado t_0 , y el análisis ha tenido lugar en un tiempo t_m , cuando $\Delta t = t_m - t_0$ es pequeño respecto del periodo de semidesintegración $T_{1/2}$, la incertidumbre sobre esta corrección puede despreciarse en general, sin embargo, cuando este periodo es relativamente importante y la incertidumbre $u(T_{1/2})$ lo aconseje, deberá considerarse la contribución debida a este efecto. Su cálculo a partir de la expresión III.4 lleva a:

$$u(A(t_m)) = \sqrt{e^{\frac{\Delta t \ln 2}{T_{1/2}}} \left[u_{A_0}^2 + \frac{(\Delta t A_0 \ln 2)^2}{T_{1/2}^4} u_{T_{1/2}}^2 \right]}$$

(Ec. III.10)

La incertidumbre expandida [24], se define como aquella que se obtiene al multiplicar la incertidumbre combinada (Ec.III.9) por un factor de cobertura k [22]. Su utilidad reside en que si se hace la hipótesis de una distribución conocida (normal u otra), se pueden establecer niveles de confianza en función de k . Para una distribución gaussiana normalizada o normal tipificada si se utiliza un factor de cobertura $k=1$, la incertidumbre expandida corresponde a una probabilidad del 68,27%. Si el factor de cobertura es $k=2$, la probabilidad es de un 95,45%. Estos valores corresponden a las dos colas de la distribución normal tipificada. Para el cálculo de los límites de decisión hay que utilizar una sola cola de la distribución, en cuyo caso las probabilidades son 84,13% para $k=1$ y 97,73% para $k=2$. La ecuación III.9, en tal caso se multiplicaría por un factor dos para obtener la incertidumbre expandida.

III.2.3. Umbral de Decisión

El Umbral de Decisión [25], también conocido como Límite Crítico (L_c), es un número de cuentas, determinado a priori, que permite decidir, con una determinada probabilidad, si el resultado de una medida concreta es asignable al fondo o a una actividad real. Permite por tanto establecer si el resultado de una medida es estadísticamente significativo, es decir si no es debido al fondo. Si se desea tener una probabilidad bien definida de cometer un error de primera especie [26] (decir que hay actividad cuando realmente no la hay) la respuesta es el umbral de decisión, definido por la siguiente ecuación,

$$L_c = k_\alpha \sigma_0 \quad (\text{Ec.III.11})$$

Donde σ_0 es la desviación estándar de la distribución de medidas del fondo y k_α es el factor de cobertura para una distribución normal de una cola, L_c se puede escribir en función de las cuentas del fondo, x_0 , si se supone que $\text{Var}(\text{cuentas netas}) = \text{Cuentas netas}$ (como es el caso de la estadística de Poisson). Sea x_g las cuentas totales, x_n las cuentas netas y x_0 las cuentas del fondo o blanco. Es claro que $x_g = x_n + x_0$ y que,

$$\text{Var}(x_n) = \text{Var}(x_g) + \text{Var}(x_0) = x_g + \text{Var}(x_0) = x_n + x_0 + \text{Var}(x_0) = x_n + 2x_0$$

Como

$$\sigma_0^2 = \text{Var}(x_n=0) \text{ queda } \sigma_0^2 = 2 x_0$$

de la definición de L_c se obtiene,

$$L_c = k_\alpha (2x_0)^{1/2} \quad (\text{Ec.III.12})$$

Donde el factor k_α se calcula a partir del dato, conocido a priori, sobre la probabilidad, α , de cometer un error de primera especie, con la distribución de una cola. Los valores de α y k_α para la distribución normal de una cola aparecen en la siguiente Tabla.

α	k_α
0,1587	1,000
0,100	1,282
0,05	1,645
0,025	1,960
0,02275	2,000
0,010	2,326
0,00621	2,500
0,00135	3,000

Tabla III.3. Valores de α y k_α para la distribución normal de una cola.

El Umbral de Decisión, L_c es por tanto un número de cuentas neto, (tasa de recuento neto), que depende exclusivamente de la anchura del fondo o blanco que se esté utilizando en la medida y tal que si el resultado de la medida real de la muestra sobrepasa ese umbral se puede afirmar que se ha detectado una actividad y hay que calcularla. Si el resultado de la medida es inferior a L_c , es inapreciable respecto del fondo y se puede afirmar que no se ha detectado actividad.

III.2.4. Actividad Mínima Detectable

Normalmente con los resultados de una determinación se expresa el valor correspondiente al Límite de Detección LID [27] (o la actividad calculada a partir de este límite que se suele denominar Actividad Mínima Detectable (AMD). En muchos casos se indica simplemente $< \text{AMD}$ o $< \text{LID}$ si el resultado ha sido inferior a este valor. Sin embargo con esta práctica se está perdiendo información ya que es posible calcular una actividad inferior a la AMD que sea una actividad real. La actividad es una magnitud derivada, deducida de lo que realmente suministran los equipos de medida que son cuentas. Como queda dicho en el apartado anterior, la actividad mínima que un sistema es capaz de determinar, es la actividad correspondiente al Umbral de Decisión.

Dado un fondo determinado, el Límite de Detección establece cual debería ser el número de cuentas que deberían resultar en una medida, para estar seguro con una cierta probabilidad β de cometer un error de tipo II (equivaldría a afirmar que no hay actividad cuando realmente si la hay).

El Límite de Detección está por tanto dado por:

$$L_d = L_c + k_\beta \sigma_D \quad (\text{Ec.III.13})$$

Donde k_β se calcula con la distribución de una cola. El Umbral de Decisión L_c es por tanto siempre inferior al Límite de Detección.

$$L_c < L_d \quad (\text{Ec.III.14})$$

La incertidumbre de la medida, σ_D , es función del propio límite de detección y por tanto L_d está definido en una ecuación no lineal cuya solución se obtiene por lo general tras ciertas aproximaciones y simplificaciones que conducen a una expresión para el límite de detección dada por:

$$L_d = k^2 + 2k\sigma_0 = k^2 + 2L_c \quad (\text{Ec.III.15})$$

Donde en su obtención se ha considerado que $k_\alpha = k_\beta = k$.

El Límite de Detección [28,29], L_d , es una medida de la idoneidad del sistema de medida (procedimientos y equipos) para la determinación solicitada y solamente puede y debe utilizarse para compararse con un valor guía dado, V_g . Nunca un resultado de medida puede compararse con L_d . La actividad calculada a partir de L_d se denomina AMD, pero esta actividad solamente se podría utilizar para compararla con un valor guía especificado en forma de actividad. El que un resultado resulte mayor o menor que el LID es irrelevante; L_d sólo es comparable con el valor guía.

El sistema de medida será adecuado si el límite de detección es inferior a este valor guía; en caso contrario deben efectuarse modificaciones en el sistema para conseguirlo, como disminuir el fondo o aumentar el tiempo de medida.

El término actividad mínima [30] que un sistema puede detectar no está definido de forma clara en la literatura, se refiere a una actividad y no a un número de cuentas pero podría ser la actividad de cualquiera de los límites de decisión.

Estrictamente la Actividad Mínima Detectable, entendida como la mínima que un sistema es capaz de detectar, sería la correspondiente al límite crítico tanto si hay actividad como si no la hay. En ambos casos es la actividad mínima que el sistema puede detectar para la situación concreta que se trata, con una probabilidad definida de cometer un error de tipo I o de primera especie en la afirmación correspondiente.

Interesa saber o bien la medida de una actividad en una muestra, o bien la afirmación de que es inferior a una actividad dada como valor de referencia.

La determinación de las áreas de los picos y las cuentas que corresponden al fondo en el caso de los espectros gamma, se hace necesariamente a partir de las cuentas contenidas en los distintos canales. Los picos suelen tener una anchura de varios canales y están superpuestos a un fondo o en otras palabras hay un fondo debajo de los picos.

Hay por tanto que distinguir entre las cuentas que corresponden al fotopico y las cuentas del fondo; los programas de análisis de espectros realizan esta labor de forma

automática y con diversos tipos de algoritmos y ajustes para el fondo y los picos. El programa utilizado en esta tesis, el *Anesga*, calcula el área del pico mediante ajuste de una gaussiana (o hasta cinco si los picos están muy próximos) y además un fondo cuadrático cuya extensión se puede fijar a mano o bien es asignado por el programa a ambos lados de la región en que se encuentran los picos.

El programa *Anesga* proporciona el valor del Límite de Detección para cada pico considerado y permite calcular la correspondiente Actividad Mínima Detectable teniendo en cuenta la eficiencia e intensidad en el pico considerado, así como el tiempo de medida y la masa o volumen si se expresa por unidades de masa o volumen.

$$AMD = \frac{L_d}{\varepsilon t P M} = \frac{k^2 + 2L_c}{\varepsilon t P M} \quad (\text{Ec.III.16})$$

Siendo,

k: Factor de cobertura

L_c : Umbral de Decisión.

ε : Eficiencia de contaje del equipo en tanto por uno

t: Tiempo de realización de la medida (el mismo tiempo que para medida del fondo)

P: Probabilidad de emisión del isótopo considerado

M: Masa de la muestra.

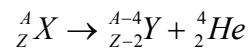
Una vez establecida la idoneidad de los equipos y métodos se debe proceder al cálculo del Umbral de Decisión, L_c y proceder a la medida de la muestra. Si el resultado es superior a L_c o su equivalente en actividad, se debe afirmar que hay una actividad y proceder a su cálculo y su incertidumbre. Si el resultado fuese inferior a L_c se puede afirmar que no se ha detectado actividad.

III.3. SISTEMAS PARA ESPECTROMETRIA ALFA

III.3.1. Introducción

La técnica radiométrica de la espectrometría alfa supone la medida de actividades de los radionucleidos de interés mediante el recuento de sus respectivas emisiones alfa.

La desintegración alfa [13] es una forma de desintegración radiactiva donde un núcleo atómico emite una partícula alfa y se transforma en un núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico. Puede ser considerada como la emisión espontánea de núcleos de helio (en adelante partículas alfa) a partir de núcleos de átomos más pesados. Este fenómeno se representa con la siguiente reacción:



en la que el nucleido padre X se desintegra al nucleido hijo Y con emisión de una partícula alfa. La energía puesta en juego se reparte entre la partícula alfa y el núcleo de retroceso, en una proporción de $4/(A-4)$. Si el nucleido hijo queda en su estado fundamental, se observarían solamente partículas alfa monoenergéticas características de esa desintegración. Pero aunque existen nucleidos emisores monoenergéticos es más usual que el nucleido hijo quede en un estado excitado del que pasará al fundamental por emisión de uno o varios fotones gamma o por el proceso competitivo con el anterior de emisión de electrones de conversión interna. En ocasiones, la llegada al detector de estas radiaciones, emitidas simultáneamente con las partículas alfa, pueden alterar el espectro que se trata de medir.

En la siguiente Figura III.7., puede verse el esquema de desintegración [31] de un nucleido hipotético con emisión de partículas alfa de distintas energías y las posibles vías para llegar al estado fundamental.

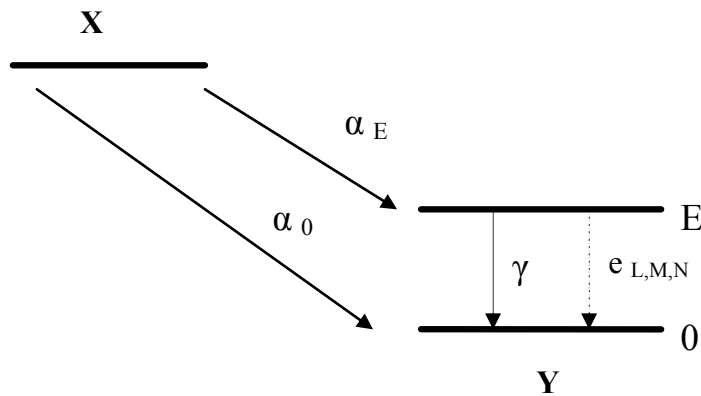


Figura III.7: Desintegración de un nucleido con emisión de partículas alfa.

Desde el nivel excitado de energía E, se puede producir la estabilización por emisión de un fotón gamma o por la emisión de electrones de conversión, los cuales a su vez suelen ir acompañados de la emisión de fotones X producidos en la reordenación atómica subsiguiente. Este tipo de emisión es energéticamente posible solamente para núcleos con $Z > 66$, aunque por razones relacionadas con la longitud del periodo de desintegración, solamente son observables aquellas que correspondan a valores de Z mayores o iguales que 83.

Las energías típicas de las partículas alfa son de unos pocos MeV, con tendencia a concentrarse en el intervalo entre 4 y 6 MeV. Cada nucleido emite una serie de partículas cuyas energías e intensidades relativas son características, lo que constituye el fundamento de la espectrometría alfa. La resolución en energías de los detectores es insuficiente para separar todas las líneas de un espectro, por lo que el correcto análisis del espectro es a menudo la parte esencial de todo el proceso.

Para la determinación cualitativa y cuantitativa de los radionucleidos emisores alfa, los picos del espectro deben tener una buena resolución y estar suficientemente separados. Para ello, el depósito del elemento sobre un soporte adecuado debe tener muy poca masa, ser fino y homogéneo. Al conjunto del soporte, con el elemento depositado, es lo que se llama fuente radiactiva. La preparación minuciosa de estas fuentes en el laboratorio es el factor determinante para realizar una buena determinación, ya que el

trabajo de laboratorio conlleva numerosas etapas y da lugar al desarrollo de procedimientos de varios días de duración.

III.3.2. Detectores de semiconductor

La espectrometría alfa es un instrumento de gran utilidad en muy diversos campos de aplicación que van desde la determinación de datos nucleares hasta la medición de niveles muy bajos de actividad. Como consecuencia se han desarrollado instrumentos con características muy diversas y con aplicaciones en campos diferentes. La elección del detector es siempre un compromiso entre dos requerimientos básicos, por un lado la eficiencia tan alta como sea posible para disminuir el tiempo de recuento y por otro una resolución en energías suficiente para poder discriminar las líneas componentes del espectro.

Los instrumentos básicos en este tipo de detección [32,33] son: las cámaras de ionización, los sistemas de centelleo y los detectores de semiconductor (de barrera de silicio). De este último tipo son los dos detectores utilizados en este trabajo. Los antiguos detectores de barrera de superficie, han sido sustituidos por detectores implantados que funcionan basados en el mismo principio pero presentan ventajas como mayor robustez, menor ventana de entrada y menor ruido electrónico, todo lo cual contribuye a una mejor resolución en energías.

El principio de funcionamiento es la creación de una unión p-n que, polarizada inversamente crea una zona libre de carga. Al atravesar la radiación esa zona, se crea un gran número de pares electrón-hueco, cuya recogida en ambos electrodos da lugar a una señal proporcional a la energía perdida por la radiación en la zona activa. El espesor de la zona libre de carga se controla mediante la tensión de polarización que es de unas decenas de voltios para este tipo de detectores. Antes de alcanzar la zona activa, la radiación debe atravesar la ventana de entrada al detector, que puede ser del orden de 40nm.

Como la energía necesaria para producir un par electrón-hueco es del orden de 3,5 eV en el silicio, el número de portadores de carga creados es mucho mayor que en un detector de gas, por lo que la resolución en energías es significativamente mejor. Los detectores de silicio se fabrican en gran variedad de tamaños, desde 25 mm² hasta varios miles de mm², mejorando su resolución cuanto menor sea su área.

Varios factores contribuyen al hecho de que un haz de partículas monoenergéticas medidas en un detector presenten una marcada dispersión en energías. Los efectos de la interacción con la propia fuente radiactiva son la primera contribución a esa dispersión. Una vez en el detector, el haz de partículas debe atravesar la ventana de entrada, produciéndose una nueva dispersión en las energías a la salida. Al llegar a la zona activa, las partículas pueden perder energía debido a: excitación, ionización y colisiones nucleares; por lo tanto el valor medio de la energía que finalmente se traduce en la formación de pares fluctuará en función de esta distribución de procesos posibles.

Todos estos efectos dan lugar a unas líneas características, con una contribución significativamente mayor de sucesos en la zona de menor energía.

Además de las características del detector, la configuración geométrica definida por el detector [34] y la fuente afectan fuertemente a la calidad del espectro. Al aumentar el ángulo sólido de la medida, las partículas alfa emitidas por la fuente en ángulos muy alejados de la normal comienzan a ser detectadas y esto contribuye al ensanchamiento de las líneas. Puesto que la eficiencia crece con el ángulo sólido, es necesario llegar a un compromiso entre eficiencia alta y buena resolución en energías.

Para que el haz de partículas proveniente de la fuente alcance el detector con la mínima distorsión posible, el sistema se encuentra alojado en una cámara de vacío y con un dispositivo que permite, mediante rendijas a diversas alturas, regular la distancia entre la fuente y el detector.

III.3.3. La cadena electrónica

Las señales de los detectores de radiación son generalmente muy débiles por lo que precisan de una amplificación. El primer paso se realiza con un preamplificador, cuya principal función es la conformación del impulso para permitir su transmisión sin pérdidas de información, es decir generar impulsos proporcionales a la pérdida energética de la partícula alfa en el detector. Estas señales tienen tiempos de subida muy cortos, del orden de nanosegundos y tiempos de caída muy largos, del orden de decenas de microsegundos y son enviadas al amplificador lineal de espectroscopia cuya función será: a) conformar el impulso con un tiempo de subida más largo y de caída más corto para permitir un buen análisis de amplitud y disminuir el apilamiento de impulsos y b) amplificar la señal hasta el tamaño aceptable por el dispositivo de análisis de impulsos o analizador multicanal. Éste está formado por un convertidor analógico digital, que proporciona la información numérica sobre la altura del impulso y con una memoria de almacenamiento. El histograma de clasificación del número de impulsos en función de su altura se denomina espectro de altura de impulsos y cada nivel posible, canal.

Existen otros módulos adicionales como el generador de tensión, que proporciona la polarización necesaria al detector y el generador de impulsos, que introduce impulsos eléctricos de tamaño regulable en la entrada del preamplificador.

El sistema de espectrometría alfa utilizado [35,36] consta de una cámara doble con dos detectores de implantación iónica (PIPS). Con una resolución de 18 keV, un área activa de 450 mm² y un fondo por día de trabajo de 6 cuentas. Cada cámara tiene su fuente de alta tensión que suministra el voltaje necesario y el sistema de las dos cámaras va conectado a una bomba de vacío para reducir la pérdida de energía de las partículas entre la fuente y el detector.

Las cámaras se encuentran en un módulo donde se aloja toda la electrónica acoplada en un sistema integrado, Modelo 7401 Canberra que incluye un preamplificador, un convertidor analógico digital (ADC) y está conectado directamente con el analizador multicanal (MCA) de 2 regiones de 1024 canales. Finalmente un ordenador con el sistema Genie 2000 de Canberra [37,38] nos permite controlar la adquisición y realizar

el análisis de los espectros. En la Figura III.8 se esquematiza el sistema de espectrometría alfa que se ha utilizado en este trabajo.

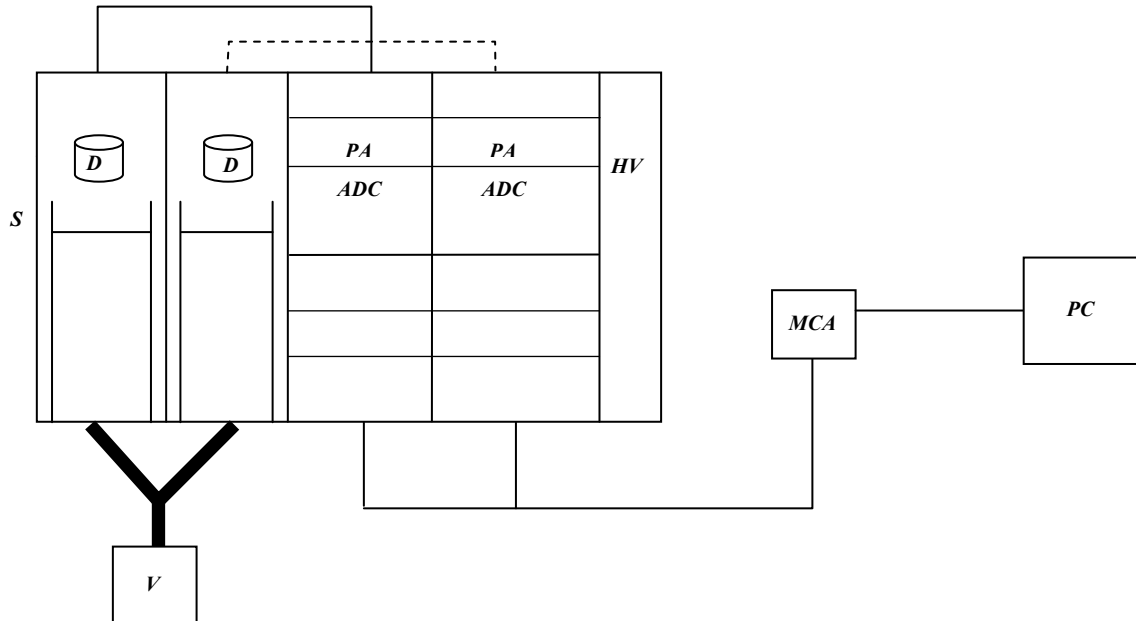


Figura III.8: Diagrama del sistema de espectrometría alfa: D, detector; S, soporte; V, bomba de vacío; PA, preamplificador; ADC, convertidor analógico digital; HV, fuente alta tensión, MCA analizador multicanal, PC ordenador personal

III.3.4. Eficiencia, Resolución y Calibración en energía

La mayoría de los isótopos naturales tienen emisiones con energías comprendidas entre los 3.947 keV del Th^{232} y los 8.784 keV del Po^{212} . Para este rango de energía y manteniendo fija la distancia de la muestra al detector, la eficiencia de recuento de los detectores de semiconductor no varía de forma significativa con la energía. En el sistema de espectrometría alfa utilizado en este trabajo, con unas condiciones de medida determinadas (diámetro de la fuente de 20 mm y una distancia al detector entre 5-13 mm.) se consiguen unas eficiencias de recuento [39] 10-20%. Aunque a distancias menores [13] se trabajaría con mejores eficiencias, se debe tener cuidado con los posibles núcleos de retroceso que pueden dañar el detector, como el Ra^{224} producido en la desintegración del Th^{228} y que corresponde a la cadena de desintegración del U^{232}

utilizado como trazador. Para poder reducir la distancia de medida se recubre la fuente con una película de polímero VYNS (cloruro de vinilo/acetato de vinilo) [40,41].

Los valores de eficiencia calculados [34] en función de la distancia al detector y para una fuente certificada de U^{233} aparecen representados en la siguiente gráfica y son muy similares en los dos detectores.

Distancia mm	Eficiencia (%)	Incertidumbre
5	24,1	1,8E-03
9	15,98	1,0E-03
13	10,82	8,4E-04
25	4,41	4,9E-04
45	1,64	4,2E-04

Tabla III.3: Eficiencias en función de la distancia

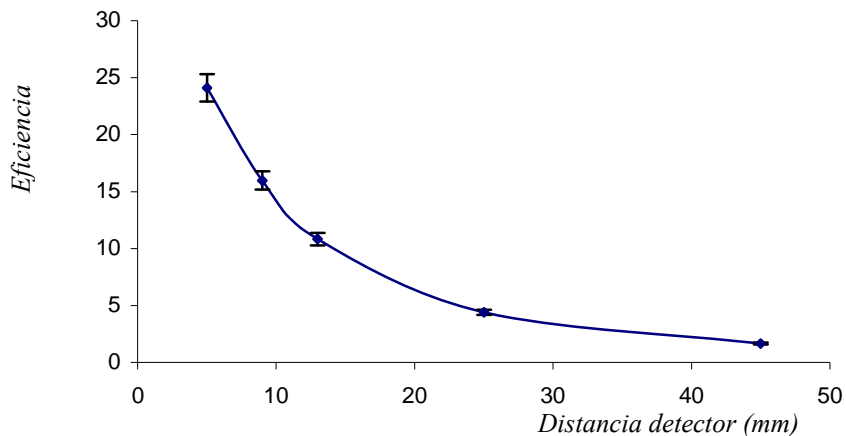


Figura III.9: Variación de la eficiencia en función de la distancia de la muestra al detector

En la siguiente Tabla III.4 se indican las energías de las emisiones alfa de los isótopos naturales de larga semivida que se analizan en espectrometría alfa, junto con las energías de los trazadores internos añadidos durante el proceso de separación radioquímica: el Th^{229} (alícuota de una disolución patrón de $20,9 \pm 0,3$ Bq/gr preparada por el Laboratorio de la Unidad de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del

Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)) y el U^{232} (alícuota de una disolución patrón de $15,49 \pm 0,1$ Bq/gr preparada por el LMRI del CIEMAT).

Isótopo	E (keV)	Intensidad (%)	T ½
Th²³² *	3947,2	21,7	1,405E10 y
	4012,3	78,2	
Th²²⁸ *	5340,36	27,2	1,9116 y
	5423,15	72,2	
Ra²²⁴ *	5448,6	5,06	3,66 d
	5685,37	94,92	
Rn²²⁰ *	6288,08	99,88	55,6 s
Po²¹⁶ *	6778,3	99,99	0,145 s
Bi²¹² *	6050,78	69,91	60,55 m
	6089,88	27,12	
	6300,0	38,8	
	6340,0	52,2	
Po²¹² *	8784,37	100,0	0,299 μs
U²³⁸ **	4038,0	0,078	4,468E9 y
	4151,0	20,9	
	4198,0	79,0	
U²³⁴ **	4722,4	28,42	2,455E5 y
	4774,6	71,38	
Th²³⁰ **	4620,5	23,4	7,538E4 y
	4687,0	76,3	

Trazador	E (keV)	Intensidad	T ½
U²³²	5139,0	0,30	68,9 y
	5263,36	31,55	
	5320,12	68,15	
Th²²⁹	4814,6	9,3	7340 y
	4838,0	5,0	
	4845,3	56,2	
	4901,0	10,2	
	4967,5	5,97	
	4978,5	3,17	
	5053,0	6,6	

Tabla III.4: Isótopos Radiactivos relevantes. (LBNL Isotopes Project. Lunds University).

(* Pertenecientes a la familia del Th^{232} , ** Pertenecientes a la familia del U^{238}) [7].

A continuación se presenta el espectro, obtenido en el sistema de espectrometría alfa detallado anteriormente, de las emisiones alfa de una fuente de torio (preparada por el procedimiento radioquímico que detallaremos más adelante), en el que se aprecian todos los emisores alfa correspondientes a la desintegración del isótopo de torio Th^{232} . Se pueden observar también las emisiones alfa del trazador interno (Th^{229}) utilizado para calcular el rendimiento del proceso de separación, que resulta ser el más adecuado ya que sus líneas de emisión no interfieren con las de los isótopos de interés. Se observa la presencia del Th^{230} de la familia del U^{238} que ha sido seleccionado en todos los procesos de separación radioquímica del torio junto con el Th^{232} debido a la presencia de uranio en el mineral de partida (monacita).

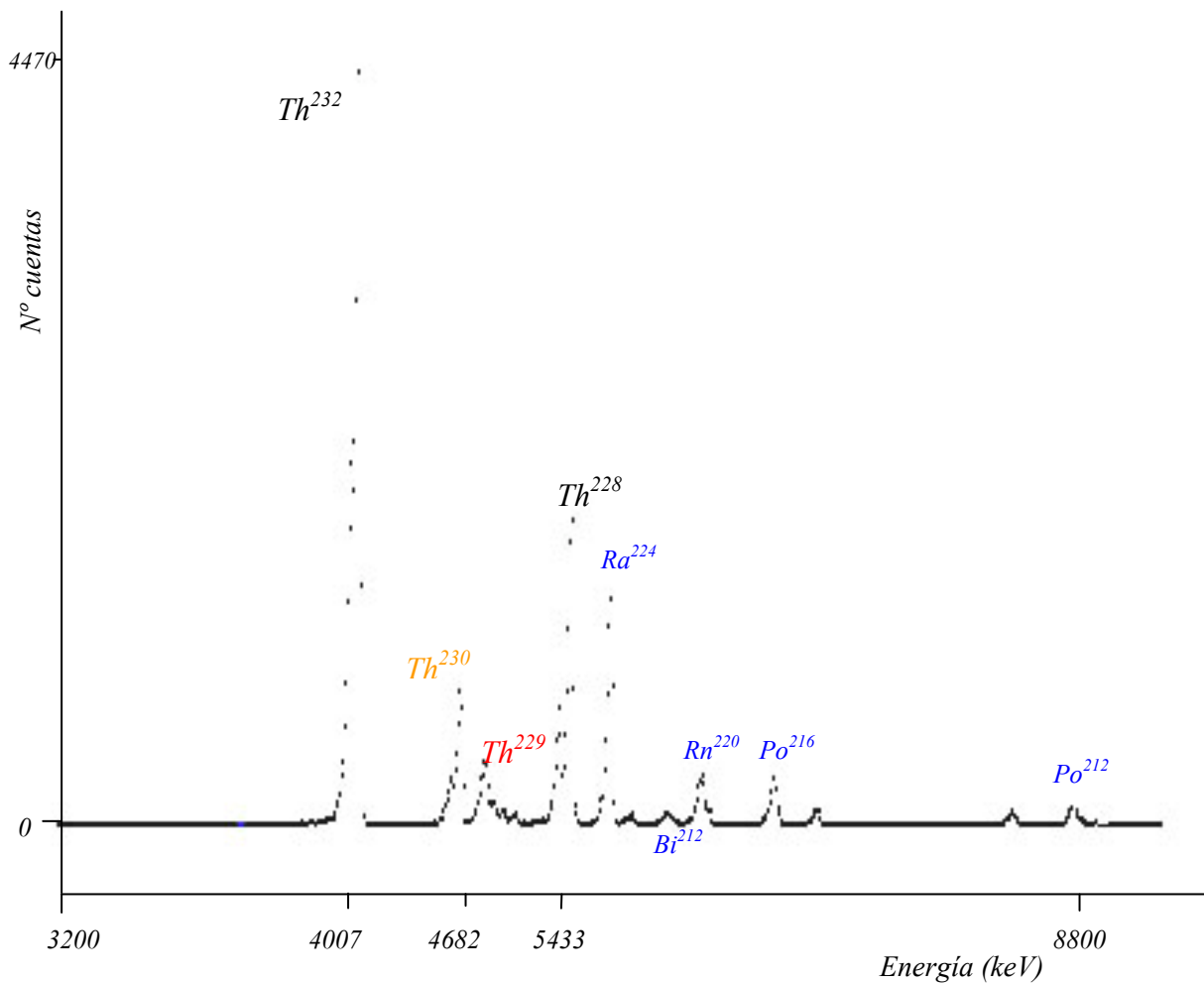


Figura III.10: Espectro típico de emisiones alfa del torio

Al igual que en espectroscopia gamma con detectores de germanio, en espectrometría alfa también existe una correspondencia lineal entre la altura del impulso de la señal y la energía de la partícula que la ha producido. El proceso por el cual se establece esa relación se denomina “*calibración en energías*”, es la determinación de los parámetros a y b en la ecuación:

$$\text{Energía} = a * \text{número de canal} + b$$

Para realizar la calibración en energías se utilizan fuentes radiactivas de composición conocida y características similares a la fuente problema, se procede a identificar dos o tres líneas de energía conocida y se determina la correspondiente recta de calibración. El resultado final de la medida será un espectro en función de su energía y que tras su posterior análisis reflejará las características esenciales de la fuente radiactiva analizada. Las calibraciones se realizan con una muestra radiactiva sólida de U^{233} , $Pu^{239+240}$, Am^{241} más Cm^{244} certificada por el Laboratorio de Patrones Nacionales para Radiaciones Ionizantes (LMRI) del CIEMAT. La muestra patrón contiene los radionucleidos con las siguientes actividades.

RADIONUCLEIDO	CONCENTRACION DE ACTIVIDAD
U^{233}	$21,0 \pm 0,6$
$Pu^{239+240}$	$19,7 \pm 0,5$
Am^{241}	$20,6 \pm 0,5$
Cm^{244}	$16,9 \pm 0,4$

*Tabla III.5: Actividad (Bq) de los radionucleidos del patrón
(Incertidumbre con factor $k=1$).*

El parámetro esencial que caracteriza un espectro es la resolución [13], que se define como la anchura de una línea α a la mitad de su altura FWHM (Full Width at Half Maximum), se expresa en unidades de energía y mide la capacidad del detector de diferenciar entre dos radiaciones próximas en energía.

Las rectas de calibración en energía y sus correspondientes valores de FWHM en los dos detectores del sistema de espectrometría alfa, aparecen en las siguientes gráficas:

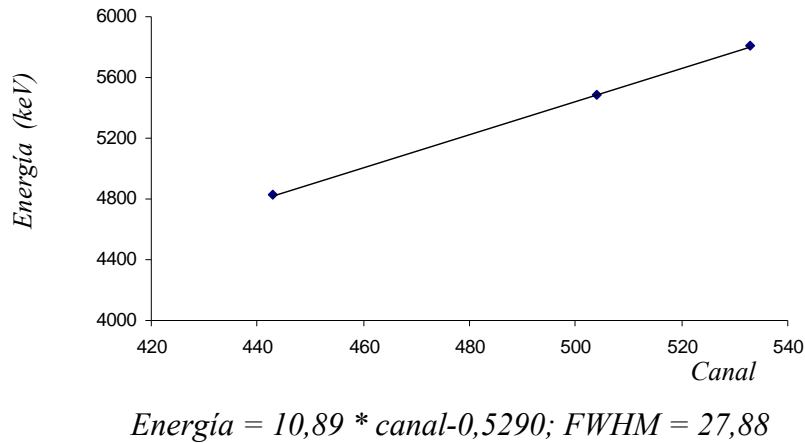


Figura III.11: Recta de calibración en energía del detector 1.

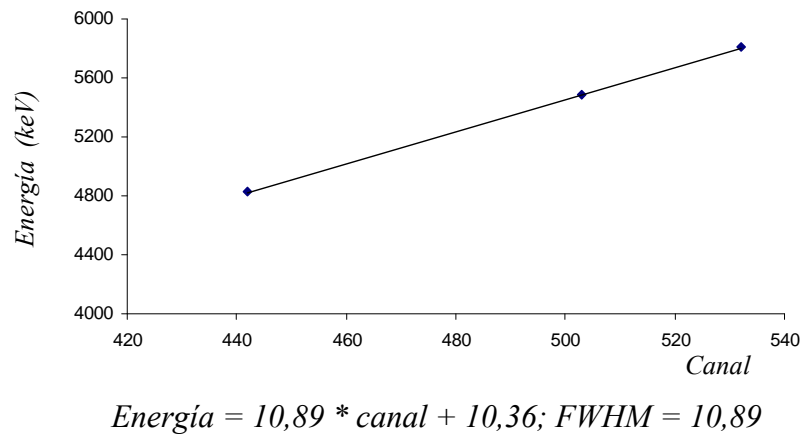


Figura III.12: Recta de calibración en energía del detector 2.

Una vez identificado el radionucleido en el espectro de emisiones alfa y reconocido el canal del máximo del pico, se introduce su valor en dicha ecuación y se determina su energía de emisión. El cálculo de la actividad se realizará a partir de la integral del pico y teniendo en cuenta el fondo. En los detectores utilizados este fondo es de 0,05 cuentas/cm².h aproximadamente.

III.4.- PARAMETROS DEL ANALISIS POR ESPECTROMETRIA ALFA.

Para evaluar y caracterizar las distintas separaciones radioquímicas necesitaremos conocer los parámetros descritos a continuación.

III.4.1. Actividad

La concentración de actividad [21] o actividad por unidad de masa o volumen A, se calcula como el cociente entre el área neta del pico de interés y los siguientes factores:

$$A = \frac{C}{IRt\epsilon M} \quad (\text{Ec.III.17})$$

Donde,

C: Número de cuentas neto, se calcula como el área del pico en el espectro medido menos el área de ese mismo pico en el espectro de fondo (se supone medido el mismo tiempo que el anterior).

I: Intensidad de la emisión alfa en tanto por uno

R: Rendimiento químico del proceso analítico

t: Tiempo de medida en segundos

ϵ : Eficiencia de contaje del equipo en tanto por uno

M: Masa de la muestra

La determinación de trazas de un radionucleido en muestras de baja actividad por medio de un procedimiento analítico, que precisa de sucesivas etapas de separación produce necesariamente pérdidas del radionucleido en estudio, por lo que es aconsejable añadir una cantidad muy bien determinada de un trazador o patrón interno antes de analizar la muestra.

Se han utilizado Th^{229} y U^{232} como trazadores internos, añadidos individual o conjuntamente, según que la determinación de estos radionucleidos se realice individualmente o de forma secuencial a lo largo del mismo procedimiento analítico.

La actividad del trazador medida después de la realización del análisis, con un tiempo de contaje de la muestra (t_m) y del fondo (t_f) siendo ($t_m = t_f = t$) viene dada por la expresión:

$$A_t = \frac{C_t}{I_t R t \epsilon M} \quad (\text{Ec. III.18})$$

Donde,

C_t : Número de cuentas neto, se calcula como el área del pico en el espectro medido menos el área de ese mismo pico en el espectro de fondo.

I_t : Intensidad de la emisión alfa del trazador en tanto por uno.

R : Rendimiento químico del proceso analítico.

t : Tiempo de contaje de la muestra y del fondo (segundos).

ϵ : Eficiencia de contaje del equipo en tanto por uno.

M : Masa de la muestra.

En general, las medidas de radiactividad deben referirse a un tiempo determinado o tiempo de referencia. Por lo tanto, los valores obtenidos en el análisis en un tiempo t_m deberán corregirse por decaimiento para referirlos a un tiempo t_0 , generalmente anterior, mediante la expresión:

$$A(t_0) = A(t_m) e^{\frac{-\ln 2 \cdot \Delta t}{T_{1/2}}} \quad \text{donde } \Delta t = t_m - t_0 \quad (\text{Ec. III.19})$$

Para el cálculo de actividad del isótopo problema y puesto que se añaden trazadores internos al inicio del procedimiento, es suficiente con conocer la relación de las áreas de los isótopos con respecto al área del trazador y por tanto a partir de las ecuaciones III.17 y III.18 se obtiene la siguiente ecuación.

$$A = \frac{C_t}{C_i I} A_i \quad (\text{Ec. III.20})$$

Donde C y C_t son el área del isótopo de interés y del trazador añadido respectivamente, una vez descontadas las cuentas correspondientes al fondo en esos picos, I e I_t las

intensidades correspondientes y donde A_{ti} es la actividad inicial de trazador añadido al inicio del procedimiento radioquímico en Bequerelios.

III.4.2. Rendimiento químico

El rendimiento químico del proceso analítico se calcula como la proporción entre la actividad del trazador encontrada y la actividad añadida al inicio del análisis

$$R = \frac{A_t}{A_{ti}} \quad (\text{Ec.III.21})$$

Donde,

A_t : Actividad del trazador medida (Bq)

A_{ti} : Actividad del trazador añadida al inicio del análisis (Bq)

III.4.3. Incertidumbre

La incertidumbre de la medida [21] se calcula teniendo en cuenta las diversas componentes que la constituyan (Ec.III.20). Las posibles fuentes de incertidumbre son las siguientes:

$u(C)$, incertidumbre del área del isótopo problema

$u(C_t)$, incertidumbre del área del trazador

$u(I)$, incertidumbre de la probabilidad de emisión del isótopo problema

$u(I_t)$, incertidumbre de la probabilidad de emisión del trazador

$u(A_t)$, incertidumbre de la actividad del trazador.

La expresión de la incertidumbre según la Guía para la evaluación de incertidumbres [21], viene definida por la siguiente ecuación.

$$u^2(A) = \left(\frac{\partial A}{\partial C}\right)^2 u^2(C) + \left(\frac{\partial A}{\partial C_t}\right)^2 u^2(C_t) + \left(\frac{\partial A}{\partial I_t}\right)^2 u^2(I_t) + \left(\frac{\partial A}{\partial I}\right)^2 u^2(I) + \left(\frac{\partial A}{\partial A_t}\right)^2 u^2(A_t)$$

(Ec.III.22)

Si calculamos las correspondientes derivadas, queda la siguiente expresión,

$$u^2(A) = \left(\frac{I_t A_t}{C_t I}\right)^2 u^2(C) + \left(-\frac{C I_t A_t}{C_t^2 I}\right)^2 u^2(C_t) + \left(\frac{C A_t}{C_t I}\right)^2 u^2(I) + \left(-\frac{C I_t A_t}{I^2 C_t}\right)^2 u^2(I) + \left(\frac{C I_t}{C_t I}\right)^2 u^2(A_t)$$

(Ec. III.23)

De donde,

$$\frac{u^2(A)}{A^2} = \frac{u^2(C)}{C^2} + \frac{u^2(I)}{I^2} + \frac{u^2(A_t)}{A_t^2} + \frac{u^2(I)}{I_t^2} + \frac{u^2(C_t)}{C_t^2}$$

(Ec. III.24)

La incertidumbre de las probabilidades de emisión $\frac{u^2(I)}{I^2}$ y $\frac{u^2(I_t)}{I_t^2}$ vienen facilitadas, junto con los valores de emisión de energía, en las tablas correspondientes (en este caso se han utilizado las de la Universidad de *Lund*) y si el área del pico considerado es una suma de cuentas de canales del espectro y se supone estadística de Poisson, se verifica que $u^2(C) = C$ y del mismo modo $u^2(C_t) = C_t$, con lo que la ecuación III.24 queda,

$$\frac{u^2(A)}{A^2} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_t} + \frac{u^2(I)}{I^2} + \frac{u^2(I_t)}{I_t^2} + \frac{u^2(A_t)}{A_t^2}$$

(Ec. III.25)

La actividad del trazador A_t , es la actividad específica del trazador, a_t , por el volumen de trazador añadido $A_t = V_t a_t$ y se verifica que $u^2(A_t) = (a_t^2) u^2(V_t) + (V_t^2) u^2(a_t)$ o bien puede escribirse como

$$\frac{u^2(A_t)}{A_t^2} = \frac{u^2(V_t)}{V_t^2} + \frac{u^2(a_t)}{a_t^2} \quad (\text{Ec. III.26})$$

La ecuación III.24, teniendo en cuenta esta última expresión de incertidumbre en la actividad del trazador (Ec.III.24) queda como,

$$u(A) = A \sqrt{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_t} + \frac{u^2(I)}{I^2} + \frac{u^2(I_t)}{I_t^2} + \frac{u^2(V_t)}{V_t^2} + \frac{u^2(a_t)}{a_t^2}}$$

(Ec.III.27)

Una componente adicional de esta expresión anterior puede ser la incertidumbre sobre la corrección por decaimiento (ver Ec. III.19). Si las medidas se refieren a un tiempo determinado t_0 , y el análisis ha tenido lugar en un tiempo t_m , cuando $\Delta t = t_m - t_0$ es pequeño respecto del periodo de semidesintegración $T_{1/2}$, la incertidumbre sobre esta corrección puede despreciarse en general, sin embargo, cuando este intervalo Δt es relativamente importante y la incertidumbre $u(T_{1/2})$ lo aconseje, deberá considerarse la contribución debida a este efecto. Su cálculo a partir de la expresión III.18 lleva a:

$$u(A(t_m)) = \sqrt{e^{\frac{\Delta t \ln 2}{T_{1/2}}} \left[u_{A_0}^2 + \frac{(\Delta t A_0 \ln 2)^2}{T_{1/2}^4} u_{T_{1/2}}^2 \right]} \quad (\text{Ec.III.28})$$

De la misma forma que en el apartado III.2.2 del Capítulo III se define la incertidumbre expandida a partir de la incertidumbre combinada dada por la expresión Ec. III.27, y que para un factor de cobertura $k=2$, bastaría con multiplicar dicha expresión por un factor 2.

III.4.4. Umbral de Decisión

El Umbral de Decisión [25], también conocido como Límite Crítico (L_c), es un número de cuentas, determinado a priori, que permite decidir, con una determinada probabilidad, si el resultado de una medida concreta es asignable al fondo o a una actividad real. Como ya definimos para la espectrometría gamma, L_c viene dado por la siguiente expresión (Ec.III.12.), en la que k_α es el factor de cobertura y x_0 es el número de cuentas de fondo en la zona del pico considerado.

$$L_C = k_\alpha (2x_0)^{1/2} \quad (\text{Ec.III.12})$$

III.4.5. Actividad Mínima Detectable (AMD)

La Actividad Mínima Detectable de un radionucleido es la correspondiente al límite de detección L_d , para un fondo determinado, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_d = L_c + k_\beta \sigma_D \quad (\text{Ec.III.13})$$

Normalmente se toma un único valor para el factor de cobertura para errores tipo I y II y se denota por k . Si lo expresamos en términos de actividad, la ecuación para el cálculo de AMD en medidas de espectrometría alfa se expresa como,

$$AMD = \frac{L_d}{\varepsilon tIRM} = \frac{k^2 + 2L_c}{\varepsilon tIRM} \quad (\text{Ec.III.29})$$

Siendo,

k : Factor de cobertura

L_c : Umbral de Decisión.

ε : Eficiencia de contaje del equipo en tanto por uno

t : Tiempo de realización de la medida (el mismo tiempo que para medida del fondo)

I : Intensidad de emisión del isótopo considerado

R : Rendimiento químico expresado en tanto por uno del procedimiento de separación radioquímica del isótopo problema.

M : Masa de la muestra.

Al sustituir el valor de L_c dado por la expresión III.12. se obtiene la siguiente ecuación para AMD en función de las cuentas de fondo en la zona de interés del isótopo considerado.

$$AMD = \frac{k^2 + 2 \left[k(2x_0)^{1/2} \right]}{\varepsilon tIRM} \quad (\text{Ec.III.29})$$

En función de las cuentas del fondo x_0 y del factor de cobertura $k = 1$ ó 2 , se calcula la AMD.

$$AMD = \frac{1 + 2,83x_0^{1/2}}{\varepsilon tIRM} \quad \text{con un factor } k=1 \quad (\text{Ec.III.30})$$

$$AMD = \frac{4 + 5,65x_0^{1/2}}{\varepsilon tIRM} \quad \text{con un factor } k=2 \quad (\text{Ec.III.31})$$

III.4.6. Parámetros variables del sistema

Los parámetros variables del sistema son:

La ganancia de amplificación, que es el valor en que se ven aumentados los pulsos que entran en el amplificador, se ajustó a un valor de 4,95 y se distribuyó el intervalo de energía en 1.024 canales. La tensión suministrada a cada detector fue de 40 voltios y la presión de vacío en las cámaras donde se alojan los detectores se mantuvo a 0,1-0,3 mm. Hg.

La distancia entre la fuente y el detector se elige llegando a un compromiso entre resolución y eficiencia, teniendo en cuenta que el FWHM mejora al aumentar la distancia, pero que se produce una disminución de la eficiencia con dicho aumento. En este estudio la mayoría de las muestras se midieron a una distancia del detector de 13 mm., debido a sus actividades y sobre todo para evitar posibles contaminaciones con núcleos de retroceso.

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTOS DE SEPARACION RADIOQUIMICA

A diferencia de otros tipos de radiaciones que requieren para su detección un tratamiento mínimo de la muestra, la detección de partículas alfa con detectores de semiconductor implica la preparación minuciosa de las fuentes radiactivas que han de ser de espesor fino y homogéneas. Es necesario aislar de la muestra una cantidad suficiente de los radionucleidos a determinar de forma que las impurezas que estén presentes, lo sean en cantidades que no interfieran en la preparación de las fuentes. A veces se deben separar también los radionucleidos por elementos, para evitar interferencias espectrales de nucleidos que emiten partículas alfa próximas en energía. Todo esto implica un trabajo de laboratorio minucioso y de varios días.

Las etapas básicas del procedimiento radioquímico son: preparación de la muestra, preconcentración, separación química y preparación de las fuentes. En este apartado se exponen los diversos procedimientos que se han llevado a cabo en la separación radioquímica de los distintos isótopos, con diversas variaciones según el tipo de muestra sometida a análisis.

IV.1. PROCEDIMIENTO DE SEPARACION RADIOQUIMICA DE TORIO EN MUESTRAS SÓLIDAS DE ELECTRODOS. METODO DE COPRECIPITACION CON HIDROXIDO DE HIERRO.

Este procedimiento se realizó en los electrodos de wolframio aleados con el 2% de óxido de torio según el método descrito por T. Gäfvert [42]. El paso inicial de digestión en disolución ácida [43] consiste en llevar la muestra a disolución completa, reteniendo en solución todos los analitos de interés y sin añadir iones que interfieran en la determinación. En una segunda etapa, se lleva a cabo una coprecipitación con hidróxido férrico [44] para aislar el torio de los demás componentes del electrodo, mayoritariamente tungsteno. Dicho elemento debido a su baja reactividad va a suponer un gran inconveniente en la digestión de la varilla.

El rendimiento del procedimiento radioquímico se determinó por medio de la adición al inicio del proceso radioquímico de un trazador [31], en este caso del radioisótopo artificial Th^{229} [45] y con una actividad conocida de 0,26 Bq/ml.

Digestión ácida de la muestra

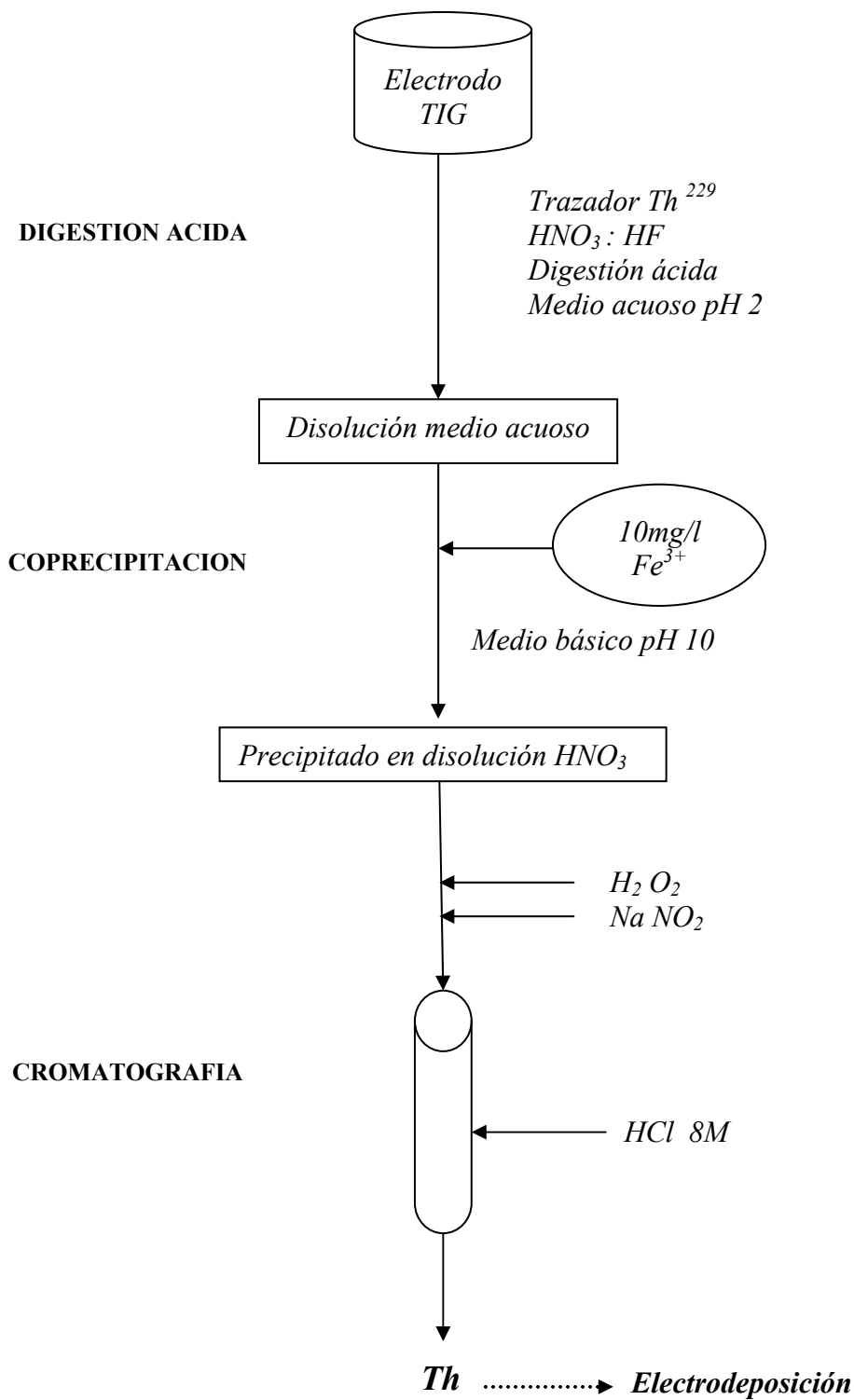
Los pasos para realizar la digestión del electrodo son:

Se digiere 0,1 gr de varilla con una mezcla [42] de HNO_3 y HF en proporción de 10:2, a continuación se evapora la disolución para posteriormente acondicionarla en medio acuoso a pH 2 y adicionar a continuación cloruro férrico FeCl_3 . Se ajusta el valor de pH a 10 con amoníaco para aislar el torio por coprecipitación [44] con hidróxido de hierro en una concentración de 10mg/L de Fe^{3+} según el método descrito por J.C. Lozano [46,47,48]. El precipitado se seca y se acondiciona en unos 50 ml de HNO_3 de concentración 8M. Se añade 1 ml de agua oxigenada H_2O_2 y 0,15 gr de nitrito sódico NaNO_2 , así se asegura que el estado de oxidación del torio sea el adecuado (+4) antes de la separación del elemento mediante cromatografía en una resina de intercambio iónico [44].

Purificación del torio por cromatografía de intercambio iónico

Aproximadamente unos 200ml de esta disolución se hacen pasar a través de una resina de intercambio iónico [49] BioRad AG1-X8 100-200 Mesh [50] en forma cloruro y acondicionada previamente en medio HNO_3 de concentración 8 M. La columna tiene un diámetro interno de 15 mm. y se rellena con 8 cm³ de resina. El torio se extrae de la columna con 80 ml de ácido clorhídrico HCl de concentración 8 M. Se evapora esta disolución y se pone en medio nítrico. A continuación se prepara la fuente por electrodeposición tal y como se detalla en el Capítulo V.

Las etapas del procedimiento de separación de torio de las varillas TIG por coprecipitación aparecen esquematizadas en el siguiente diagrama.



Procedimiento de separación radioquímica de torio de electrodos TIG. Método de coprecipitación con hidróxido de hierro.

IV.2. PROCEDIMIENTO DE SEPARACION RADIOQUÍMICA SECUENCIAL DE TORIO Y URANIO.

El uranio, que puede acompañar al torio en el mineral de partida, se puede aislar a la vez que el torio en un mismo procedimiento de forma secuencial basado en el método desarrollado por Holm y Fukai [44] con extracción orgánica con disolvente Tributilfosfato (TBP) [49,51]. El rendimiento del procedimiento radioquímico se determinó en este caso por medio de la adición [31], al inicio de la digestión, de dos radioisótopos artificiales Th^{229} y U^{232} con una actividad de 0,26 Bq/ml y 0,16 Bq/ml respectivamente.

Las etapas de este proceso de determinación de torio y uranio aplicado a nuestro material de partida son las siguientes.

Digestión ácida de la muestra

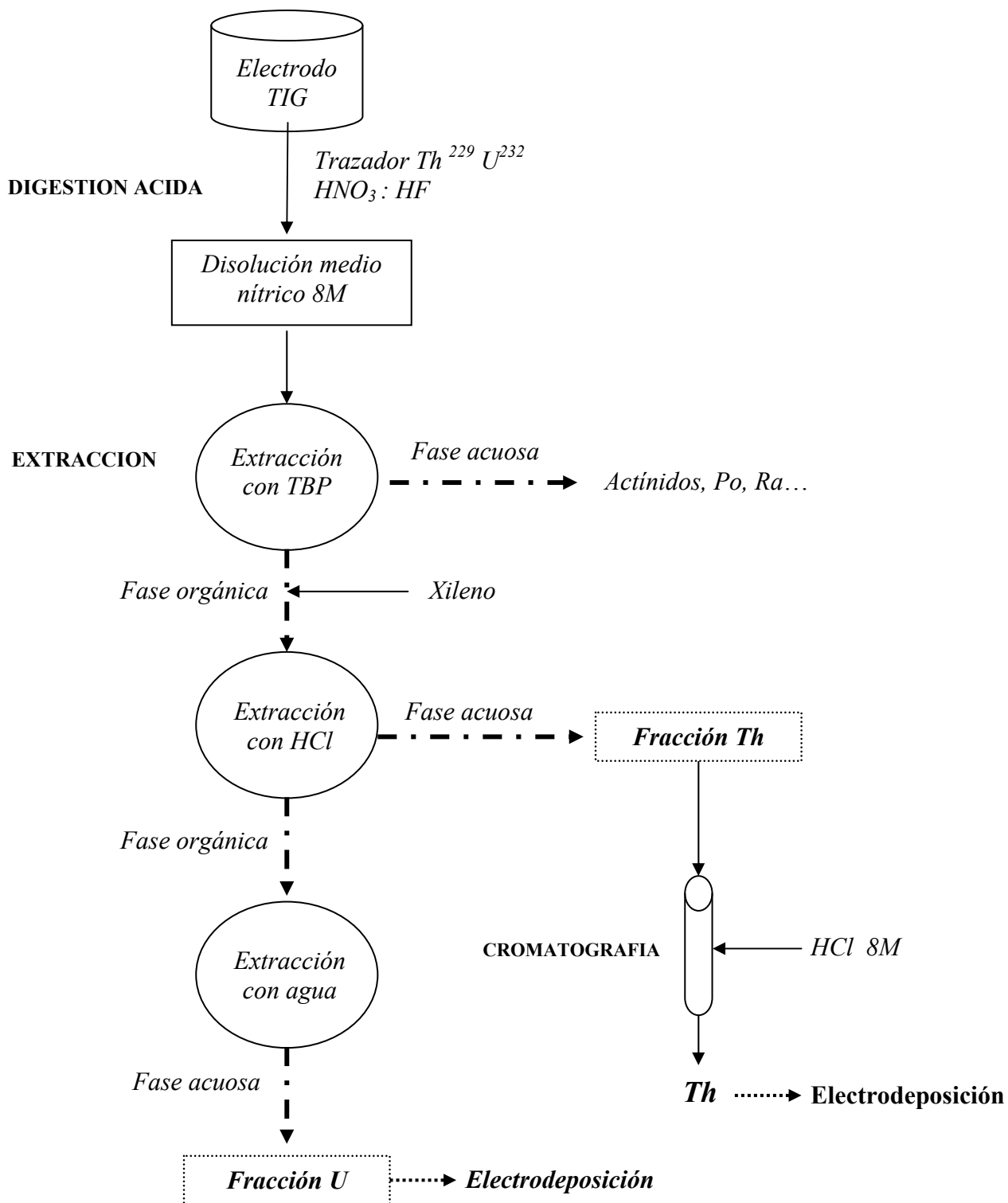
Se digiere 0,1 gr de varilla aproximadamente, con una mezcla [42] de HNO_3 y HF en proporción de 10:2, a continuación se evapora la disolución y se acondiciona en medio HNO_3 8M, en un volumen aproximado de unos 50ml.

Purificación de uranio y torio mediante extracción orgánica

La disolución se extrae con 25 ml de TBP en un embudo de decantación, se repite dos veces el proceso con 50 ml de ácido nítrico para asegurar la completa separación. En la fase acuosa quedan otros elementos como el polonio y el radio. Se aísla a continuación el torio en la fase acuosa de la extracción con 100 ml de xileno, añadiendo 75 ml de HCl 1,5 M, de la misma manera se repite la extracción con tres volúmenes de ácido. La fracción acuosa que contiene el torio, con posibles trazas de otros actínidos, se evapora y se prepara en medio nítrico 8M para someterla a una etapa de purificación con resinas de intercambio iónico semejante a la descrita en el primer procedimiento.

El uranio que permanece en la fase orgánica se somete a una tercera extracción con agua bidestilada, se extrae tres veces con unos 75 ml cada vez. En la fase acuosa queda

retenido el uranio, dicha disolución se evapora y se procede a la preparación de la fuente de uranio según se describe en el Capítulo V. Podemos resumir las etapas en el siguiente diagrama.



Procedimiento separación radioquímica secuencial de uranio y torio.

IV.3. PROCEDIMIENTO DE SEPARACION RADIOQUIMICA DE TORIO EN MUESTRAS DE AEROSOLES EN FILTROS

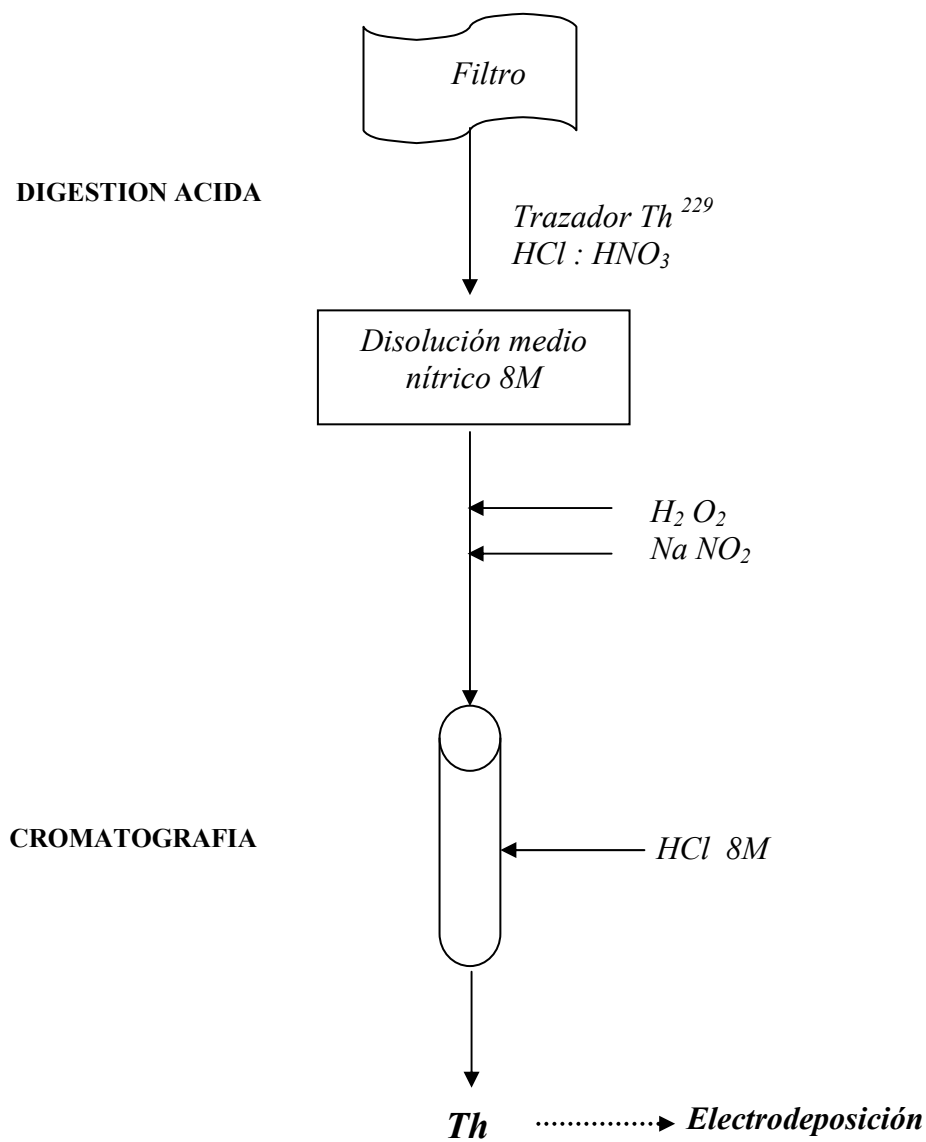
El material de partida en este caso son filtros y etiquetas adhesivas del muestreo de aerosoles y partículas durante el proceso de soldadura. El método utilizado será básicamente el descrito por T. Gäfvert [42] para el tratamiento de filtros con la introducción de ciertas variaciones que mejorarán el rendimiento químico. Dicho rendimiento se calcula mediante la adición de trazador Th^{229} al inicio del procedimiento.

Digestión ácida de la muestra

Se digiere el filtro con una disolución de HCl y HNO_3 (agua regia) en proporción de 3:1 durante 8 horas aproximadamente con calentamiento suave, a continuación se evapora la disolución y se acondiciona en medio HNO_3 8M, en un volumen aproximado de unos 50ml. Se añade 1 ml de agua oxigenada H_2O_2 y 0,15 gr de nitrito sódico NaNO_2 , la muestra está preparada para la etapa de purificación del torio.

Purificación del torio por cromatografía de intercambio iónico

Esta disolución se hace pasar a través de una resina de intercambio iónico (BioRad AG1-X8 100-200 Mesh) y que se acondiciona en medio HNO_3 en concentración 8 M, aproximadamente con unos 200ml. La columna tiene un diámetro interno de 15 mm y se rellena con 8 cm^3 de resina. El torio se extrae de la columna con 80 ml de ácido clorhídrico HCl de concentración 8 M. Se evapora esta disolución y se pone en medio nítrico. A continuación se prepara la fuente por electrodeposición tal y como se detalla en el Capítulo V.



Procedimiento de separación radioquímica de torio en filtros.

CAPITULO V

PREPARACION DE FUENTES RADIATIVAS PARA ESPECTROMETRIA ALFA. ELECTRODEPOSICION.

Para la determinación cualitativa y cuantitativa de los radionucleidos emisores alfa, los picos del espectro deben tener una buena resolución y estar suficientemente separados. Para ello, el depósito del elemento sobre un soporte adecuado debe tener muy poca masa, ser muy fino y homogéneo. El conjunto del soporte con el elemento depositado es lo que se denomina fuente radiactiva.

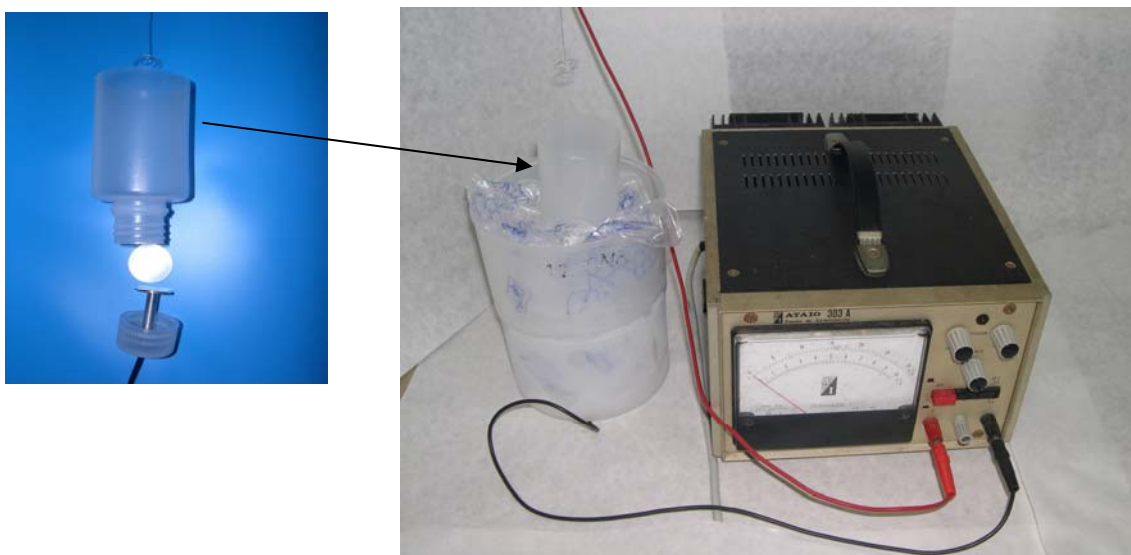
Cuando se realiza la medida de una fuente radiactiva hay que tener en cuenta dos fenómenos: la retrodispersión y la autoabsorción. La retrodispersión depende de las características del soporte, mientras que la autoabsorción está relacionada con las características del depósito, y ambos fenómenos dependen de la energía de las partículas alfa emitidas. Las características del depósito obtenido, homogeneidad y espesor, van a depender de la composición de la disolución que contiene el radionucleido y de la técnica elegida para realizar la preparación de la fuente.

La autoabsorción se produce cuando la partícula alfa emitida se absorbe en la propia fuente; este efecto da lugar a que el sistema de medida detecte menor actividad que la que realmente existe en la muestra.

La retrodispersión consiste en que algunas partículas alfa, al incidir sobre el soporte de la fuente, cambian de dirección, penetrando en el volumen sensible del detector lo que hace que el número de partículas detectadas sea superior al que cabría esperar para el correspondiente ángulo sólido. Estas partículas retrodispersadas habrán perdido parte de su energía antes de llegar al detector, con lo que el espectro obtenido, al igual que en el caso de la autoabsorción, habrá perdido calidad y resolución.

Para evitar ambos efectos debe disponerse de fuentes de la máxima homogeneidad y pulido. Para la preparación de estas fuentes a partir de disoluciones que no son puras y de baja actividad, como las que se suelen obtener en muestras ambientales, las técnicas más adecuadas son: evaporación sobre el soporte, autoelectrolisis, coprecipitación y electrodeposición. Es este último método el que se utiliza en este trabajo porque permite obtener fuentes homogéneas, con buena resolución y rendimiento altos.

La electrodeposición [52] consiste en la electrolisis de una disolución que contiene el radionucleido, se realiza en una célula, que consta de una pieza inferior donde se aloja el soporte de la fuente, un disco de acero inoxidable de 2,5 cm. de diámetro y la parte superior que contiene la disolución electrolítica (sulfato amónico de pH 2,2-2,3). En nuestro caso la célula es un frasco de polipropileno de 125ml al que se le ha quitado la base y se utiliza de forma invertida, de esta manera sirve como contenedor de la disolución. En el tapón se practica un orificio para el paso del cable del cátodo y dentro se deposita el disco del cátodo. El ánodo, que se introduce por la parte superior, es un hilo de platino. Un baño de hielo evita la evaporación de la disolución, quedando protegido el montaje con papel mylar. El sistema descrito puede verse en las fotografías siguientes.



Montaje de laboratorio para la preparación de la fuente con detalle de la celda de electrodeposición.

El método seguido en la electrodeposición está basado con algunas variaciones, en el método de Hallstadius [53], que es una modificación del desarrollado por Talvitie [54,55] y con algunas de las condiciones descritas por R. García-Tenorio [56].

Este método de electrodeposición se lleva a cabo según las siguientes etapas:

- Desengrasar la plancheta de acero inoxidable con alcohol y agua destilada. Pesar y depositar en la célula electrolítica.
- La disolución procedente de la separación radioquímica se evapora a unos pocos mililitros y se añade 1 ml de sulfato sódico, Na_2SO_4 0,3M que previene la adsorción de los actínidos sobre las paredes de la célula electrolítica. Esta cantidad de sulfato es la cantidad óptima según el trabajo realizado por F. Vera Tomé [57]. Se evapora a sequedad y se comprueba que se elimina por completo el ácido.
- Se añaden 500 μL de ácido sulfúrico concentrado al 96%, H_2SO_4 y 10 ml de agua desionizada.
- Se adicionan 2 gotas de indicador azul de timol al 0,04%.
- Se añaden varias gotas de amoniaco concentrado hasta el viraje del indicador al color salmón-naranja que indica un pH de 2,2-2,3.
- Se pasa la disolución a la célula electrolítica y se lava el vaso, con 10 ml de H_2SO_4 al 1% y a un pH de 2,2-2,3, en dos o tres fracciones para recuperar lo que pudiera haber quedado en el vaso.
- Se realiza la electrolisis durante 1 hora para electrodeposición del uranio [58,59] y de aproximadamente 2 horas para el torio [49]. Los rendimientos obtenidos con estos tiempos de electrodeposición son del 80-100%.

- Se añade 1ml de amoniaco concentrado al 25% un minuto antes de retirar el ánodo y cortar la corriente.
- Se lava la fuente con amoniaco al 1% y se deja secar.
- Las muestras electrodepositadas se protegen con una película de polímero de cloruro y acetato de vinilo siguiendo el trabajo de M.Herranz [41] con un espesor de $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ para evitar la contaminación del detector con núcleos de retroceso de Th^{228} .

Las condiciones durante el proceso de electrodeposición que se han mantenido durante las diversas preparaciones de las distintas fuentes han sido:

Distancia entre electrodos: 0,5 cm.

Voltaje: 10 voltios.

Intensidad: 1 amperio.

CAPITULO VI

ESTUDIO DE LOS ELECTRODOS TORIADOS

VI.1. ESTADO DE LA CADENA DE DESINTEGRACION DEL Th²³²

VI.1.1.Introducción

Los electrodos toriados se fabrican mediante procesos metalúrgicos a partir de dos materias primas minerales, volframio y óxido de torio en forma de arena. La producción de ambos componentes se realiza por métodos químicos. En particular, en el caso del óxido de torio, el proceso de separación de este elemento de la matriz en la que se encuentra, inicialmente la monacita, supone una rotura de la cadena de desintegración. Este proceso puede tener lugar más de una vez y por ello las relaciones entre los dos isótopos de torio Th²³² y Th²²⁸, presentes en la misma cadena de desintegración pueden ser muy variables dependiendo del tiempo transcurrido entre las sucesivas separaciones.

A continuación se incluye en la siguiente Figura VI.1.1 el esquema de la cadena de desintegración del Th²³² con los principales radionucleidos teniendo en cuenta los emisores alfa y beta principales [11]. Se observa que los distintos isótopos generados a partir del Th²²⁸ tienen periodos cortos y el equilibrio se alcanza con rapidez.

Hay que considerar la presencia del isótopo del radón, Rn²²⁰, que originará, si existe la posibilidad de su eliminación al medio ambiente, la ruptura del equilibrio, situación que puede deducirse si comparamos las actividades de los isótopos Th²²⁸, anterior en la desintegración al isótopo de radón considerado y la del Tl²⁰⁸ situado al final de la cadena.

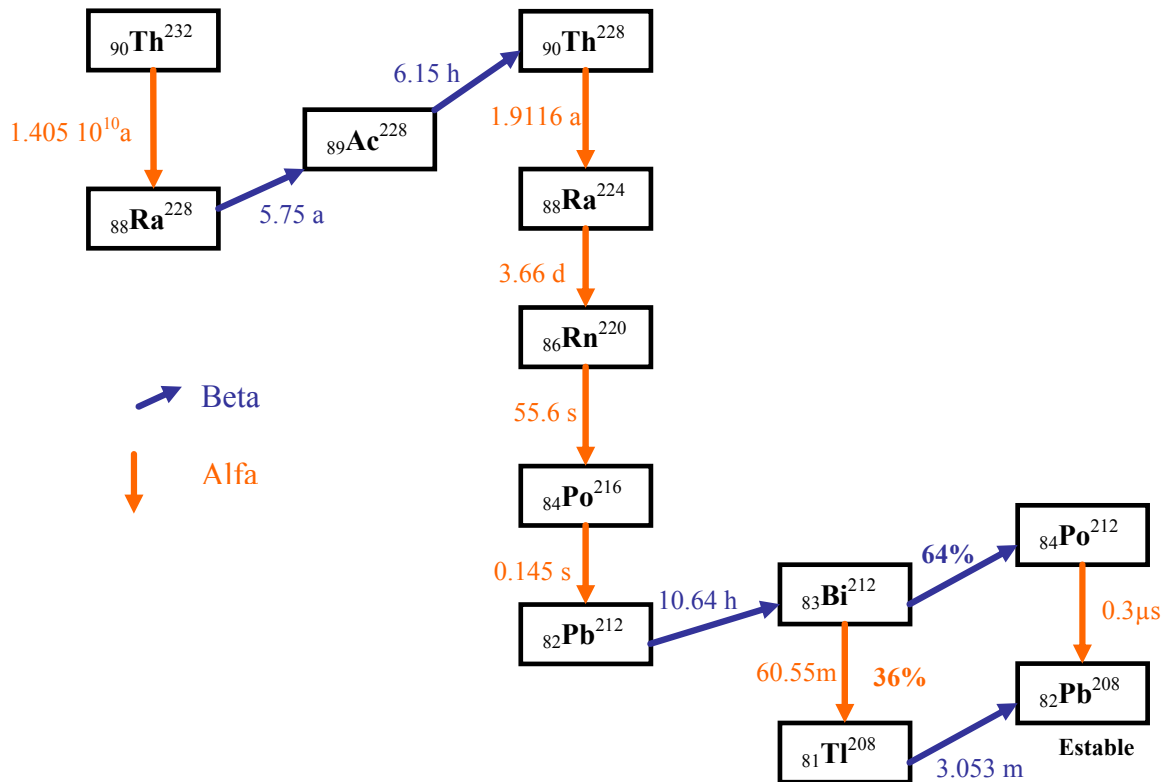


Figura VI.1.1. Cadena de desintegración radiactiva del Th^{232}

El contenido radiactivo de los electrodos y por tanto el campo de radiación en el entorno donde se almacenen o utilicen puede ser fuertemente variable y por ello es necesario cuantificar con detalle estas concentraciones de isótopos, como paso previo a la realización de un estudio de impacto radiológico del uso de este elemento en soldadura.

Para conocer el estado de la cadena de desintegración [60], se han comparado en primer lugar los resultados obtenidos mediante espectrometría alfa del Th^{232} y la actividad del Tl^{208} , obtenida mediante espectrometría gamma. En segundo lugar, del resultado del análisis gamma, se han estudiado las actividades de los isótopos Ac^{228} y Tl^{208} . Por último se comprueba el estado de la cadena radiactiva comprendida entre el Th^{232} y el Th^{228} , mediante análisis por espectrometría alfa. Se han analizado por espectrometría gamma y alfa seis electrodos toriados.

VI.1.2. Planteamiento teórico I

Se supone que un núcleo denotado por N_1 genera otro núcleo N_2 , éste a su vez genera otro N_3 etc., sin ramificación, es decir sin que un núcleo pueda desintegrarse unas veces mediante desintegración alfa y otras mediante desintegración beta, como ocurre en la cadena radiactiva del Th²³² hasta alcanzar el Bi²¹².

Designamos por N_i al número de núcleos del isótopo i y por λ_i a la constante de desintegración de ese mismo isótopo. La relación entre constante de desintegración y periodo es $\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2(i)}$ [61].

El sistema de ecuaciones que rige el número de núcleos presentes de cada especie en un instante dado es muy simple puesto que un núcleo cualquiera de la cadena (excepto el primero y el último) crece al ritmo del padre ($+\lambda_{i-1} N_{i-1}(t)$) y se desintegra a su propio ritmo ($-\lambda_i N_i(t)$), por tanto:

$$N_1'(t) = -\lambda_1 N_1(t)$$

$$N_2'(t) = +\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

.....

$$N_i'(t) = +\lambda_{i-1} N_{i-1}(t) - \lambda_i N_i(t)$$

.....

$$N_u'(t) = -\lambda_{u-1} N_{u-1}(t)$$

Donde u indica el último isótopo de la cadena, isótopo estable que por tanto sólo crece. La solución al sistema de ecuaciones, si se supone que en el instante $t=0$ sólo existe el isótopo de tipo 1 y éste ha generado todos los demás, es la siguiente:

$$N_1(t) = N(0)e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = N(0)\lambda_1 \left[\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \right]$$

$$N_i(t) = N(0)\lambda_1\lambda_2\dots\lambda_{i-1} \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\dots(\lambda_i - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)\dots(\lambda_i - \lambda_2)} \right. \\ \left. + \dots + \frac{e^{-\lambda_i t}}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i)\dots(\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \right]$$

$$N_u(t) = N(0) \left[(1 - e^{-\lambda_1 t}) \frac{\lambda_2 \dots \lambda_{u-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\dots(\lambda_{u-1} - \lambda_1)} + \dots \right. \\ \left. + (1 - e^{-\lambda_{u-1} t}) \frac{\lambda_1 \dots \lambda_{u-2}}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i)\dots(\lambda_{u-2} - \lambda_{u-1})} \right]$$

Si el isótopo 1 tiene un periodo mayor que todos sus descendientes, su constante de desintegración es menor que todas las demás. En tal caso las exponenciales de todos los núcleos excepto el 1 son muy pequeñas y al cabo de un tiempo suficientemente largo son prácticamente nulas, $e^{-\lambda t} \approx 0$. Todos los isótopos se desintegran al ritmo del isótopo primero.

$$N_i(t) = N(0)\lambda_1\lambda_2\dots\lambda_{i-1} \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\dots(\lambda_i - \lambda_1)} \right]$$

Hablan algunos autores de esta situación de equilibrio transitorio y la razón entre el número de núcleos del isótopo i y los del isótopo 1 es independiente del tiempo:

$$\frac{N_i(t)}{N_1(t)} = \left[\frac{\lambda_1\lambda_2\dots\lambda_{i-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)\dots(\lambda_i - \lambda_1)} \right]$$

Si, como en el caso del Th²³², todos los periodos de desintegración de los descendientes son mucho más pequeños que los de los padres (5,75 años del Ra²²⁸ frente a los $1,4 \times 10^{10}$ del Th²³²), se verifica que todas las constantes de desintegración son mucho más pequeñas que la del núcleo 1, $\lambda_i \ll \lambda_1$ y los denominadores se reducen a un sencillo producto de constantes:

$$(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1) \approx \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_i$$

En tal caso se habla de equilibrio secular o simplemente equilibrio y la razón entre el número de núcleos de una especie respecto de la especie 1 en cualquier instante, puesto que no depende del tiempo, se reduce a:

$$\frac{N_i(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_i} = \frac{T_{1/2}(i)}{T_{1/2}(1)} \quad (\text{Ec.VI.1})$$

Es decir, las actividades, siendo $A_i = N_i \lambda_i$, de todos los núcleos son las mismas $N_i \lambda_i = N_1 \lambda_1$.

En la cadena del Th^{232} existe una bifurcación importante en el isótopo Bi^{212} , que se desintegra alfa el 36% de las veces originando el Tl^{208} . La expresión anterior no es válida si no se tiene en cuenta esta ramificación. La constante de desintegración, λ , no es más que la probabilidad de desintegración y por tanto se considera suma de dos constantes una para cada rama $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ lo que implica que el periodo ya no es simple suma de los dos periodos, puesto que si $T_1 = \ln 2 / \lambda_1$ y $T_2 = \ln 2 / \lambda_2$ es claro que $1/T = 1/T_1 + 1/T_2$. La expresión del equilibrio tiene que realizarse con la constante de desintegración parcial, lo que equivale en el presente caso que para el Tl^{208} , que procede del Bi^{212} tan sólo el 36% de las veces, se verifica que,

$$N(\text{Tl}^{208})\lambda(\text{Tl}^{208}) = N(\text{Bi}^{212})0,36\lambda(\text{Bi}^{212}) \quad \text{y} \quad N(\text{Bi}^{212})\lambda(\text{Bi}^{212}) = N(\text{Th}^{232})\lambda(\text{Th}^{232})$$

$$\text{Luego} \quad N(\text{Tl}^{208})\lambda(\text{Tl}^{208}) = 0,36N(\text{Th}^{232})\lambda(\text{Th}^{232})$$

Como resultado obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{N(\text{Tl}^{208})}{N(\text{Th}^{232})} = 0,36 \frac{T_{1/2}(\text{Tl}^{208})}{T_{1/2}(\text{Th}^{232})} \quad (\text{Ec.VI.2})$$

Teniendo en cuenta los valores de los periodos de semidesintegración ($T_{1/2} (Th^{232}) = 1,405 \times 10^{10}$ años, $T_{1/2} (Tl^{208}) = 3,053$ minutos), la relación entre el número de núcleos calculada es:

$$N(Tl^{208}) = 1,4883 \times 10^{-16} N(Th^{232}) \quad (\text{Ec. VI.3})$$

También se puede calcular la relación de las actividades del Tl^{208} y del Ac^{228} con las siguientes ecuaciones:

$$N(Tl^{208})\lambda(Tl^{208}) = N(Bi^{212})0,36\lambda(Bi^{212}) \quad \text{y} \quad N(Bi^{212})\lambda(Bi^{212}) = N(Ac^{228})\lambda(Ac^{228})$$

Luego $N(Tl^{208})\lambda(Tl^{208}) = 0,36N(Ac^{228})\lambda(Ac^{228})$, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{N(Tl^{208})}{N(Ac^{228})} = 0,36 \frac{T_{1/2}(Tl^{208})}{T_{1/2}(Ac^{228})} \quad (\text{Ec. VI.4})$$

Teniendo en cuenta los valores de los periodos de semidesintegración ($T_{1/2} (Ac^{228}) = 6,15$ horas y $T_{1/2} (Tl^{208}) = 3,053$ minutos), el cociente de núcleos para el caso de equilibrio que se considera queda como:

$$\frac{N(Tl^{208})}{N(Ac^{228})} = 2,978 \times 10^{-3} \quad (\text{Ec VI.5})$$

VI.1.3. Resultados experimentales I

Es importante conocer las actividades de los distintos isótopos a lo largo de la cadena de desintegración del Th^{232} para poder valorar el estado de equilibrio de la misma. Se ha realizado el análisis de seis fragmentos de 1cm aproximadamente de electrodos toriados con el 2% en óxido de torio de dos casas comerciales y en tres diámetros, 1mm, 2,4 mm y 4 mm., que son los más utilizados en España.

Los valores de actividad del isótopo, Tl^{208} analizados por espectrometría gamma (Tabla VI.1.1.) y los valores para Th^{232} calculados por espectrometría alfa (Tabla VI.1.2), nos sirven para calcular la relación entre los núcleos de las dos especies y compararlos con el valor teórico obtenido en el desarrollo matemático anterior de $1,4883 \times 10^{-16}$ de la ecuación VI.3.

	Diámetro (mm)	Tl^{208} Bq/gr	Incertidumbre Bq/gr (k=1)	AMD Bq/gr
Marca 1	1	4,62	0,268	0,1031
	2,4	4,58	0,105	0,0355
	4	5,50	0,096	0,0332
Marca 2	1	6,51	0,025	0,0609
	2,4	6,96	0,111	0,0339
	4	6,54	0,098	0,0343

Tabla VI.1.1: Actividades de isótopo Tl^{208} analizadas por espectrometría gamma (a 583,14 keV de Energía y con un 84,23% de probabilidad de emisión)

	Diámetro (mm)	Th^{232} Bq/gr	Incertidumbre Bq/gr (k=1)	AMD Bq
Marca 1	1	78,9	0,7733	0,0033
	2,4	64,4	0,4123	0,0067
	4	60,53	0,5296	0,0352
Marca 2	1	51,4	0,5767	0,0023
	2,4	63	0,8450	0,0153
	4	62,9	0,5532	0,0327

Tabla VI.1.2: Actividades del isótopo Th^{232} analizadas por espectrometría alfa.

En la siguiente Tabla VI.1.3 aparecen las relaciones entre número de núcleos de ambos isótopos junto con el valor de la incertidumbre del cociente [24] calculada mediante la ecuación:

$$u(a/b) = a/b \sqrt{(1/a^2)u^2(a) + (1/b^2)u^2(b)} \quad (\text{Ec.VI.6})$$

Como puede observarse en la siguiente Tabla, los valores obtenidos para el cociente no coinciden con el valor teórico calculado.

	<i>Díámetro (mm)</i>	$N_{Ti}^{208}/N_{Th}^{232}$	<i>Incertidumbre (k=1)</i>
<i>Marca 1</i>	<i>1</i>	<i>0,242E-16</i>	<i>1,426E-18</i>
	<i>2,4</i>	<i>0,294E-16</i>	<i>7,023E-19</i>
	<i>4</i>	<i>0,375E-16</i>	<i>7,330E-19</i>
<i>Marca 2</i>	<i>1</i>	<i>0,523E-16</i>	<i>6,208E-19</i>
	<i>2,4</i>	<i>0,456E-16</i>	<i>9,543E-19</i>
	<i>4</i>	<i>0,429E-16</i>	<i>7,496E-19</i>

Tabla VI.1.3: Relación de núcleos de los isótopos de Tl^{208} y Th^{232} .

A continuación en una segunda parte de estos resultados experimentales I, se comparan los valores obtenidos de actividad del Ac^{228} (Tabla VI.1.4.) y del Tl^{208} (Tabla VI.1.1), que se determinan por espectrometría gamma y se calcula la relación entre los núcleos existentes para cada isótopo.

La calibración del equipo de espectrometría gamma, como ya comentamos en el Capítulo III., se realizó con tres tubos que contenían distintos volúmenes del patrón de referencia certificado.

	Diámetro (mm)	Ac^{228} Bq/gr	Incertidumbre Bq/gr	AMD Bq/gr
Marca 1	1	17,37	1,126	0,3525
	2,4	17,43	0,433	0,1023
	4	23,89	0,412	0,0919
Marca 2	1	20,66	0,998	0,2894
	2,4	21,08	0,417	0,1001
	4	28,45	0,425	0,0953

Tabla VI.1.4: Actividades de isótopo Ac^{228} analizadas por espectrometría gamma (a 911,2 keV de Energía y 25,8 % de intensidad)

Se obtiene la relación entre el número de núcleos, con los valores de actividad de estos dos isótopos y se comparan con el valor teórico $2,978 \times 10^{-3}$ (Ec.VI.5), la incertidumbre de la relación se calcula según la ecuación VI.6.

	Diámetro (mm)	$N_{\text{Tl}^{208}}/N_{\text{Ac}^{228}}$	Incertidumbre (k=1)
Marca 1	1	2,201E-03	1,916E-04
	2,4	2,174 E-03	7,362E-05
	4	1,905 E-03	4,671E-05
Marca 2	1	2,659 E-03	1,314E-04
	2,4	2,732 E-03	6,956E-05
	4	1,902 E-03	4,035E-05

Tabla VI.1.5: Relación de núcleos de los isótopos de Tl^{208} y Ac^{228} .

A la vista de estos resultados se deduce que por una parte las relaciones entre número de átomos de Tl^{208} y Th^{232} son distintos a los valores teóricos calculados en equilibrio; es decir que la cadena de desintegración del torio no está en equilibrio, no se mantienen las actividades de ambos isótopos constantes puesto que la relación de núcleos es menor que el valor esperado. Por otra parte en la segunda tabla de resultados (Tabla VI.1.5),

para los isótopos de Tl^{208} y Ac^{228} , los valores experimentales de la relación entre los núcleos de ambos, son también inferiores al valor teórico calculado de $2,978 \times 10^{-3}$.

La explicación más lógica es que el equilibrio se rompe por eliminación del radón, lo que lleva a pensar que el óxido de torio no se encuentra únicamente en el interior del electrodo sino repartido uniformemente a lo largo de toda la varilla.

Por último se estudia la parte de la cadena comprendida entre los dos torios, Th^{232} y Th^{228} , ya que la cadena se rompe a partir del Rn^{220} , como se deduce de los resultados de comparación de las actividades de isótopos al inicio y al final de la cadena radiactiva. Se corroboran estos resultados observando por microscopía electrónica de barrido (SEM) los electrodos, en los que se observan grietas y fisuras que favorecen la difusión del radón.

Se analiza a continuación el estado de la cadena de desintegración del Th^{232} en la parte inicial entre los dos isótopos de torio.

VI.1.4. Planteamiento teórico II

Si se supone que en la monacita la cadena se encontraba en equilibrio, al efectuar la separación del torio para la fabricación del óxido se rompió el equilibrio y a partir de este instante que podemos tomar como tiempo cero, comienzan a generarse los descendientes del Th^{232} y del Th^{228} , que en ese instante inicial tenían la misma actividad. El Th^{228} se desintegra a mayor ritmo que el Th^{232} , por tanto si designamos como:

λ_1 la constante de desintegración del isótopo Th^{232}

λ_2 la constante de desintegración del isótopo Ra^{228}

λ_3 la constante de desintegración del isótopo Ac^{228}

λ_4 la constante de desintegración del isótopo Th^{228}

y $N_{1...4}$ como el número de núcleos de los respectivos isótopos (Th²³², Ra²²⁸, Ac²²⁸, Th²²⁸) y que expresado en términos de actividad [61],

$$A_i(t) = A_i(t_0)e^{-\lambda_i t}$$

siendo $A_{1...4}$ actividades respectivos isótopos (Th²³², Ra²²⁸, Ac²²⁸, Th²²⁸).

Las ecuaciones diferenciales relevantes para este número determinado de núcleos son:

$$N_1'(t) = -\lambda_1 N_1(t)$$

$$N_2'(t) = +\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

$$N_3'(t) = +\lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t)$$

$$N_4'(t) = +\lambda_3 N_3(t) - \lambda_4 N_4(t)$$

Las condiciones iniciales para la solución de este sistema de ecuaciones diferenciales acopladas son: que la cadena se encontraba en equilibrio secular en el instante $t = 0$ de la separación del torio del mineral, que la separación fue químicamente eficiente y que el radio y el actinio se eliminaron, por tanto en términos de actividad:

$$A_1(0) = A_4(0)$$

$$A_2(0) = A_3(0) = 0$$

La solución para los radionucleidos Th²³² y Th²²⁸ [60] es la siguiente:

$$A_1(t) = A_1(0)e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_4(t) = A_1(0)\lambda_2\lambda_3\lambda_4 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} \right] \\ + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} + \frac{e^{-\lambda_4 t}}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} \\ + A_4(0)e^{-\lambda_4 t}$$

Si se tiene en cuenta los valores numéricos de las constantes de desintegración λ (Th²³², Ra²²⁸, Ac²²⁸, Th²²⁸):

$$\lambda_1 = 5,63177 \times 10^{-15} \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_2 = 1,37611 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_3 = 0,112707 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_4 = 4,139276 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

λ_1 es diez órdenes de magnitud menor que las demás constantes y λ_2 y λ_4 son 5 órdenes de magnitud inferiores a λ_3 ; esto permite simplificar la relación de actividades hasta obtener la siguiente expresión:

$$\frac{A_4(t)}{A_1(t)} = 1 - \frac{\lambda_4}{(\lambda_4 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2 \lambda_4 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_3)^2} + \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_4} \right) e^{-\lambda_4 t}$$

Que en valores numéricos queda:

$$\frac{A_4(t)}{A_1(t)} = 1 + 1,49802 (e^{-\lambda_4 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Este cociente tiene un mínimo en $t = 39.855$ horas = 4,55 años que corresponde a:

$$\frac{A_4(t)}{A_1(t)} = \frac{A_{Th^{228}}(t)}{A_{Th^{232}}(t)} = 0,422 \quad (\text{Ec. VI.7})$$

Se puede observar la evolución de este cociente en la siguiente Figura VI.1.2.

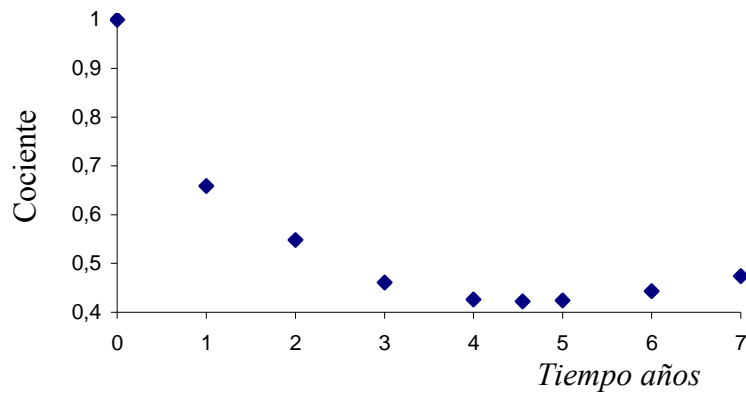


Figura VI.1.2: Variación del cociente de las actividades de los isótopos de torio $\text{Th}^{228}/\text{Th}^{232}$ en función del tiempo, partiendo del equilibrio en tiempo $t = 0$.

Algunos de los valores del cociente determinados experimentalmente (Tabla VI.1.6) [60] presentan valores inferiores a 0,422, es decir que se produce más de un proceso de purificación antes de llegar al producto final, el electrodo toriado TIG.

Si suponemos una segunda separación se verifica que en el instante de efectuar esta separación la relación de actividades será $A_4(0) = \alpha A_1(0)$. El valor del nuevo mínimo es:

$$\frac{A_4(t)}{A_1(t)} = 0,422 \alpha$$

Esta relación de actividades puede llegar a valer 0,178, si la separación se realiza cuando la relación de actividades estaba en su mínimo valor y por tanto $\alpha = 0,422$.

VI.1.5. Resultados experimentales II

Se ha llevado a cabo el análisis por espectrometría alfa del torio contenido en seis electrodos de dos casas comerciales cuyos resultados aparecen en la Tabla VI.1.6, denominadas marca 1 y marca 2, de diámetros de 1 mm., 2,4 mm. y 4 mm. y con una concentración de aproximadamente el 2% en óxido de torio. Se representan en la siguiente tabla los resultados de actividad para los isótopos Th^{232} , Th^{228} y su cociente para compararlos con los valores teóricos calculados anteriormente [60].

Se ha realizado el cálculo de la incertidumbre del cociente (Tabla VI.1.6), al igual que en los dos casos anteriores mediante la ecuación

$$u(a/b) = a/b \sqrt{(1/a^2)u^2(a) + (1/b^2)u^2(b)} \quad (\text{Ec.VI.6})$$

	Diámetro (mm)	Th^{228} Bq/gr	Incert. Bq/gr (k=1)	Th^{232} Bq/gr	Incert. Bq/gr (k=1)	$\text{Th}^{228}/\text{Th}^{232}$ Bq/gr	Incert. $\text{Th}^{228}/\text{Th}^{232}$ (k=1)
Marca 1	1	20,23	0,3925	78,9	0,7733	0,256	5,54E-03
	2,4	20,4	0,2305	64,4	0,4123	0,316	4,10E-03
	4	18,46	0,3238	60,53	0,5296	0,305	5,92E-03
Marca 2	1	19,17	0,3546	51,4	0,5767	0,373	7,96E-03
	2,4	24,30	0,5222	63	0,8450	0,385	9,72E-03
	4	23,74	0,3371	62,9	0,5532	0,377	6,19E-03

Tabla VI.1.6: Resultados experimentales obtenidos por espectrometría alfa para Th^{232} , Th^{228} y la relación de actividades de los mismos.

Aunque los procesos de sinterización con que se fabrican los electrodos no alteran la relación isotópica $\text{Th}^{228}/\text{Th}^{232}$, los valores de los electrodos de marca 1 indican claramente que en el proceso ha habido al menos dos separaciones de torio; la primera partiendo de equilibrio en la monacita y otra con posterioridad. Si se supone que la segunda separación ocurrió justamente a los 4,55 años de la primera, cuando el valor del

cociente era mínimo (0,422), el valor de α tendría que variar entre 0,64 y 0,75 según el electrodo que se considere, lo que corresponde a un tiempo de poco más de 1 año desde la separación del mineral original.

En el caso de la marca 2 los resultados son más cercanos al mínimo 0,422 para el cociente y podrían ser compatibles con una única separación de tiempo cercano al mínimo de 4,55 años, aunque lo más probable es que se trate también de un proceso análogo al de la anterior marca con dos procesos de separación.

VI.2. ANALISIS DE LOS ELECTRODOS TORIADOS POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO. SEM.

VI.2.1. Introducción a la Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electrón Microscopy, SEM).

El torio puede ser determinado mediante diversos métodos analíticos [62], la elección se realiza en función de la matriz que lo contiene y de su concentración. En nuestro caso se trata de analizar la morfología de los electrodos toriados por medio de la microscopía electrónica. Por un lado interesa constatar la existencia de posibles fisuras que favorezcan la difusión del radón y por tanto al desequilibrio en la cadena de desintegración del torio y por otra parte esta técnica nos permite conocer la composición de la varilla y la distribución del óxido de torio en el material.

En muchos campos de la química, de las ciencias de los materiales, de la geología y de la biología, es cada vez más importante el conocimiento detallado de la naturaleza física de las superficies de los sólidos. La microscopía óptica [63] es una técnica importante para la caracterización de superficies, la primera razón de la utilidad de estos microscopios es la alta resolución que se puede obtener cuando se examinan muestras gruesas. En los instrumentos comerciales se pueden alcanzar valores de resolución del orden de 2 a 5 nm. (20 a 50 Å). En el microscopio SEM (Scanning Electrón Microscopy) [64] se barre mediante un rastreo programado con un haz de electrones muy fino focalizado o con una sonda adecuada. El rastreo programado es similar al utilizado en un tubo de rayos catódicos, en el que un haz de electrones barre la superficie en línea recta (dirección x), vuelve a la posición inicial y es desplazado hacia abajo (dirección y) un incremento establecido. Este proceso se repite hasta que el área deseada de la superficie ha sido barrida [65] y se produce una señal por encima de la superficie (dirección z) que se almacena en un sistema computerizado donde posteriormente se convierte en una imagen.

Al realizar el rastreo sobre la superficie del sólido con un haz de electrones de energía elevada y como consecuencia de ello, se producen en la superficie distintos tipos de señales. Estas señales incluyen electrones retrodispersados, secundarios y Auger;

fotones debidos a la fluorescencia de rayos X. Todas estas señales se han utilizado en estudios de superficie, pero las más usuales son las que corresponden a electrones retrodispersados y secundarios y es en los que se fundamenta el microscopio de barrido de electrones. La intensidad de ambas emisiones varía en función del ángulo que forma el haz incidente con la superficie del material, es decir depende de la topografía de la muestra.

El espectro de radiación X emitido por la muestra en el proceso puede ser utilizado para hacer un microanálisis químico semicuantitativo [66,67] mediante espectrometría de dispersión de longitudes de onda o de energía. El análisis por dispersión de energías de rayos X unido a la Microscopía Electrónica de Barrido, SEM, es una herramienta analítica de gran importancia en el estudio de los materiales.

Otra característica importante de los SEM es la apariencia tridimensional de la muestra, este efecto es un resultado directo de la gran profundidad de campo, así como el efecto de relieve producido en la imagen de electrones secundarios y retrodispersados.

Interacciones de los haces de electrones con los sólidos

La versatilidad de los microscopios SEM para el estudio de sólidos proviene de la amplia variedad de señales que se generan cuando el haz de electrones interactúa con la superficie. Las interacciones de un haz de electrones con un sólido se pueden dividir en dos categorías. Interacciones *elásticas* que afectan a las trayectorias de los electrones en el haz sin que se alteren significativamente sus energías e *inelásticas*, que resultan de la transferencia total o parcial de la energía de los electrones al sólido. El sólido excitado emite entonces electrones secundarios, electrones Auger, rayos X y ocasionalmente fotones de longitudes de onda más larga.

Si la muestra no es buena conductora se acostumbra a recubrirla con una película conductora metálica o de carbono para evitar que esta se cargue eléctricamente cuando sea irradiada.

Dispersión elástica

Cuando un electrón colisiona elásticamente con un átomo se produce en la dirección del electrón pero se mantiene su energía cinética prácticamente constante. La energía que se asigna al haz es usualmente de 20 keV. Los electrones penetran hasta una profundidad de 1,5 μm . o más. Algunos de los electrones pierden su energía por colisiones inelásticas y permanecen en el sólido: sin embargo, la mayoría experimenta numerosas colisiones y como resultado, acaban saliendo de la superficie como electrones retrodispersados. Este haz resultante tiene un diámetro mucho mayor que el incidente (de 5 nm. puede llegar a un diámetro de varios micrómetros) el diámetro del haz retrodispersado es uno de los factores que limita la resolución de un microscopio electrónico.

Dispersión inelástica

Producción de electrones secundarios

La dispersión inelástica de electrones energéticos puede promover la salida de electrones débilmente enlazados de la banda de valencia o de conducción en el caso del semiconductor o aislante (por formación de un par electrón-hueco), con suficiente energía cinética para ser capaz de salir del sólido. En el caso de metales, esta promoción puede ocurrir directamente desde la banda de conducción. Estos electrones de la muestra se llaman electrones secundarios, y en su propagación por el metal están expuestos a fenómenos de dispersión y pérdida de energía. Si los electrones secundarios mantienen suficiente energía cuando alcanzan la superficie para superar la barrera de energía de la misma, escapan del sólido como electrones secundarios. La mayoría de los electrones que escapan tienen una energía de menos de 50 eV.

Electrones Auger

Cuando un electrón secundario es expulsado del átomo, otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar este hueco, El exceso de energía provocado por este desplazamiento puede ser corregido emitiendo un nuevo electrón de la capa más

externa. Estos son los llamados electrones Auger, y son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra.

Emisión de rayos X

Un tercer efecto de la interacción de un haz de electrones sobre un sólido es la producción de fotones de rayos X. Cuando un haz de radiación electromagnética bombardea una muestra, si esta radiación tiene energía suficiente los electrones son eyectados de las capas internas de los átomos, creándose las consiguientes vacantes. Estas vacantes suponen un estado inestable para el átomo, que vuelve a una situación de estabilidad transfiriendo electrones de orbitales más externos hacia los orbitales internos, emitiéndose la diferencia de energía entre ambos niveles en forma de rayos X característicos del átomo en cuestión.

Los rayos X característicos son etiquetados como K, L, M o N para denotar la capa donde son producidas las vacantes. Los subíndices α , β y γ indican la capa desde la que tuvo lugar la transición electrónica. Puesto que las distintas capas tienen subniveles, un segundo subíndice, como por ejemplo α_1 , α_2 se introduce para indicar las distintas transiciones entre estos subniveles. En la figura VI.2.1 se indican las transiciones entre los distintos niveles. Algunas veces, la desexcitación del átomo tiene lugar mediante la transferencia de energía directamente a uno de los electrones más externos en vez de la emisión de un rayo X característico. Dicho electrón es eyectado del átomo y se le denomina “electrón Auger”, en un proceso competitivo con el anterior.

Si se puede identificar la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones características, se puede conocer los elementos que componen la muestra. Las líneas son identificadas por referencia a las correspondientes tablas de energías de emisión de rayos X (Tabla VI.2.3). El espectro de radiación X emitido por la muestra en el proceso puede ser utilizado para hacer un microanálisis químico cualitativo mediante espectrometría con detectores de estado sólido. La utilización de semiconductores, principalmente de silicio dopado con litio como detector de rayos X ha tenido un gran desarrollo en los últimos años.

En un espectrómetro de rayos X, el detector recibe el espectro total emitido por todos los elementos de la muestra a la vez. Para cada fotón de rayos X incidente el detector genera un impulso eléctrico cuya altura será proporcional a la energía del fotón. Los distintos impulsos eléctricos generados son separados y almacenados en función de su valor con ayuda de un analizador multicanal.

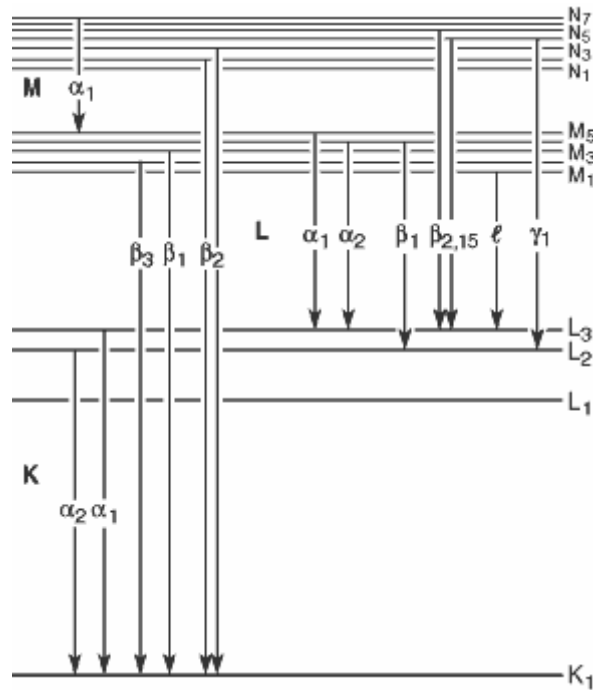


Figura VI.2.1: Diagrama de niveles de energía parcial que muestra las transiciones que habitualmente producen radiación X. Las líneas más intensas se indican mediante flechas más anchas.

Aplicaciones

Las observaciones de Microscopía Electrónica de barrido en modo de detección de electrones secundarios nos permiten observar la morfología y relieve de las superficies, sin necesidad de pulir la muestra. Las observaciones en modo detección de electrones retrodispersados consiguen una menor interferencia de los bordes de la muestra y un mayor contraste composicional. [66,67].

Otra característica importante de los SEM, es la apariencia tridimensional de la muestra, este efecto es resultado directo de la gran profundidad de campo, así como el efecto relieve producido en la imagen de electrones secundarios y retrodispersados.

Además utilizando la técnica combinada de la Microscopía electrónica de barrido con el análisis por dispersión de rayos X (SEM-EDX), es posible obtener resultados cualitativos e incluso semicuantitativos sin el uso de patrones específicos de cada elemento analizado.

Generalmente los únicos requisitos que deben cumplir las muestras son dos, ser sólidas y superficialmente conductoras de la electricidad. Su versatilidad para analizar tipos diferentes de muestras sin tener que utilizar sustancias patrón de distintas composiciones químicas, próximas a la de la sustancia problema y la mínima preparación de la muestra, hacen que esta técnica sea de gran utilidad para Laboratorios de Control e Investigación Siderometalúrgicos.

Equipamiento

El microscopio electrónico de barrido utilizado en este estudio se encuentra en el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Zaragoza y es un microscopio JEOL JSM-6400, que puede generar imágenes de electrones secundarios y retrodispersados acelerados con tensiones desde 0,2 a 40 kV. Permite observaciones hasta 3,5 nm. de resolución. Lleva acoplado un sistema computerizado de análisis de rayos X, e-XL-10 de Link Analytical.

El detector de rayos X es de Oxford, constituido por un semiconductor de silicio dopado con litio. El análisis de la energía de los rayos X dispersados se realiza en un área definida por el pincel de electrones de 2 a 5 μm , y permite conocer la composición química de los materiales en observación.

En la Figura VI.2.2. puede observarse una fotografía del equipo utilizado.



Figura VI.2.2: Imagen del Microscopio electrónico de barrido

Material analizado

Se ha realizado el estudio por microscopía electrónica de los electrodos de tungsteno toriado con un 2% en óxido de torio aproximadamente y de las dos marcas en las que se han basado los estudios anteriores. Se han analizado también las secciones transversales y longitudinales de las seis varillas.

El equipo permite seleccionar sobre la imagen diferentes zonas y realizar posteriormente el análisis de su composición. En la señal que proporcionan los electrones retrodispersados aparecen distintas tonalidades de grises debido a la diferente composición química de los distintos granos. Las zonas más oscuras corresponden a huecos en el material.

En las fotografías que se presentan a continuación, los puntos más brillantes se corresponden con aquellos lugares donde se arrancan más electrones y es el lugar donde se localizan los elementos de mayor peso atómico. Es en estas zonas brillantes donde se ha efectuado la espectrometría de los rayos X para comprobar la distribución del óxido de torio a lo largo de la varilla.

La zona analizada por espectrometría tiene una superficie de 2 micras y alcanza una profundidad aproximada de 10 micras. Durante la adquisición en el sistema SEM-EDX de cada uno de los espectros hay que tener en cuenta que cuando incide el haz de electrones sobre la muestra, los rayos X que se recogen en el detector se han generado en un volumen bajo la superficie observable (más o menos con forma de esfera o de pera) cuyo punto de contacto con la superficie coincide con el punto de incidencia del haz. Si en ese volumen los electrones se encuentran con una inclusión de una sustancia diferente, los rayos X provenientes de ésta serán también recogidos por el detector como provenientes del punto de interés. Es necesario estimar una distancia de seguridad para poder afirmar con cierta fiabilidad que el análisis que se realiza es representativo de lo que se observa. Esa distancia puede fijarse en 2 μm . para evitar que la radiación que pueda ser producida por una partícula ajena al análisis pueda interferir con las medidas que se están realizando, al dispersarse el haz de electrones en el interior del material.

La calibración del equipo se realiza con una fuente de cobalto puro sólido que se coloca en la misma placa con las muestras de segmentos de tungsteno y se utiliza para ajustar el espectro de energías en el análisis de rayos X.

Las muestras se colocan en un soporte semejante a una caja Petri de 2,5 cm. y los fragmentos de 1 a 1,5 cm. de longitud, se depositan en posición horizontal en la caja sobre una cinta de carbono adhesiva de doble cara. Es posible que aparezcan trazas de carbono en el espectro y que son debidas a este soporte.

A continuación se incluyen las líneas características más intensas de rayos X de los elementos de interés en este estudio, junto con su intensidad relativa (entre paréntesis), siendo 100 el valor asignado a la línea más intensa del nivel correspondiente para cada elemento.

Nivel	${}^6\text{C}$	${}^8\text{O}$	${}^{14}\text{Si}$	${}^{74}\text{W}$	${}^{90}\text{Th}$
$K\alpha_1$	0,277(100)	0,524(100)	1,739(50)	59,318(100)	93,350(100)
$K\alpha_2$			1,739(100)	57,981(58)	89,953(62)
$K\beta_1$			1,835(2)	67,244(22)	105,609(24)
$L\alpha_1$				8,397(100)	12,968(100)
$L\alpha_2$				8,335(11)	12,809(11)
$L\beta_1$				9,672(67)	16,202(69)
$L\beta_2$				9,961(21)	15,623(26)
$L\gamma_1$				11,285(13)	18,982(16)
$M\alpha_1$				1,775(100)	2,996(100)

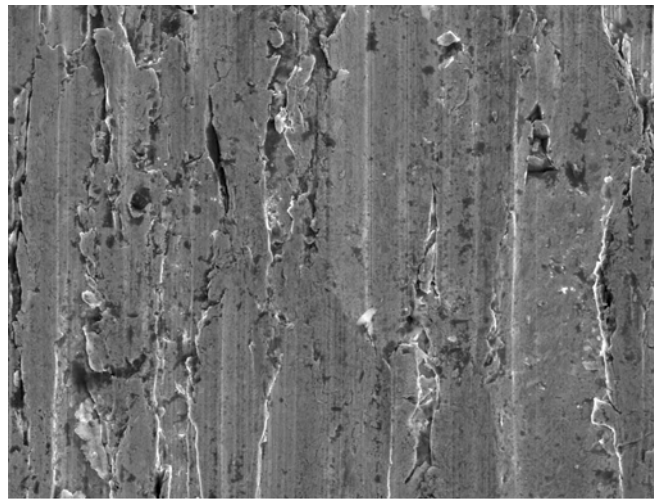
Tabla VI.2.1: Energía (keV) de las líneas de emisión de rayos X característicos e intensidad relativa entre paréntesis, para los niveles K, L y M del tungsteno, torio, carbono, oxígeno y silicio. X-Ray Data Booklet, Lawrence Berkeley Nacional Laboratory (LBNL) [68].

VI.2.2. Análisis por Microscopía Electrónica de los electrodos toriados de marca 1

VI.2.2.1. Análisis de la superficie de los electrodos

Tres fragmentos de los electrodos toriados de la primera marca de un centímetro de longitud y de 1, 2,4 y 4 mm de diámetro se colocaron en el portamuestras del microscopio electrónico sobre una tira adhesiva de doble cara de carbono.

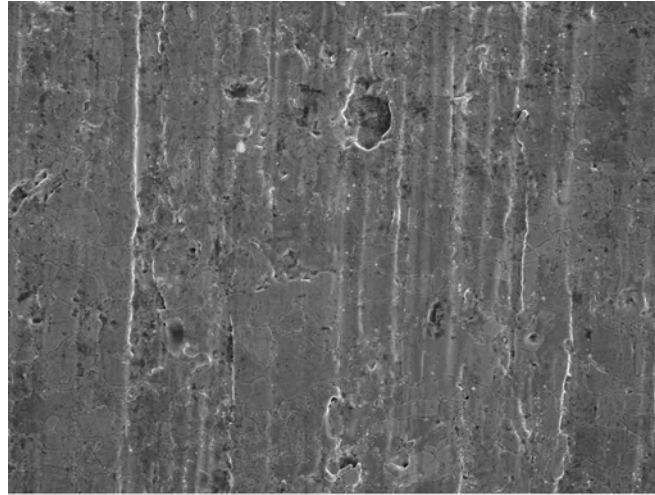
Las siguientes imágenes son las correspondientes a los tres fragmentos de electrodos con el microscopio en modo de observación de electrones secundarios, con 1.000 aumentos. Representa una superficie de 120 por 90 micras aproximadamente. Este tipo de observación, como hemos comentado, nos permite analizar la morfología de la superficie.



60µm

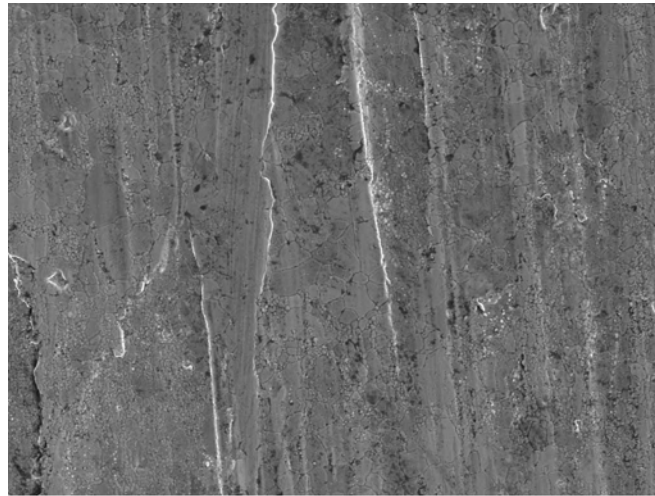
Imagen VI.2.1: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones secundarios, del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

Aunque en general esta superficie presenta un aspecto muy homogéneo, los análisis realizados a partir de las microfotografías que nos proporciona el microscopio electrónico nos revelan las irregularidades del material.



60µm

Imagen VI.2.2: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones secundarios del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.



60µm

Imagen VI.2.3: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones secundarios del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

En las fotografías anteriores de los electrodos podemos ver numerosas grietas en la superficie que aparecen como líneas blancas en este modo de observación. La superficie que a simple vista es uniforme y bastante pulida presenta numerosas imperfecciones.

A continuación se analizan con el mismo aumento las superficies seleccionadas en el modo de electrones retrodispersados para conocer su composición. Las zonas que antes observábamos más claras son ahora las más oscuras.

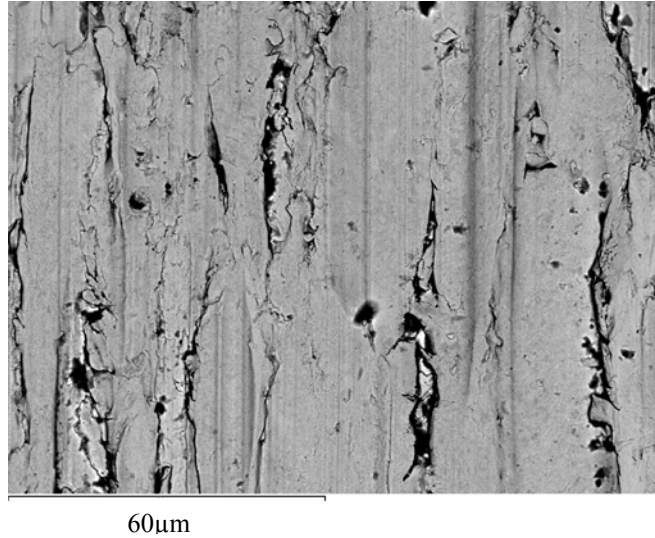


Imagen VI.2.4: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

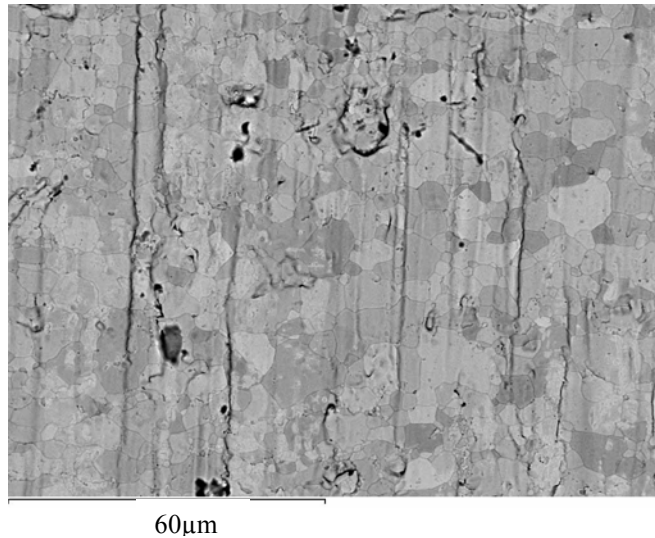
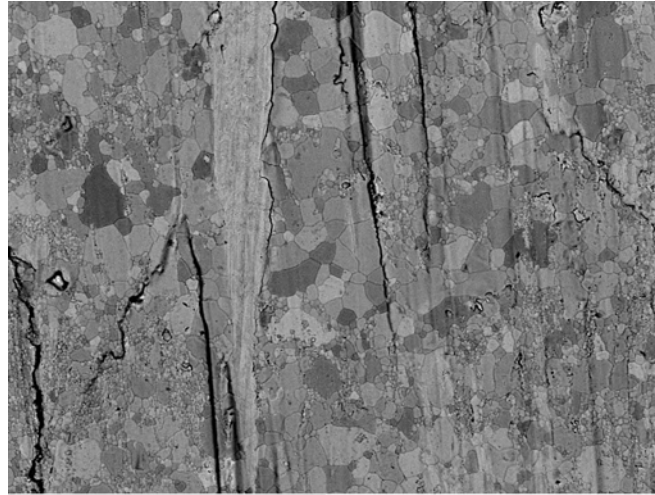


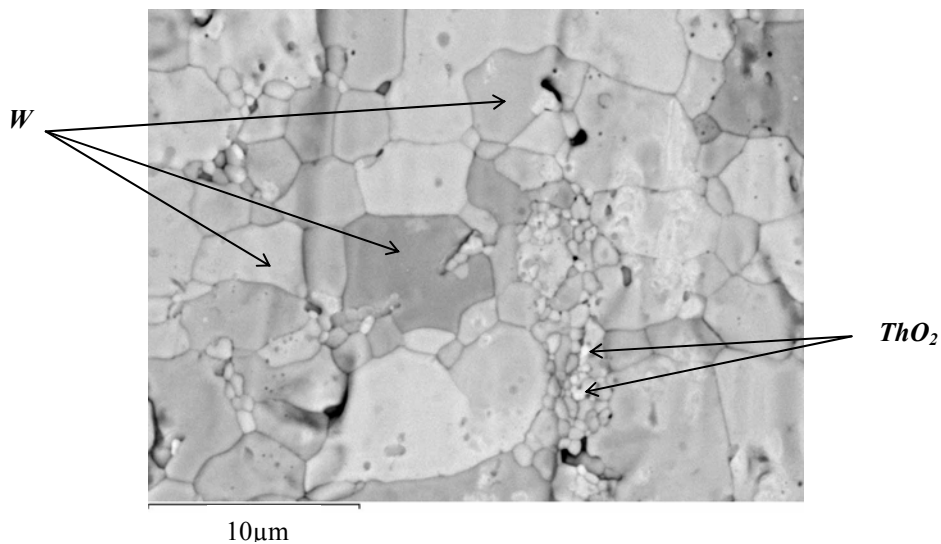
Imagen VI.2.5: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.



60µm

Imagen VI.2.6: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

De estas tres últimas imágenes hemos seleccionado una zona que se aumenta a 4.000 para realizar posteriormente espectrometría de rayos X con el objeto de conocer la composición de los distintos granos. Se obtienen resultados semejantes para los tres diámetros. La imagen siguiente es una ampliación a 4.000 aumentos de una sección del electrodo de 2,4 mm. fotografiado en la imagen VI.2.5.



10µm

Imagen VI.2.7: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados, del electrodo toriado de 2,4 mm. de diámetro.

Realizado el análisis por rayos X comprobamos que los granos de mayor tamaño y que aparecen en diversas tonalidades de grises son de tungsteno, mientras que los pequeños y brillantes (que corresponden a elementos de mayor peso atómico) son de óxido de torio. Incluimos a continuación el espectro de rayos X de la zona ampliada y el de una de las partículas de óxido de torio de la microfotografía anterior.

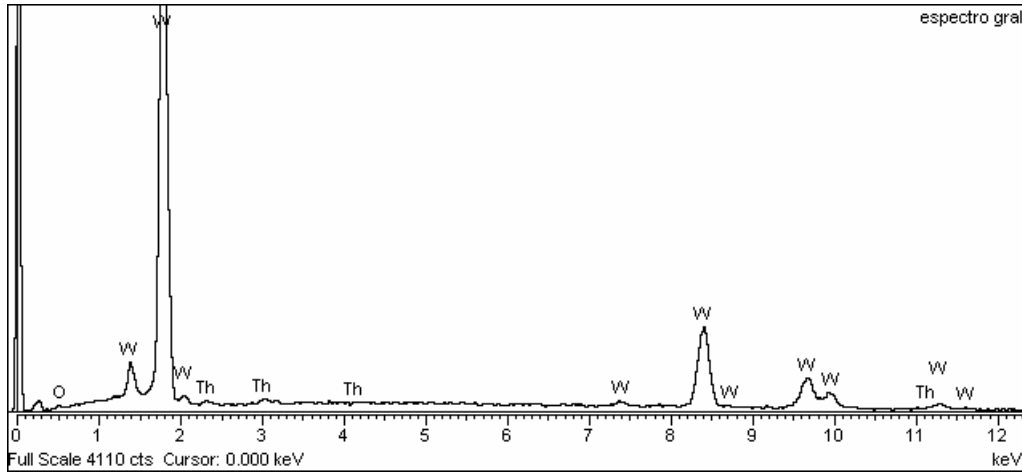


Imagen VI.2.8: Espectro de rayos X de la superficie de la imagen VI.2.7 del electrodo toriado de 2.4 mm.

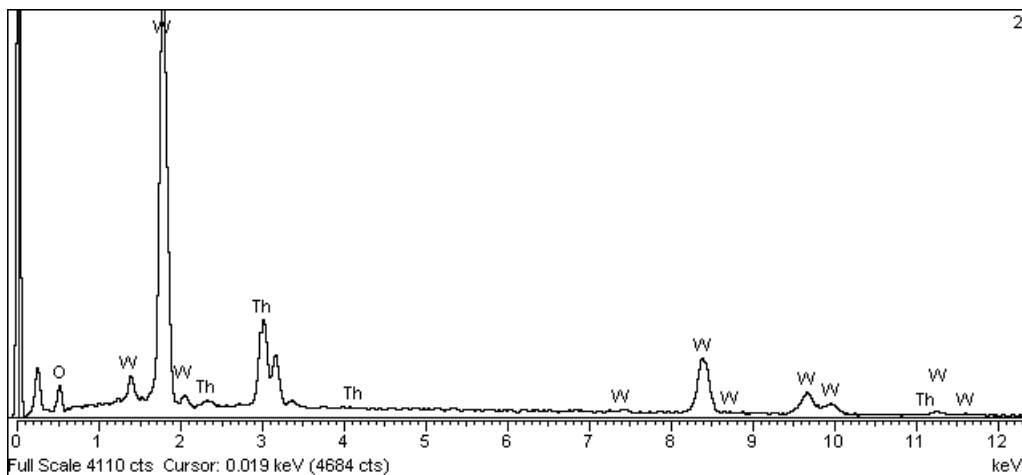


Imagen VI.2.9: Espectro de rayos X de una partícula de óxido de torio de la imagen VI.2.7.

Hay que tener en cuenta que se produce un efecto de dispersión de los electrones por debajo de la superficie y que el volumen analizado puede variar en tamaño y composición. Por ello hemos realizado sucesivos análisis de rayos X para comprobar que los granos más pequeños son de óxido de torio y que los más grandes son de tungsteno. En el espectro general de la zona ampliada (imagen VI.2.8) pueden apreciarse las líneas características de estos elementos. Para el tungsteno las líneas a 1,775 keV, 8,397 keV y 9,672 keV entre otras. Para el torio la línea a 2,996 keV y para el oxígeno la de 0,524 keV.

Las zonas de tungsteno presentan diversas tonalidades de grises, sobre todo en los diámetros de 2,4 y 4 mm., y puede ser debido a que el proceso de cristalización del material se llevó a cabo de forma gradual a partir del material fundido, lo que da lugar a esta morfología de planos en el microscopio electrónico.

Estos electrodos presentan numerosos surcos en su superficie lo que favorece la eliminación del radón que se produce en el interior. Esto explica la desestabilización en la cadena radiactiva del Th^{232} , que se corresponde con los datos obtenidos sobre el estado de la cadena descrita en el apartado 6.1.

VI.2.2.2. Análisis de las secciones transversal y longitudinal

Para este análisis hemos preparado en el portamuestras del microscopio electrónico las secciones transversales y longitudinales de los tres diámetros de los electrodos de la primera marca. Estos segmentos se fijan en el soporte mediante una resina poliepoxydo. La preparación se realiza en el mismo Servicio de Microscopia Electrónica.

Las microfotografías obtenidas de las distintas secciones y los análisis de las energías de los rayos X dispersados se presentan a continuación. El modo de observación del microscopio es de electrones retrodispersados para poder analizar posteriormente la energía de los rayos X dispersados y conocer la composición de las distintas partículas.

Las siguientes imágenes corresponden a los cortes transversal y longitudinal de una muestra de electrodo de la marca comercial 1 y de 1 mm de diámetro. La imagen se ha realizado con 1.000 aumentos y la zona analizada es de 125 por 90 micras aproximadamente.

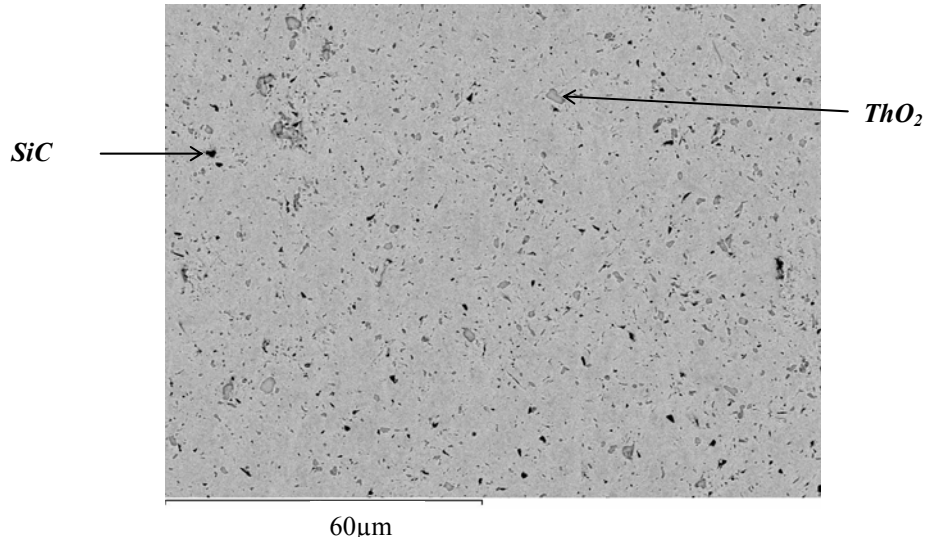


Imagen VI.2.10: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

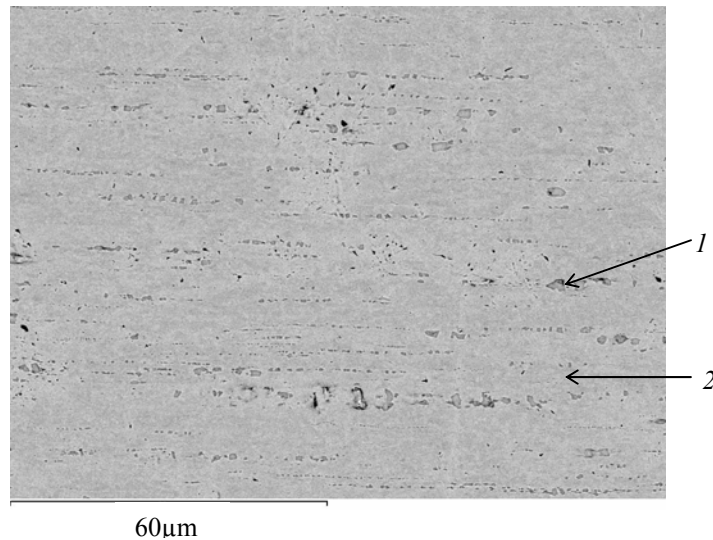


Imagen VI.2.11: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte longitudinal del electrodo toriado de 1 mm de diámetro. Los puntos 1 y 2 indican el lugar donde se ha realizado un análisis para determinar su composición.

La espectrometría de rayos X dispersados realizada sobre esta zona seleccionada revela que los granos de color gris intermedio contienen torio y oxígeno y el resto tungsteno. Las partículas de color más oscuro son de carburo de silicio y proceden del disco de corte utilizado para preparar la muestra. A continuación mostramos el espectro correspondiente al análisis general de la imagen VI.2.11, donde aparecen las líneas características [68] de los elementos que lo constituyen. Para el carbono a 0,277 keV; el oxígeno a 0,524 keV; las líneas entre otras, más intensas del tungsteno a 1,775 keV, 8,335 keV, 8.397 keV, 9,672 keV y la línea a 2,996 keV del torio.

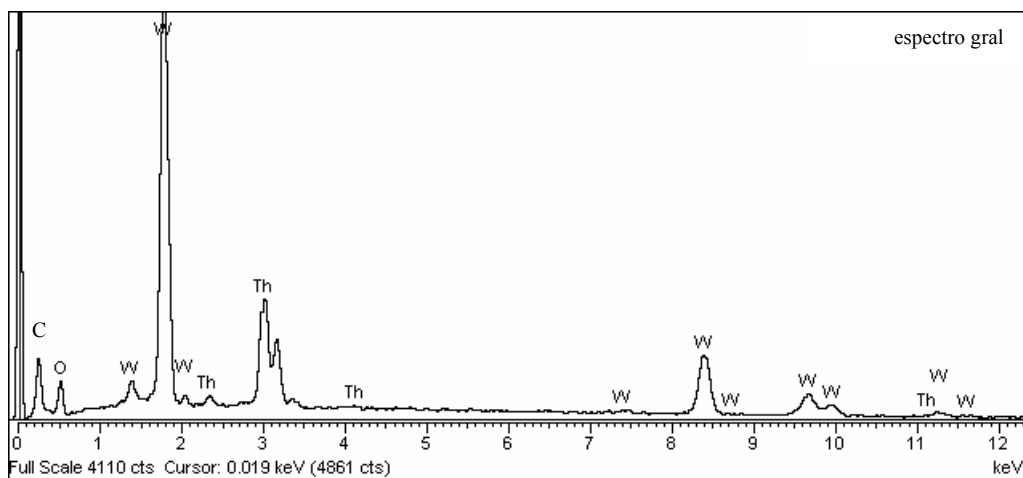


Imagen VI.2.12: Espectro de rayos X general de la imagen VI.2.13.

Hemos realizado el análisis semicuantitativo de rayos X de la zona fotografiada y de los puntos 1 y 2 señalados de la imagen VI.2.11. Los resultados que obtenemos son de un 97,43% de tungsteno y 2,57% (tanto por ciento en peso) en óxido de torio aproximadamente para la zona entera. El punto 1 está compuesto por óxido de torio y el 2 es tungsteno.

Los granos correspondientes al óxido de torio aparecen alargados en el corte longitudinal, esta apariencia es la que normalmente se observa en estudios de microscopía electrónica en materiales que se han obtenido mediante procesos de trefilado. En dicho proceso se reduce mecánicamente la sección transversal del material mediante su paso a través de matrices de diversos diámetros.

Esto mismo puede observarse más claramente en los electrodos de mayor diámetro, cuyas imágenes presentamos a continuación. Hemos realizado microfotografías del corte transversal en el electrodo de 2,4 mm. de diámetro con un aumento de 1.000 y de 4.000.

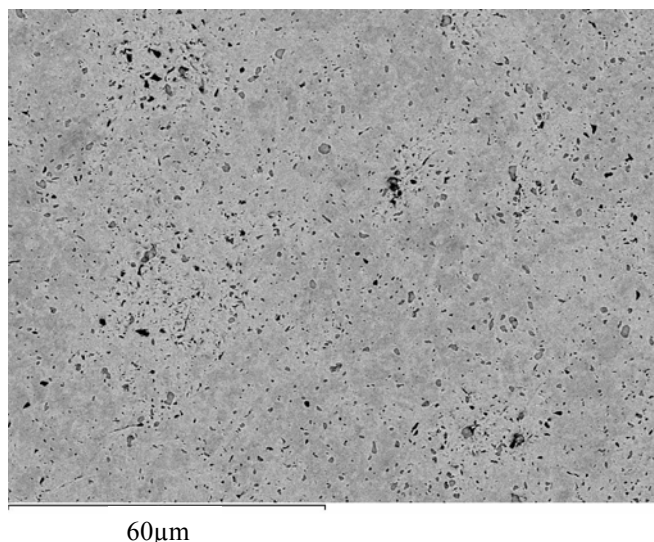


Imagen VI.2.13: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.

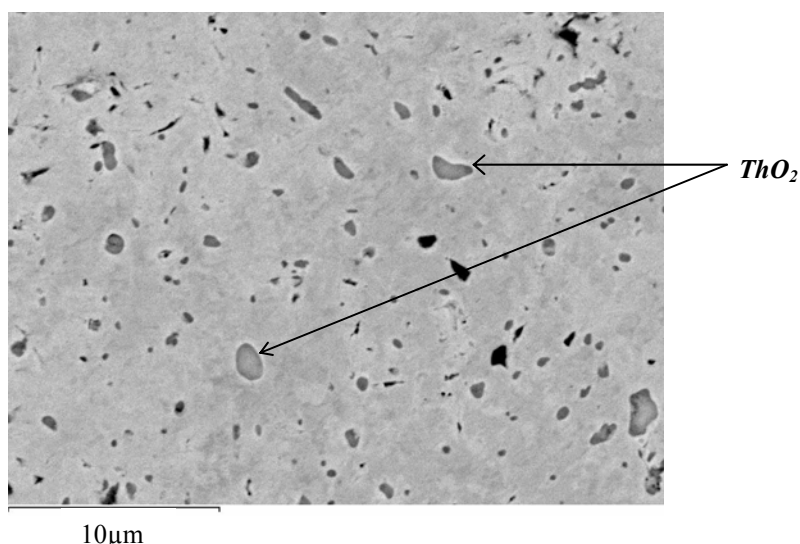
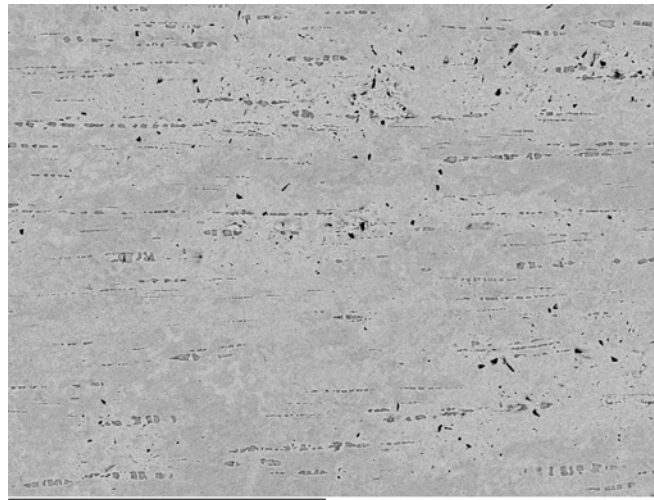


Imagen VI.2.14: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.

En la imagen que analizamos con 4.000 aumentos, observamos los granos correspondientes al óxido de torio repartidos uniformemente. El óxido de torio presenta granos redondeados, como puede observarse en los cortes transversales y repartidos a lo largo de la varilla. La superficie en la microfotografía anterior es de 30 por 24 micras aproximadamente y señalamos las partículas correspondientes al óxido de torio.

La siguiente imagen corresponde al mismo diámetro pero para el corte longitudinal. Se pueden observar las partículas negras con forma triangular de carburo de silicio. Debido al pequeño diámetro de la muestra con la que se trabaja, la sierra de corte deja un residuo muy visible a estos aumentos.



60um

Imagen VI.2.15: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte longitudinal del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.

El análisis de energía de los rayos X dispersados sigue revelando que los granos de color gris intermedio son de óxido de torio. En el corte longitudinal se observan los granos alargados de óxido de torio al igual que en el diámetro anterior, lo que nos confirma el proceso de trefilado como el más probable en el proceso de elaboración de estos electrodos de tungsteno.

Las siguientes imágenes corresponden a los cortes transversal y longitudinal del electrodo toriado de mayor diámetro, 4 mm. La estructura y apariencia morfológica es semejante a los dos diámetros anteriores.

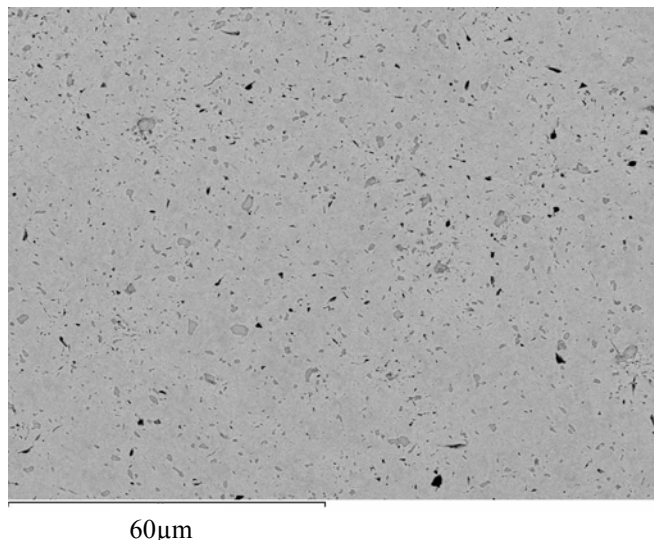


Imagen VI.2.16: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

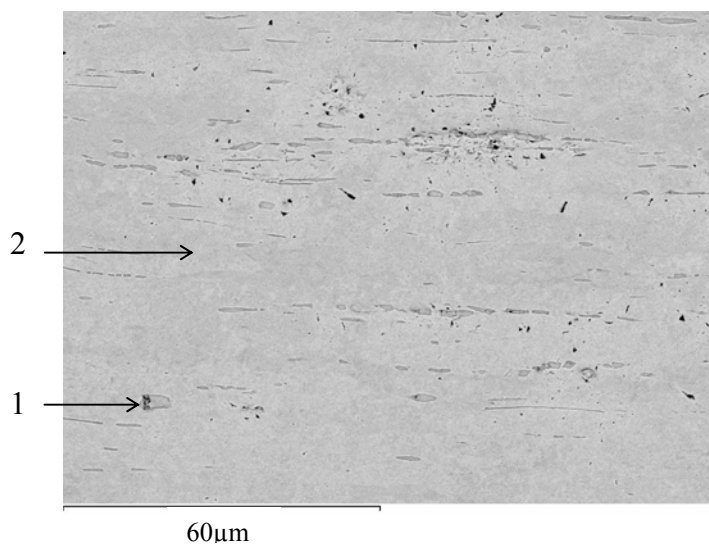


Imagen VI.2.17: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte longitudinal del electrodo toriado de 4 mm de diámetro. Los puntos 1 y 2 son las regiones de análisis.

Hemos realizado el análisis de la composición e incluimos a continuación los espectros de rayos X de los puntos analizados 1 y 2 de la imagen VI.2.17.

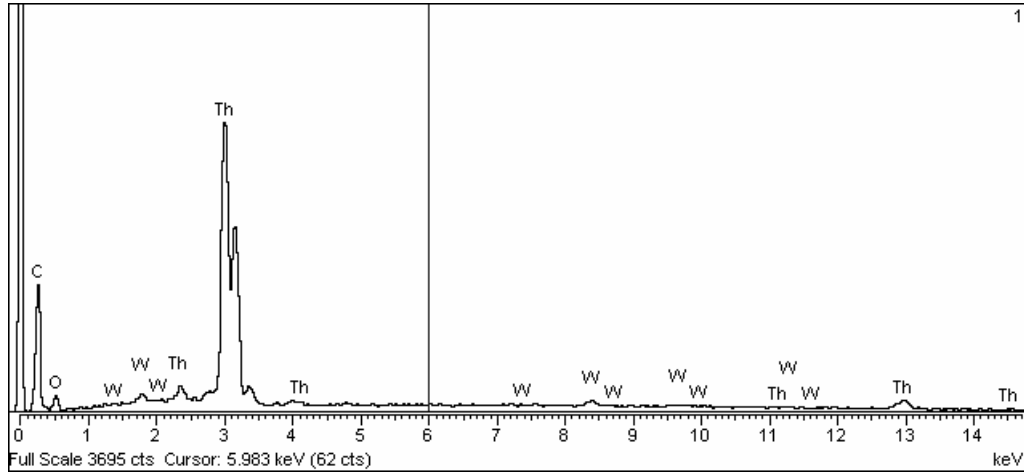


Imagen VI.2.18: Espectro de rayos X del punto 1 de la imagen VI.2.17.

En el espectro de energías de los rayos X dispersados del punto 1 de la imagen VI.2.17, identificamos el torio (a 2,996 keV), el oxígeno (a 0,524 keV) y se aprecia algo de tungsteno que por encontrarse debajo de la partícula de óxido de torio es detectado en la dispersión de rayos X que tiene lugar bajo la superficie. El punto 2 corresponde en su análisis con la matriz de tungsteno de la varilla.

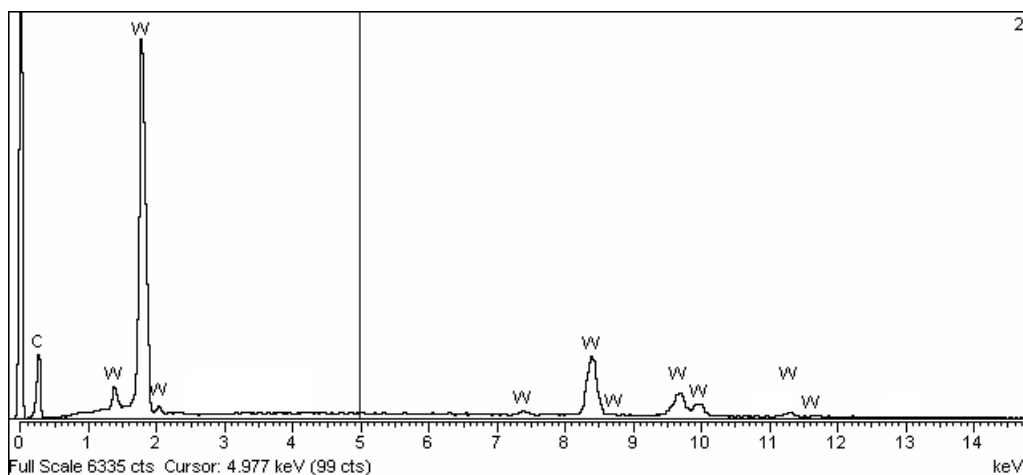


Imagen VI.2.19: Espectro de rayos X del punto 2 de la imagen VI.2.17.

VI.2.3. Análisis por Microscopía Electrónica de los electrodos toriados de marca 2

VI.2.3.1 Análisis de la superficie de los electrodos

Repetimos el análisis por Microscopía Electrónica de barrido SEM, de la misma manera que con los electrodos de la primera marca, con tres fragmentos de un centímetro de longitud y de 1, 2,4 y 4 mm de diámetro para la segunda marca comercial. Estos fragmentos son colocados sobre una tira de carbono en el portamuestras del microscopio electrónico.

Hemos calibrado el equipo con una fuente de cobalto puro sólido que se coloca en la misma placa con las muestras de segmentos de tungsteno. Esta calibración se utiliza para ajustar el espectro de energías en el análisis de rayos X.

Analizamos la morfología de la superficie con el microscopio en modo de observación de electrones secundarios. Presentamos a continuación las imágenes de los tres fragmentos de esta segunda marca para compararlas con las obtenidas anteriormente.

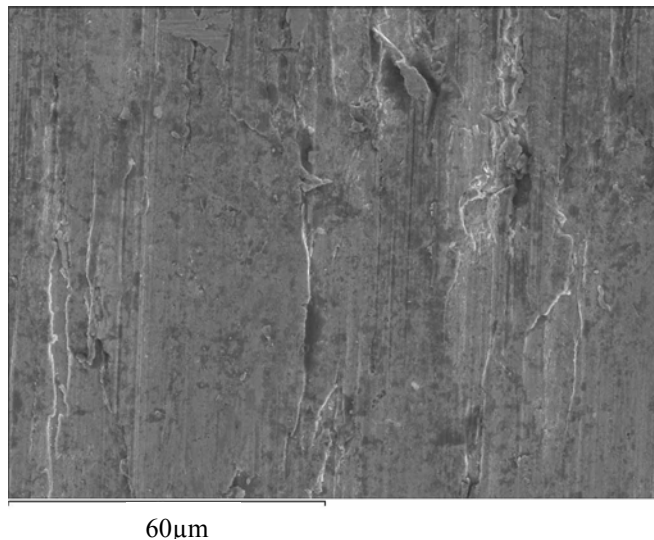
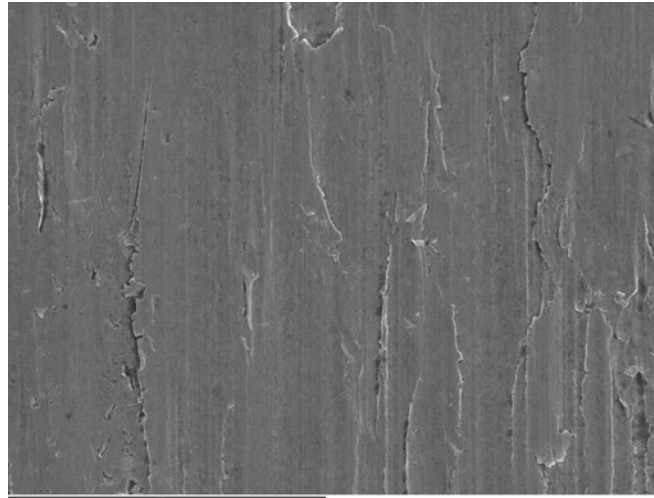
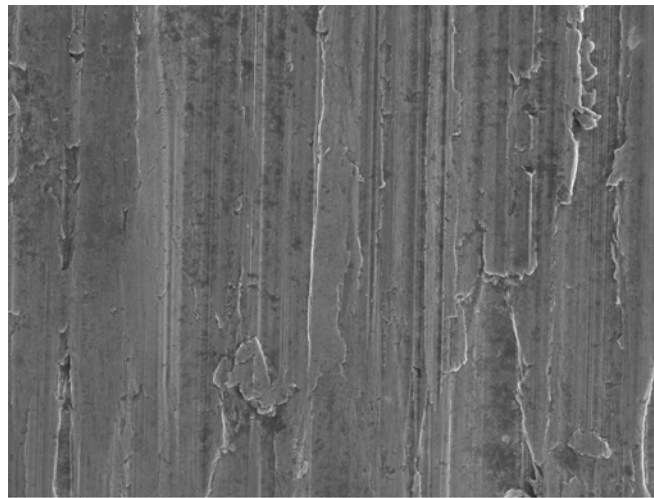


Imagen VI.2.20: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones secundarios, del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.



60µm

Imagen VI.2.21: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones secundarios, del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.



60µm

Imagen VI.2.22: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones secundarios, del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

Al igual que ocurría con la primera marca comercial, la superficie de los tres electrodos, fotografiada bajo el microscopio electrónico aparece surcada por numerosas grietas, que dan lugar a la eliminación del radón del interior de la varilla y explica la rotura de la cadena del Th^{232} .

Hemos realizado el correspondiente análisis SEM de los mismos fragmentos en el modo de electrones retrodispersados, para realizar el posterior estudio de su composición. Las imágenes en este modo de observación se incluyen a continuación.

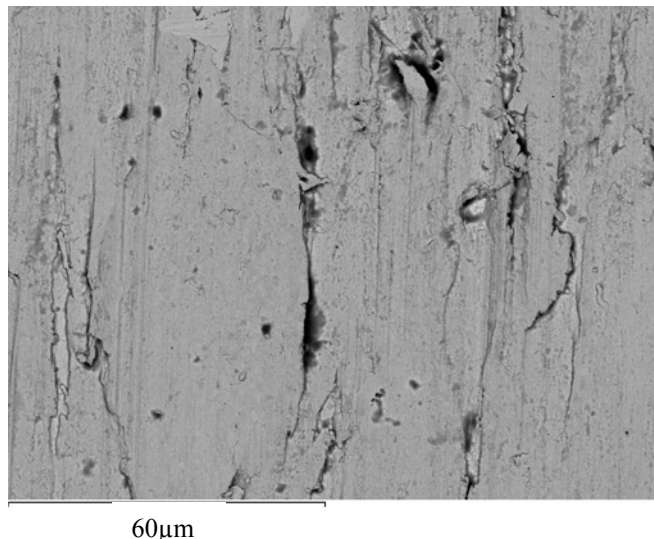


Imagen VI.2.23: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados, del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

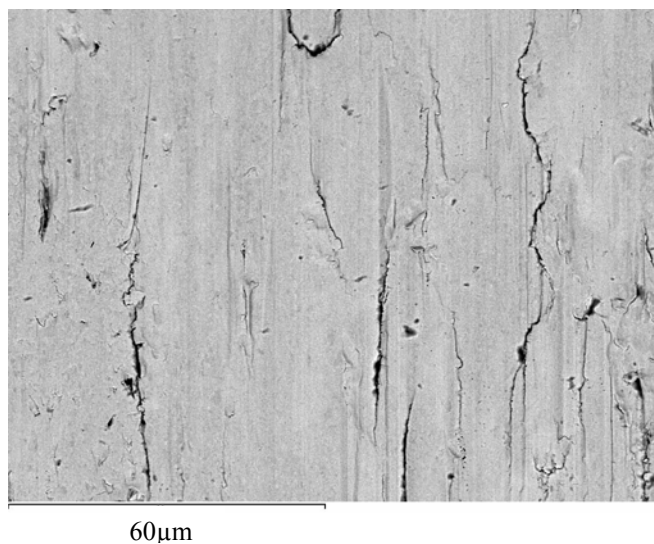


Imagen VI.2.24: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados, del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.

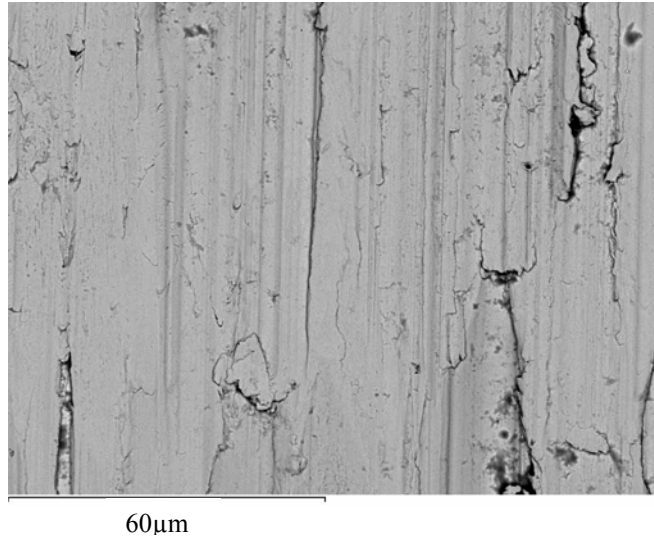


Imagen VI.2.25: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados, del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

Si las comparamos con las fotografías (VI.2.4, VI.2.5 y VI.2.6) de los electrodos de la primera marca, podemos observar como las correspondientes a 2,4 y 4 mm. de diámetro no presentan la misma estructura de diferentes granos, ahora la apariencia es mucho más homogénea para los tres diámetros. En estos electrodos la etapa de cristalización fue más rápida que en el primer caso.

Hemos realizado el análisis SEM de una zona del electrodo de 2,4 mm. de diámetro (una sección de la imagen VI.2.24) a 4.000 aumentos. La ampliación tiene una superficie aproximada de 31 por 23 micras. No resulta sencilla la identificación, en estas imágenes ampliadas y para estos electrodos, de los granos correspondientes al óxido de torio para la realización de la correspondiente espectrometría de rayos X. Las materias primas de partida durante el proceso de fabricación han sido mezcladas de forma homogénea o el enfriamiento tras el proceso de trefilado fue más rápido que en el caso de los electrodos de la primera marca.

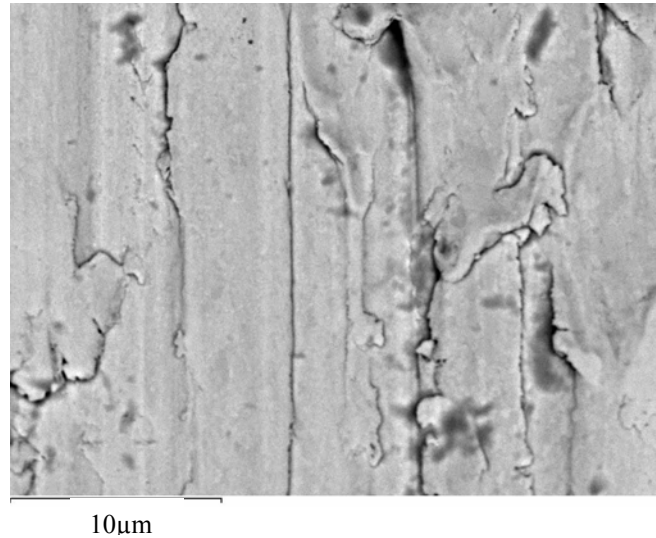


Imagen VI.2.26: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, en modo de electrones retrodispersados, del electrodo toriado de 2,4 mm. de diámetro.

En el análisis general se identifica la presencia de los tres elementos fundamentales, tungsteno, torio y oxígeno. En el espectro general de la zona ampliada (Imagen VI.2.27) identificamos las líneas características [68] de dichos elementos a 1,775 keV, 8,397 keV y 9,672 keV para el tungsteno. Para el torio a 2,996 keV, además de otras de menor intensidad y para el oxígeno la línea a 0,524 keV.

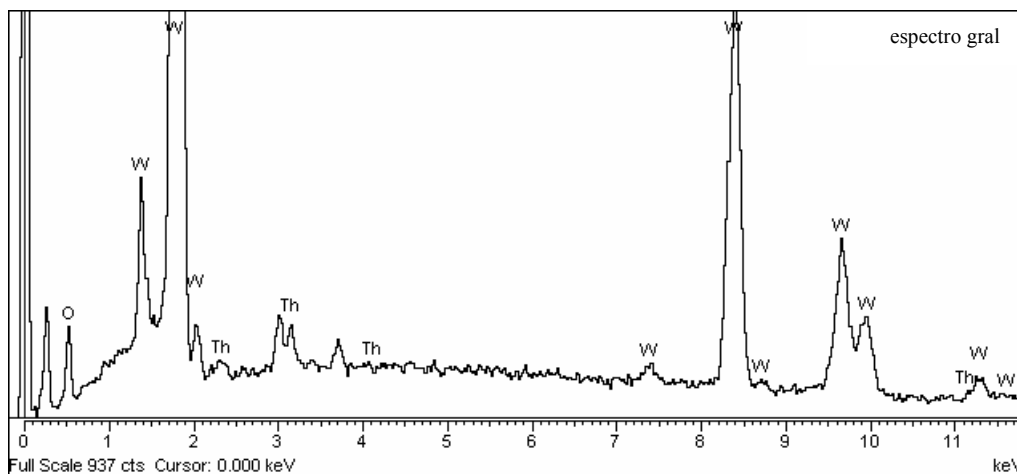


Imagen VI.2.27: Espectro de rayos X de la superficie de la imagen VI.2.26 del electrodo toriado de 2,4 mm.

VI.2.3.2. Análisis de las secciones transversal y longitudinal

En este análisis hemos colocado las secciones transversales y longitudinales de los electrodos en los tres diámetros de la segunda marca comercial. Las secciones pulidas se fijan en el soporte mediante una resina poliepóxido, preparado todo ello por el Servicio de Microscopía Electrónica.

El microscopio electrónico se fija en modo de observación de electrones retrodispersados que nos permite analizar la energía de los rayos X dispersados. Las imágenes siguientes corresponden al corte transversal y longitudinal del electrodo de 1 mm de diámetro. La microfotografía es realizada con 1000 aumentos y la superficie es de 125 por 90 micras aproximadamente.

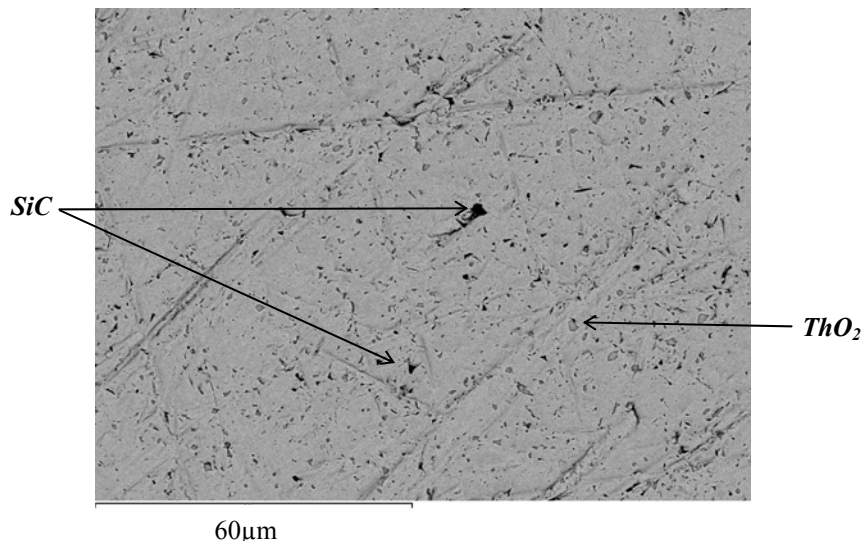


Imagen VI.2.28: Microfotografía SEM, realizada con 1.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

Debido al pequeño diámetro resulta difícil el pulido de esta muestra por eso en la imagen se observan surcos y residuos procedentes de la piedra de corte. Del análisis de rayos X de estos fragmentos en forma de triángulo, se obtuvieron diversas cantidades de carbono y silicio, mientras que las partículas de color gris intermedio contenían oxígeno y torio. El fondo de color gris más claro, componente mayoritario, resultó ser tungsteno.

Estos análisis por espectrometría de rayos X nos proporcionan unos resultados que nos sirven para determinar qué elementos se encuentran presentes con gran precisión.

Si estudiamos una zona del corte transversal con 4.000 aumentos, el resultado es la siguiente imagen en la que podemos apreciar las partículas de óxido de torio más redondeadas y los residuos de carburo de silicio de color más oscuro.

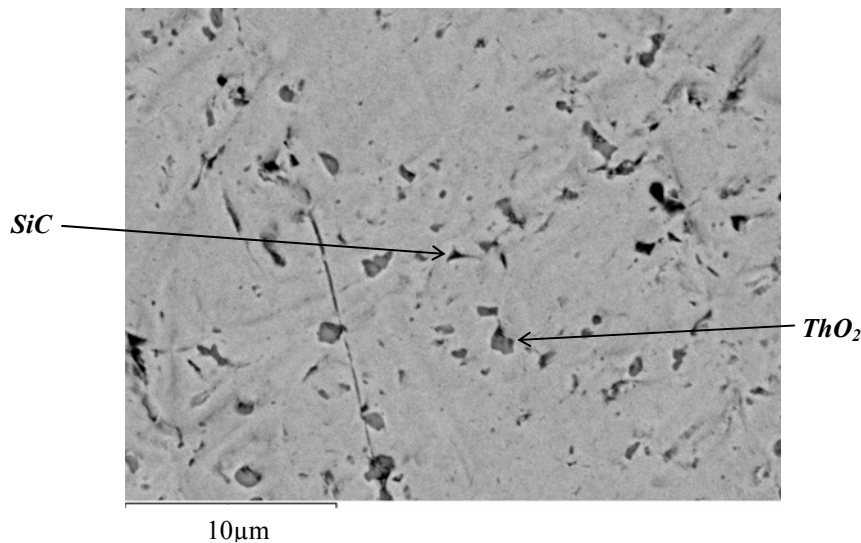


Imagen VI.2.29: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

A continuación presentamos la imagen del corte longitudinal con 4.000 aumentos para el diámetro de 1 mm y el análisis de su composición. En dicha imagen (Imagen VI.2.30) se han analizado los puntos señalados (1 y 2). El punto 1 indica una partícula redondeada de color gris intermedio, su aspecto en este tipo de corte es semejante al obtenido para los electrodos de la primera marca, aparecen alargados en la dirección del corte, que coincide con imágenes conseguidas en materiales obtenidos mediante procesos de trefilado. El punto 2 es el fondo de la imagen y corresponde a la matriz de la varilla. También hemos realizado el espectro general de rayos X de toda la zona fotografiada, que en este caso tiene una superficie de 31 por 23 micras aproximadamente. Los espectros resultantes se incluyen en la imagen VI.2.34.

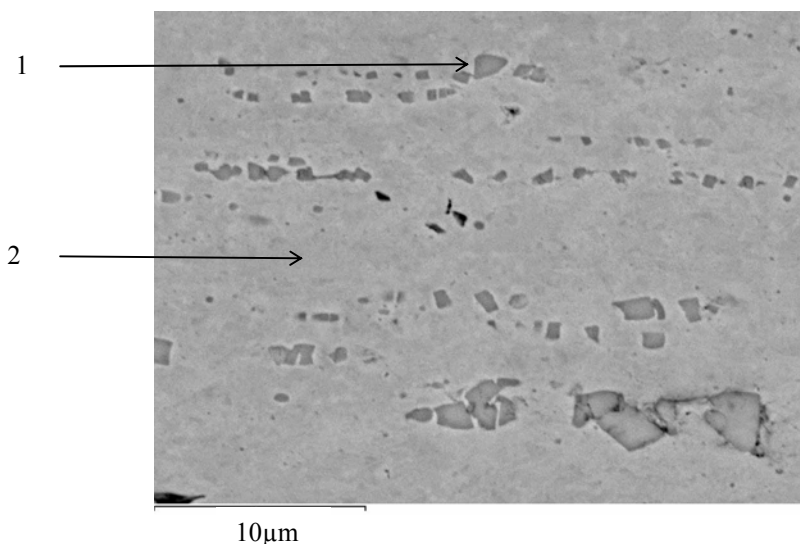


Imagen VI.2.30: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte longitudinal del electrodo toriado de 1 mm de diámetro.

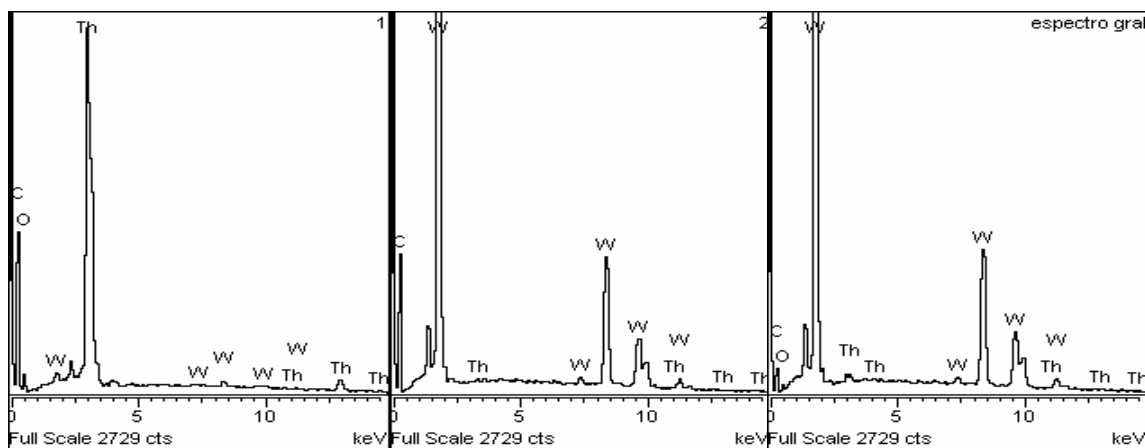


Imagen VI.2.31: Espectro de rayos X de los puntos 1, 2 y espectro general de la imagen VI.2.30.

Hemos realizado el mismo estudio con los electrodos de 2,4 y 4 mm de diámetro y para las secciones transversales y longitudinales. Los resultados son semejantes a los obtenidos para la primera marca. Las microfotografías correspondientes a estas varillas se muestran a continuación.

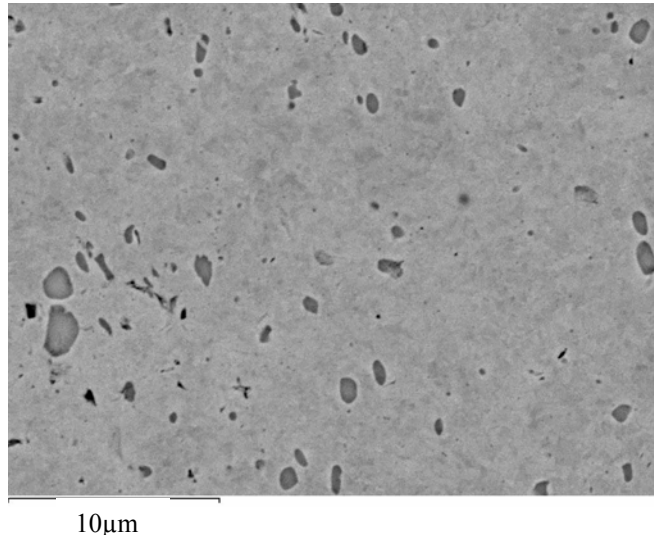


Imagen VI.2.32: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.

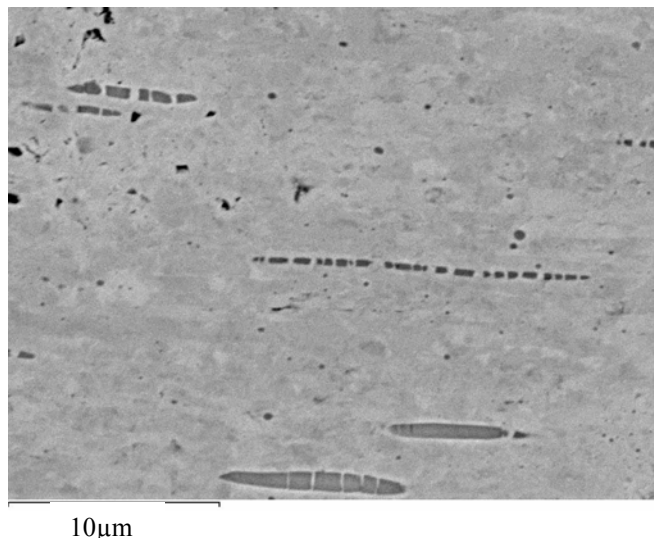


Imagen VI.2.33: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte longitudinal del electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro.

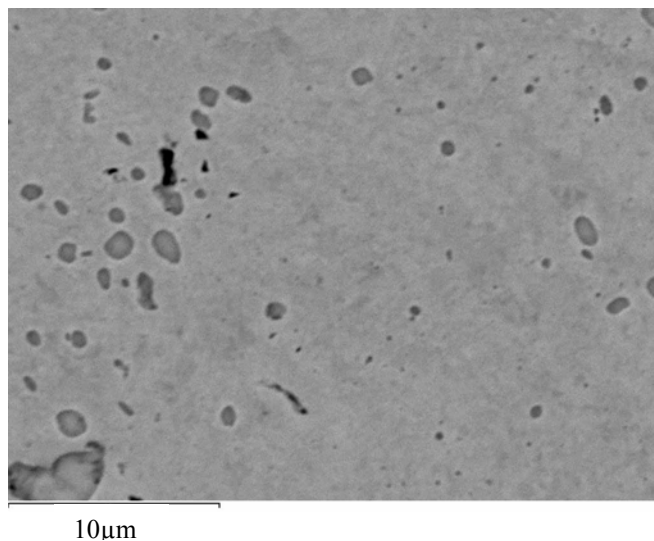


Imagen VI.2.34: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte transversal del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

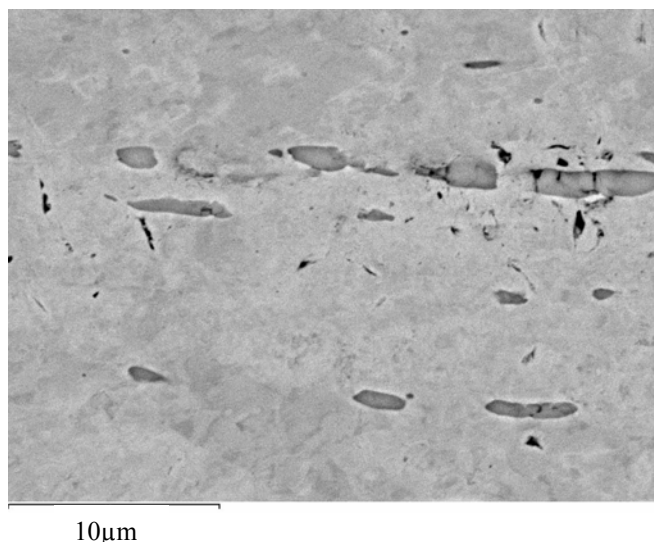


Imagen VI.2.35: Microfotografía SEM, realizada con 4.000 aumentos, del corte longitudinal del electrodo toriado de 4 mm de diámetro.

Estas microfotografías han sido realizadas con 4.000 aumentos. Los granos de óxido de torio se encuentran distribuidos de forma uniforme a lo largo de toda la varilla. El componente mayoritario o matriz es de tungsteno y así se demuestra en los sucesivos análisis de rayos X.

Hemos incluido el espectro general de rayos X realizado a la microfotografía de la sección longitudinal del electrodo de 4 mm. de diámetro. Podemos observar las líneas características del tungsteno, del torio y del oxígeno.

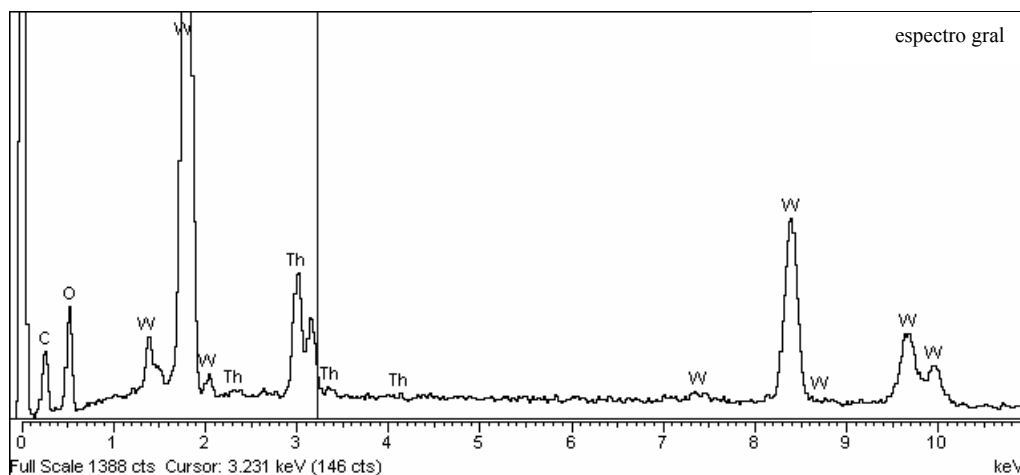


Imagen VI.2.36: Espectro de rayos X de la superficie de la imagen VI.2.35 del electrodo toriado de 4 mm.

VI.2.4. Resultados del análisis por Microscopía Electrónica de Barrido

Con el estudio de los electrodos por Microscopía Electrónica de barrido, SEM, podemos afirmar que la superficie presenta numerosas imperfecciones en forma de grietas que favorecen la difusión del radón procedente de la cadena radiactiva del Th^{232} , desde el interior de las varillas. La cadena radiactiva no se encuentra en equilibrio lo cual nos confirma los resultados obtenidos en los análisis por espectrometría gamma y alfa en los capítulos VII y VIII de esta memoria.

Por otra parte de las imágenes obtenidas de las secciones de los electrodos podemos concluir que efectivamente el óxido de torio se encuentra uniformemente distribuido.

En relación con el proceso de fabricación de los electrodos hemos observado que a partir de un mezclado inicial de las materias primas: tungsteno y óxido de torio, éstas son sometidas a un tratamiento de trefilado para la obtención de los distintos diámetros requeridos.

CAPITULO VII

RADIATIVIDAD DE LOS ELECTRODOS TORIADOS

VII.1. RADIATIVIDAD DE LOS ISOTOPOS DE TORIO: Th^{232} , Th^{230} , Th^{228} .

Se ha llevado a cabo en el laboratorio la determinación por espectrometría alfa del contenido en torio de los electrodos de los dos fabricantes con mayor proyección en nuestro país. El material de partida son las varillas de tungsteno con aproximadamente un 2% en óxido de torio, con unas dimensiones de 150 mm de longitud y 1; 2,4 y 4 mm de diámetro. Se han seleccionado estos electrodos con ese porcentaje ya que son los que se suelen utilizar con más frecuencia. Se han analizado distintos fragmentos a lo largo de cada una de las varillas.

Puesto que este tipo de electrodos son importados, las informaciones sobre su fabricación son difíciles de obtener. Interesa poder determinar como se encuentra el torio en la varilla, si únicamente está en la superficie o sólo en el extremo inferior, ya que el electrodo se desecha cuando se consumen los dos tercios de su longitud.

La determinación del contenido de torio se realiza para comprobar si es real el contenido del 2% en óxido de torio y si se encuentra uniformemente repartido a lo largo de toda la varilla. Este porcentaje se refiere a un valor medio que varía entre 1,7 y 2,2%. Los valores teóricos de la actividad de torio para el isótopo de peso atómico 232 (el más abundante de los cuatro isótopos naturales existentes en las distintas cadenas) en Bequerelios (Bq) para 1 gramo de electrodo y para tres porcentajes distintos de óxido, se presentan en la siguiente tabla.

<i>Porcentaje óxido</i>	<i>Actividad Th^{232}</i>
1,7 %	61,16 Bq/gr
2 %	71,8 Bq/gr
2,2 %	79,22 Bq/gr

Tabla VII.1: Actividad Th^{232} según porcentaje de óxido de torio

El método radioquímico que se ha llevado a cabo para el análisis alfa de estas muestras es el de coprecipitación con hierro, (Procedimiento IV.1 del Capítulo IV), utilizando como trazador interno el isótopo artificial Th^{229} . La cantidad aconsejable de varilla sometida a digestión ha resultado ser de 100 miligramos, ya que para valores superiores se advierten serias dificultades para la purificación del torio, ya que el tungsteno forma precipitados en forma de óxidos (WO_3 , precipitado amarillo) de muy baja solubilidad [3] en las condiciones de trabajo, lo que hace necesaria la filtración al inicio de la etapa de purificación, dando lugar a un rendimiento químico no superior al 30 %. Se mejora el rendimiento al incluir la etapa de preconcentración de torio por coprecipitación con hierro hasta valores del 94%. En este estudio no es imprescindible conocer este valor para el cálculo de las actividades, ya que la actividad del radionucleido problema se determina como el cociente entre el número de cuentas del isótopo considerado y el del trazador en el espectro de emisiones alfa y multiplicadas por la actividad inicial de trazador añadido. Indicamos en la tabla siguiente las energías e intensidades de las emisiones alfa de los isótopos de torio.

<i>Isótopo</i>	<i>E (keV)</i>	<i>Intensidad (%)</i>
Th^{232}	3.947,2	21,7
	4.012,3	78,2
Th^{230}	4.620,5	23,4
	4.687,0	76,3
Th^{228}	5.340,36	27,2
	5.423,15	72,2
Th^{229}	4.814,6	9,3
	4.838,0	5,0
	4.845,3	56,2
	4.901,0	10,2
	4.967,5	5,97
	4.978,5	3,17
	5.053,0	6,6

Tabla VII.2: Energías e intensidades de las emisiones alfa de los isótopos de torio.

Los espectros obtenidos por espectrometría alfa son característicos para cada uno de los isótopos y el espectro completo obtenido para cada una de las seis muestras de electrodos es semejante. En la siguiente Figura VII.1. se observa con más detalle las líneas de emisión más relevantes para cada uno de los isótopos de torio. En la Figura VII.2. se incluye el espectro correspondiente a uno de los electrodos toriados analizados en este trabajo.

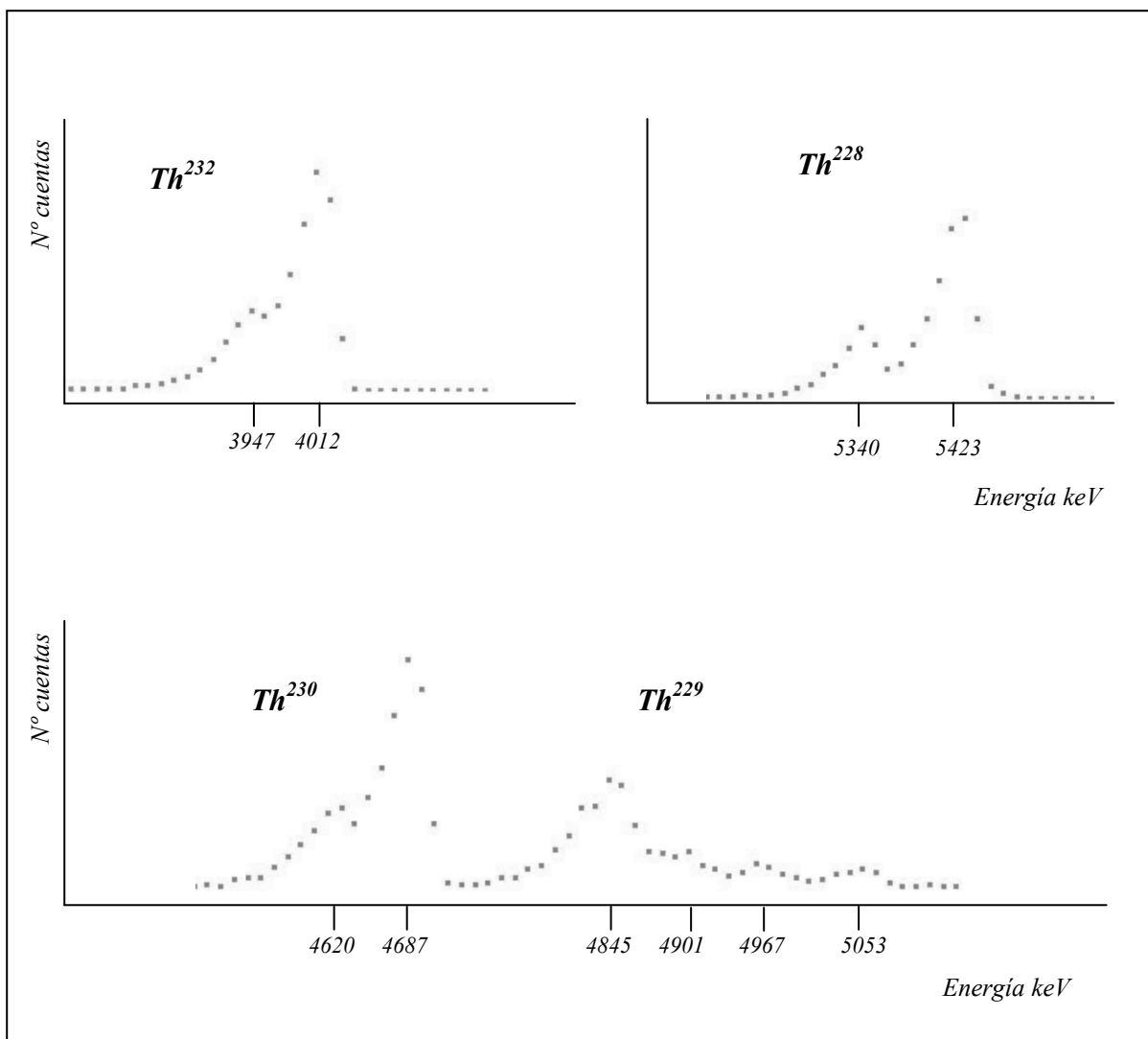


Figura VII.1: Espectros de emisión alfa de los isótopos de torio en los electrodos TIG

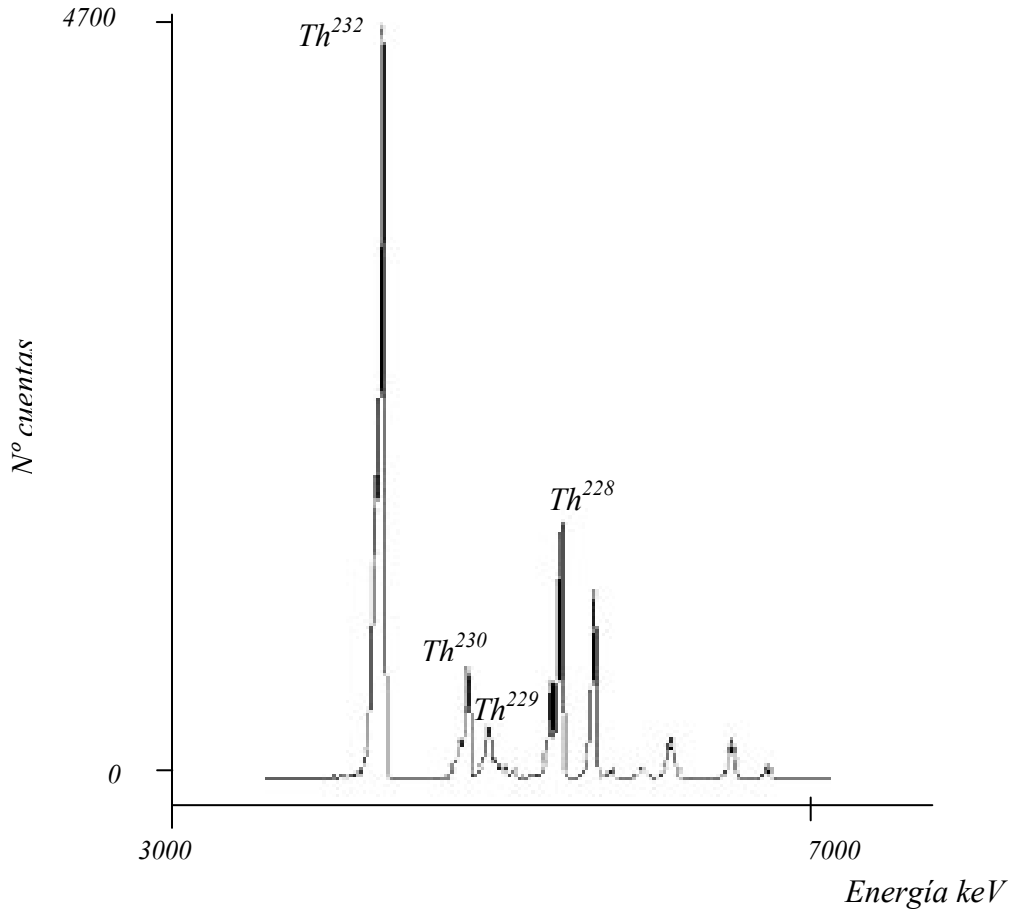


Figura VII.2: Espectro de las emisiones alfa del torio en los electrodos TIG toriados

La concentración, expresada en Bq/gr de electrodo, para los isótopos Th^{232} , Th^{228} y Th^{230} , junto con los valores de incertidumbre y actividad mínima detectable se muestran a continuación en las siguientes tablas para los distintos diámetros y para las dos marcas. El Th^{230} es separado en la etapa de purificación del torio y por eso acompaña al Th^{232} , apareciendo también en el espectro de emisiones alfa.

	Diámetro (mm)	Th^{232} Bq/gr	Incertidumbre Bq/gr	AMD Bq/gr
Marca 1	1	78,9	0,77	1,26E-04
	2,4	64,4	0,41	6,26E-05
	4	60,5	0,53	3,06E-05
Marca 2	1	51,4	0,58	7,45E-05
	2,4	63,0	0,84	8,72E-05
	4	62,9	0,55	3,30E-05

	Diámetro (mm)	Th^{228} Bq/gr	Incertidumbre Bq/gr	AMD Bq/gr
Marca 1	1	20,23	0,39	2,21E-04
	2,4	20,4	0,23	8,41E-05
	4	18,46	0,32	5,39E-05
Marca 2	1	19,17	0,35	1,00E-04
	2,4	24,30	0,52	1,53E-04
	4	23,74	0,33	5,81E-05

	Diámetro (mm)	Th^{230} Bq/gr	Incertidumbre Bq/gr	AMD Bq/gr
Marca 1	1	11,44	0,29	1,26E-04
	2,4	8,96	0,15	6,26E-05
	4	9,58	0,21	3,06E-05
Marca 2	1	6,39	0,20	7,45E-05
	2,4	8,17	0,30	8,72E-05
	4	9,96	0,21	3,31E-05

Tablas VII.3: Contenido de los distintos isótopos de torio en los electrodos TIG con un 2%, aproximadamente, de óxido de torio de dos marcas comercializadas en España.

Como conclusión se puede decir que los valores experimentales de actividad en Bq/gr obtenidos para el Th^{232} cuyo rango va desde 51,4 a 78,9 Bq/gr, coinciden con los teóricos previstos según el porcentaje en óxido en torio, teniendo en cuenta que ese 2% representa el valor medio entre una posible variación de 1,7 a 2,2% en ThO_2 .

Por otra parte los segmentos analizados pertenecen a distintos fragmentos de los electrodos y parece ser que la distribución del torio es uniforme a lo largo de toda la varilla.

La presencia de Th^{230} , procedente de la desintegración de U^{238} , hace necesaria la determinación de la cantidad de uranio presente en el electrodo y que procede del mineral de partida, ya que frecuentemente uranio y torio se encuentran presentes simultáneamente en los minerales naturales y en particular en la monacita.

VII.2.- RADIATIVIDAD DE URANIO EN LOS ELECTRODOS TORIADOS

Se ha llevado a cabo la determinación de torio y uranio de forma secuencial en la misma separación radioquímica según el Procedimiento IV.2 del Capítulo IV. Se han analizado tres fragmentos de electrodo de 1mm de diámetro y un fragmento de un electrodo de 2 mm. de diámetro. Todos los fragmentos estudiados contienen aproximadamente un 2% en óxido de torio. En la tabla siguiente se resumen las energías más importantes de los isótopos de uranio así como sus intensidades.

<i>Isótopo</i>	<i>E (keV)</i>	<i>Intensidad</i>
U^{238}	4.038,5	0,078
	4.151,5	20,9
	4.198,3	79,0
U^{234}	4.722,4	28,43
	4.774,6	71,38
U^{232}	5.139,0	0,30
	5.263,36	31,55
	5.320,12	68,15

Tabla VII.4: Energías e intensidades de las emisiones alfa de los isótopos de uranio

Los resultados obtenidos por espectrometría alfa para los distintos isótopos de uranio se presentan a continuación.

Electrodos 1 mm	Trazador U^{232}	U^{238}	U^{234}	AMD (Bq)	Rdto%
<i>Fragmento 1</i>	0,032 Bq	No detectado	No detectado	4,26E-04	70
<i>Fragmento 2</i>	0,032 Bq	No detectado	No detectado	5,77E-04	53
<i>Fragmento 3</i>	0,008 Bq	No detectado	No detectado	3,66E-04	81
Electrodo 2mm	Trazador U^{232}	U^{238}	U^{234}	AMD(Bq)	Rdto%
<i>Fragmento 4</i>	0,008 Bq	No detectado	No detectado	3,22E-04	94

Tabla VII.5: Contenido de uranio en los electrodos TIG toriados 2%

No se detecta la presencia de U^{238} ni de U^{234} , en este caso se han calculado los rendimientos del procedimiento para comprobar que no se ha perdido ninguna fracción. Estos valores varían del 53% al 94%.

Se concluye que los electrodos analizados no contienen cantidades apreciables de uranio y que la presencia del isótopo Th^{230} , procedente de la cadena de desintegración del U^{238} , es debido a que es aislado también en la purificación de torio en la primera extracción a partir de la monacita.

La validación del método para la determinación de los isótopos de Th y U se realizó mediante la participación en un ejercicio de intercomparación analítica entre laboratorios de radiactividad ambiental, organizada por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) para la campaña de evaluación de radionucleidos en muestras ambientales del 2005-2006. La muestra analizada fueron unas cenizas vegetales conteniendo los radionucleidos en concentraciones ambientales. Los valores de referencia estimados como un valor medio de actividad a partir de los resultados emitidos por tres laboratorios de experiencia acreditada expresados como: Actividad \pm Incertidumbre ($k=1$) en Bq/kg para el Th^{230} fue de $6,4 \pm 0,3$ y para el U^{238} de $7,50 \pm 0,37$. Los valores obtenidos fueron para el Th^{230} de $6,71 \pm 0,5$ Bq/kg y para el U^{238} de $7,8 \pm 0,6$ Bq/kg.

VII.3.- RADIATIVIDAD EN LOS ELECTRODOS TIG CERIADOS Y LANTANADOS.

Como se ha comentado anteriormente los electrodos TIG toriados están siendo sustituidos por electrodos aleados con óxido de cerio u óxido de lantano. Estos elementos suelen ir acompañados de torio en el mineral de donde se extraen, es necesario determinar el contenido de torio en las varillas de cerio y lantano para confirmar la presencia de isótopos de torio.

El material de partida en este caso son dos muestras de varillas de 2 mm. de diámetro y con un contenido del 2% en óxido de cerio y óxido de lantano respectivamente. El método de separación radioquímica utilizado con este tipo de varillas es el mismo que el de electrodos toriados, el de coprecipitación con hidróxido de hierro (Procedimiento IV.1. del Capítulo IV). La determinación de actividades se realiza según el cálculo de dilución isotópica, con trazador interno de Th^{229} certificado.

Los resultados obtenidos para los distintos isótopos en los electrodos ceriados y lantanados, que son los que suelen sustituir a los toriados con un 2% en óxido de torio, se muestran en la tabla siguiente.

	<i>Trazador Th^{229}</i>	<i>Th^{232} (Bq/gr)</i>	<i>Incertidumbre (Bq/gr)</i>	<i>AMD(Bq/gr)</i>
<i>Electrodo Ce</i>	1,56 Bq	0,20	1,12E-02	3,44E-03
<i>Electrodo La</i>	1,56 Bq	0,42	1,14E-02	5,20E-04

	<i>Trazador Th^{229}</i>	<i>Th^{228} (Bq/gr)</i>	<i>Incertidumbre (Bq/gr)</i>	<i>AMD (Bq/gr)</i>
<i>Electrodo Ce</i>	1,56 Bq	0,056	6,12E-03	6,05E-03
<i>Electrodo La</i>	1,56 Bq	0,134	6,44E-03	6,98E-04

	<i>Trazador Th²²⁹</i>	<i>Th²³⁰ (Bq/gr)</i>	<i>Incertidumbre (Bq/gr)</i>	<i>AMD (Bq/gr)</i>
<i>Electrodo Ce</i>	1,56 Bq	0,063	6,34E-03	3,44E-03
<i>Electrodo La</i>	1,56 Bq	No detectado	0,45	5,20E-04

Tablas VII.6: Contenido de los distintos isótopos de torio en los electrodos de cerio y lantano

Se concluye que las actividades de torio en los electrodos que contienen óxido de cerio u óxido de lantano no son significativas, es decir las concentraciones de los isótopos de torio en los electrodos que vienen a sustituir a los toriados son mínimas. De esta manera se ha comprobado que aunque el torio acompaña al cerio y al lantano en los minerales de partida, los electrodos fabricados con el óxido de éstos contienen torio en pequeñas cantidades.

CAPITULO VIII

RADIOACTIVIDAD Y DOSIMETRIA EN LOS PROCESOS DE SOLDADURA CON LOS ELECTRODOS TORIADOS

VIII.1. RADIOACTIVIDAD DURANTE LOS ENSAYOS DE SOLDADURA

En este capítulo se procede al estudio del campo de radiación [70] y la contaminación que se puede producir en el usuario de este tipo de soldadura y en el entorno del lugar de utilización. Para evaluar la transferencia a la atmósfera de material radiactivo, se procedió a realizar la simulación del proceso de soldadura manual mediante la utilización de un robot automático trabajando en continuo.

Durante la soldadura se generan aerosoles que podrían depositarse sobre la piel del operador. Además puede existir una contribución a la dosis debida a irradiación interna proveniente de la generación de aerosoles por volatilización de componentes o de productos gaseosos como el radón y el torón.

Se han recogido los productos volátiles generados mediante aspiración en filtros de partículas y para determinar la actividad se ha procedido a realizar la determinación gamma inmediatamente después de finalizado el ensayo, con el fin de examinar los radionucleidos directamente producidos. Algún tiempo después se repitió el análisis gamma para comprobar la presencia de los componentes no volátiles de la cadena de desintegración del Th²³².

Se realizaron para este estudio tres ensayos y se procedió a la aspiración de los productos generados en el entorno del punto de soldadura. Las muestras fueron recogidas utilizando un equipo de aspiración provisto de un filtro para la retención de partículas de polvo y aerosoles producidos durante el proceso de soldadura. El primer ensayo se realizó con un robot para soldadura TIG automática, en el segundo ensayo se llevaron a cabo varias soldaduras manuales y a continuación se estudió también la

posible contaminación durante el afilado de los electrodos, dado que una vez gastados se van acumulando y posteriormente se afilan todos a la vez.

También se analizó el posible depósito que se produce sobre la mano del soldador durante la soldadura manual y el afilado, mediante la colocación de unas etiquetas adhesivas sobre la mano. Los filtros y las etiquetas recogidos se sometieron finalmente a análisis por espectrometría alfa para determinar con exactitud la concentración de torio y posteriormente valorar su posible impacto en términos de dosis recibida por los usuarios en las diversas etapas.

Este estudio se llevó a cabo en un Taller-Escuela de formación en procesos de soldadura de conocido prestigio en Zaragoza. Los electrodos utilizados en los diversos ensayos fueron de tungsteno de 2,4 mm de diámetro, por ser los más utilizados habitualmente y con un contenido del 2% aproximadamente en óxido de torio. Son los electrodos de la marca 1, utilizados en el estudio de la cadena de desintegración del Th^{232} Capítulo VI. de esta tesis.

Las partículas de polvo se recogieron mediante la actuación de un muestreador portátil con una bomba de aspiración Saic Radecco con un caudal ajustable entre 0,04 y 6 m³/h, provisto de una boquilla de aspiración donde se alojan los filtros de nitrocelulosa, marca Millipore de 47 mm. de diámetro y un diámetro de poro de 8 micras. El caudal de aspiración se ajustó a 1,8 m³/h. La localización de la boquilla se realizó teniendo en cuenta que interesa conocer la calidad del aire que respira el operario y orientado en la dirección de inhalación.

Inicialmente se llevó a cabo un muestreo del aire ambiente de la nave de 1.520 m³ que nos ha servido como fondo. Dentro de esta nave se encuentran diversas cabinas aisladas parcialmente mediante unas cortinas, dentro de las cuales se realizan los diversos ensayos. La toma de muestras del fondo se realizó con el mismo muestreador que los ensayos de soldadura manual durante un tiempo de 11 horas, recogiendo un volumen de aire de 15,403 m³. Este filtro se sometió a análisis por espectrometría gamma y alfa.

VIII.1.1. Ensayo de soldadura TIG con equipo automático

El proceso de soldadura TIG automática se realiza con un equipo FROLUFTIG 2500TEC utilizado con corriente continua, trabajando con 140 amperios de intensidad, y con gas argón a un flujo de 12 l/min. Se realiza la soldadura de una chapa de acero inoxidable con una velocidad de avance del brazo del robot de 8 mm /segundo y sin realizar ningún aporte de material. La boquilla de aspiración se fija al brazo extensible del robot, moviéndose conforme avanza el trabajo de soldadura.

La captación de partículas tiene lugar a unos 40 cm. aproximadamente del punto exacto de soldadura, con un caudal de 1,8 m³/h. Este ensayo sirve para simular el posible impacto del proceso si el trabajador permaneciera ese tiempo realizando la soldadura.

Podemos observar a continuación dos fotografías del ensayo realizado con el robot automático, situado en una zona del taller sin ventilación forzada.



Fotografía VIII.1: Ensayo de soldadura con el robot automático. Detalle de la colocación del captador.

Se realizaron cuatro soldaduras con una duración en el tiempo de 75, 120, 132 y 150 minutos respectivamente. El electrodo utilizado fue de tungsteno toriado con el 2% de óxido de torio, de 150 mm de longitud y 2,4 mm. de diámetro. En las cuatro pruebas realizadas en el mismo robot consecutivamente, se utilizó el mismo electrodo toriado. Dicho electrodo se afiló una sola vez, antes de cada una de las soldaduras, esto es debido a que el electrodo queda muy fijo en el soporte de este tipo de soldadura y apenas se deteriora. Se trata de una soldadura en continuo durante más de una hora, en dicho trabajo el soldador no permanece de forma continuada al lado del equipo, aunque este tipo de ensayos nos sirve para poder estimar el efecto producido para tiempos de trabajo mayores, en los que el operador permanece soldando.

En la siguiente tabla aparecen los volúmenes aspirados y los depósitos de partículas recogidos en cada uno de los filtros.

	<i>Filtro</i>	<i>Tiempo(min)</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Depósito (gr)</i>
<i>Robot Automático</i>	1	75	2,250	1,5E-03
	2	120	3,600	1,4E-03
	3	132	3,960	4,6E-03
	4	150	6,150	4,4E-03

Tabla VIII.1: Volumen de aspiración y peso de material depositado en los filtros del ensayo de soldadura automática.

Se realizó el análisis por espectrometría gamma de los filtros 1 y 2 inmediatamente después de la realización del ensayo y luego transcurridos varios días se repitieron estas medidas. Posteriormente los filtros se sometieron a separación radioquímica según el procedimiento 4.3. del Capítulo IV y a continuación el correspondiente análisis por espectrometría alfa.

VIII.1.2. Ensayo de soldadura TIG manual con operador

En el ensayo de soldadura manual se maneja un equipo Prestotig 300 de Air Liquide-Oerlikon en corriente continua, trabajando a 80-90 amperios y con un flujo de gas argón de 8 l/min. En este caso se utiliza una varilla de aportación TR 7056 de 2,4 mm. de diámetro durante la soldadura de una pieza de acero inoxidable.

A continuación se presenta una imagen del ensayo de soldadura manual, donde se observa la colocación de la boquilla de aspiración. Esta soldadura tuvo lugar en unas zonas adaptadas con unas cabinas separadas por unos telones y sin ventilación forzada.

Boquilla de aspiración



Fotografía VIII.2: Ensayo de soldadura manual

Se realizaron tres soldaduras manuales de aproximadamente 15 a 20 minutos de duración, utilizando cuatro electrodos de tungsteno toriado de 2,4 mm de diámetro y con un contenido del 2% en óxido de torio. Se utilizaron cuatro electrodos, éstos se van sustituyendo uno tras otro conforme se deteriora el extremo, la soldadura se detiene cuando el electrodo se sustituye y se reanuda tras el cambio de electrodo. No es por

tanto un trabajo continuo como en el caso anterior, hay que tener en cuenta las paradas y la colocación de la pieza a soldar; una vez utilizados los electrodos, se afilaron todos juntos. El tiempo de utilización de cada electrodo varía fundamentalmente en función de la destreza del soldador y de la dificultad de la soldadura. En la siguiente tabla aparecen los volúmenes aspirados y los depósitos de partículas recogidos en cada uno de los filtros.

	<i>Filtro</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Depósito (gr)</i>
<i>Soldadura manual</i>	5	1,508	3,7E-03
	6	2,272	4,8E-03
	7	1,141	3,2E-03

Tabla VIII.2: Volumen de aspiración y peso de material depositado en los filtros del ensayo de soldadura manual.

Estos filtros se sometieron a separación radioquímica por el mismo procedimiento que los recogidos en el ensayo con soldadura automática para determinación del contenido de los distintos isótopos de torio por espectrometría alfa.

Para poder conocer el posible depósito sobre la piel del trabajador, se colocó una etiqueta adhesiva sobre la parte superior de la mano del operador durante el trabajo de soldadura, aunque como observamos en la fotografía lo conveniente es la utilización de guantes de protección durante este trabajo. Se analizó el material depositado en la cinta adhesiva por espectrometría alfa. En la siguiente tabla aparecen los volúmenes de aspiración y la superficie valorada.

	<i>Adhesivo</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Superficie (cm²)</i>
<i>Soldadura manual</i>	I	1,508	40
	II	2,272	26
	III	1,141	27,5

Tabla VIII.3: Volumen de aspiración y superficie de los adhesivos del ensayo de soldadura manual.

VIII.1.3. Ensayo de afilado de los electrodos

En los trabajos con soldadura TIG, lo corriente es realizar el trabajo sustituyendo los electrodos conforme sus extremos pierden afilado, éstos se reservan para afilarlos posteriormente todos juntos sin necesidad de detener el trabajo del operador. En soldadura manual las varillas son sustituidas dependiendo de la pericia del soldador. El afilado de cada una de las varillas suele durar entre 30 y 90 segundos dependiendo de la técnica y experiencia del soldador [71]. Se han llevado a cabo diversos estudios en relación con este particular [72], registrándose que el número de afilados por hora varía entre 0,33 y 4,4 con una media de 0,82 por hora; se estudió la actividad del torio que puede ser inhalado durante este proceso. Al igual que en los ensayos anteriores se recogió el aire mediante el uso de muestreador, provisto de un filtro millipore.

En la siguiente imagen puede apreciarse el estado en que queda el extremo de la varilla después de soldar y que hace necesario su afilado.



Fotografía VIII.3: Extremo de la varilla de tungsteno toriado de 2,4 mm. de diámetro después de su utilización en soldadura manual.

Los electrodos utilizados en los trabajos de soldadura manual realizados con motivo de esta memoria, se recogen una vez utilizados y se procede al afilado de todos ellos de forma continua. El afilado tiene lugar en una muela de afilar de marca Superlema, con piedra Tyrolit Zt063 de 18 centímetros de diámetro por 24 milímetros de grosor.

A continuación aparece la imagen del trabajo en la piedra de afilar, donde se observa la colocación de la boquilla y en detalle la distintas posiciones de la varilla sobre la piedra para que el afilado sea lo más homogéneo y eficaz posible.



Fotografía VIII.4: Ensayo de afilado de las varillas de tungsteno toriado de 2,4 mm. de diámetro. Detalle de la piedra en el momento del afilado.

La cantidad de electrodo que puede perderse durante el afilado puede llegar a ser de hasta 0,4 gr. según otros trabajos publicados [42]. Se pesaron los electrodos antes y después del afilado para conocer el material que puede depositarse en ese momento y se colocó en la mano del operador una etiqueta adhesiva para estudiar el posible efecto sobre la piel.

En la siguiente tabla aparecen las diferencias de peso en cinco de los electrodos utilizados durante los ensayos de soldadura manual. La cantidad media de varilla eliminada en el proceso de afilado es de 0,2890 gr.

Electrodo	Peso inicial(gr)	Peso final (gr)	Electrodo perdido
<i>Varilla 1</i>	12,6105	12,3083	0,3022
<i>Varilla 2</i>	12,3459	12,1007	0,2452
<i>Varilla 3</i>	12,6340	12,3345	0,2995
<i>Varilla 4</i>	12,5226	12,2440	0,2786
<i>Varilla 5</i>	12,6772	12,3577	0,3195

Tabla VIII.4: Peso de los cinco electrodos toriados después de afilarlos y que son los utilizados en los ensayos de soldadura manual.

En esta fase se realizaron tres afilados de los electrodos utilizados en soldadura manual, se situó el muestreador con filtro millipore lo más cerca posible del trabajador. Se recogieron tres filtros y tres etiquetas adhesivas que se analizaron por espectrometría alfa, siendo previamente sometidos al procedimiento de separación radioquímica como en los dos casos anteriores.

En la siguiente tabla aparecen los volúmenes aspirados y los depósitos de partículas recogidos en cada uno de los filtros.

<i>Afilado</i>	<i>Filtro</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Depósito (gr)</i>
	8	0,100	0,3E-03
	9	0,072	0,3E-03
	10	0,087	0,4E-03

Tabla VIII.5: Volumen de aspiración y peso de material depositado en los filtros durante el ensayo de afilado de los electrodos.

Se analizó el material depositado en la cinta adhesiva por espectrometría alfa. En la siguiente tabla aparecen los volúmenes de aspiración y la superficie valorada.

<i>Afilado</i>	<i>Adhesivo</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Superficie (cm²)</i>
	IV	0,100	27,50
	V	0,072	31,50
	VI	0,087	16,32

Tabla VIII.6: Volumen de aspiración y superficie de los adhesivos del ensayo de afilado de los electrodos.

VIII.1.4. Análisis por espectrometría gamma

Se realizó el análisis por espectrometría gamma del filtro recogido en la toma de muestras del fondo ambiente para poder descontar, en las líneas de interés del espectro de las muestras de los distintos ensayos, los valores correspondientes a este fondo. Los resultados obtenidos para los isótopos analizados dieron valores inferiores a la actividad mínima detectable. Este filtro se analizó posteriormente por espectrometría alfa.

El análisis gamma de los dos primeros filtros (denominados filtros 1 y 2 de la tabla VIII.1) recogidos en el ensayo de soldadura con el robot automático, se llevó a cabo inmediatamente después de la toma de muestras para determinar los radionucleidos directamente producidos y se repitió la medida unos días después una vez que el radón hubiese decaído a descendientes de mayor periodo (Pb^{212}), con el fin de determinar el actinio y el plomo que provienen de la desintegración del Ra^{228} .

La calibración del detector de germanio se realizó durante dos horas con un filtro millipore de 47 mm. de diámetro en una cápsula hermética certificado por el Laboratorio de la Unidad de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) que contiene los siguientes nucleidos: Am^{241} , Co^{60} , Cs^{137} , Sr^{90} , Ba^{133} y Eu^{152} .

A continuación se presentan los espectros gamma del primer filtro recogido de la soldadura automática en el robot. Dicho filtro se llevó al laboratorio inmediatamente después de la aspiración, para su medición por espectrometría gamma. En el segundo espectro aparecen las emisiones gamma registradas en el detector unos días después. Puede observarse cómo con el paso del tiempo, aparecen algunos de los radioisótopos emisores gamma de la cadena del Th^{232} .

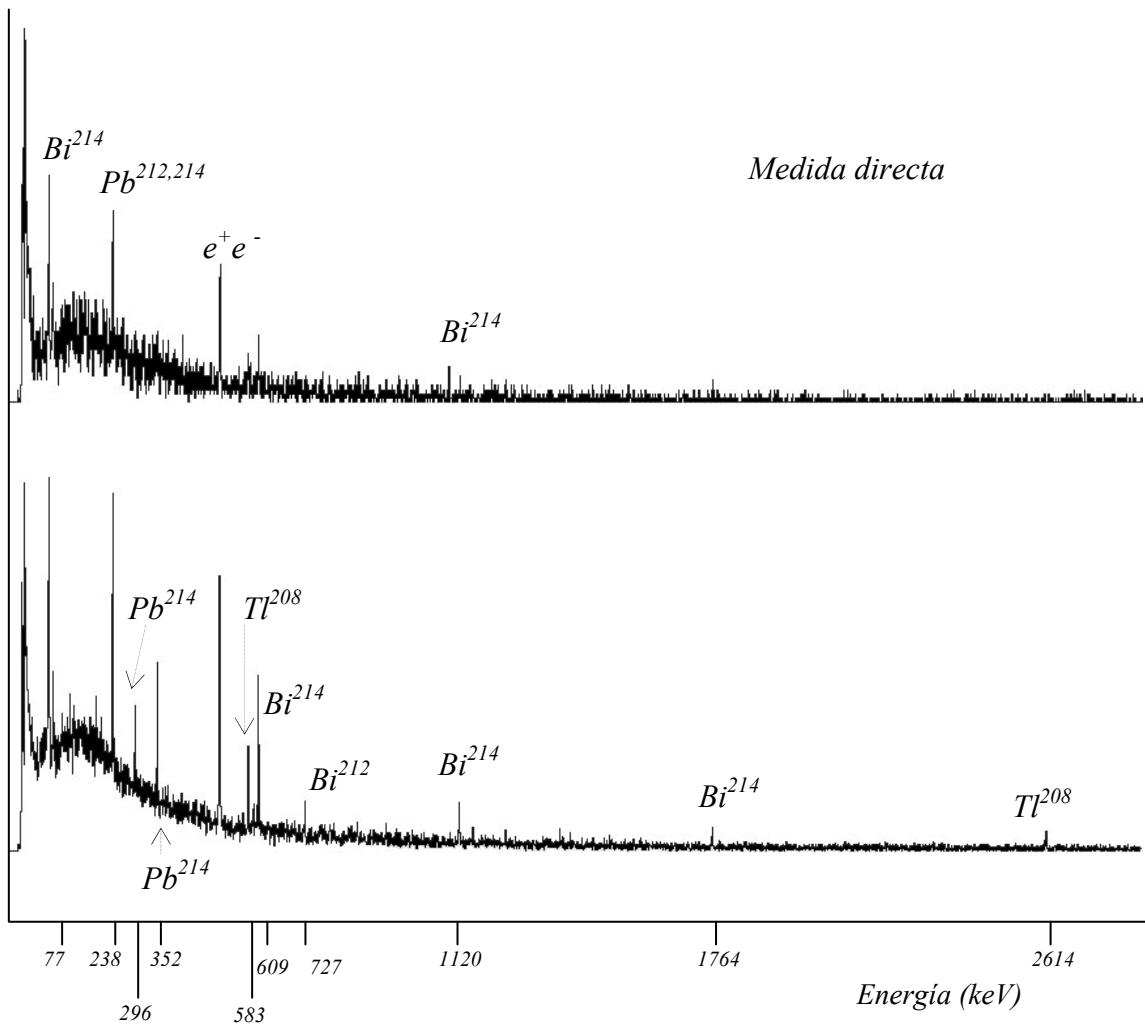


Figura VIII.1: Espectros gamma del filtro 1 del ensayo de captación durante la soldadura en robot automático. En la parte superior medición inmediata. En la parte inferior se muestra el espectro gamma unos días después.

Para verificar por espectrometría gamma la presencia de torio en el filtro, se analizaron en el espectro los nucleidos descendientes del Th^{232} que son emisores gamma:

Pb^{212} , en la línea de emisión de energía de 238,6 keV de intensidad del 43,34%

Tl^{208} , en la línea de emisión de energía de 583 keV de intensidad del 84,57%

Bi^{212} , en la línea de emisión de energía de 727,2 keV de intensidad del 6,58%

Ac^{228} , en la línea de emisión de energía de 911,16 keV de intensidad del 25,84%

Las energías e intensidades de estos isótopos son las descritas por Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Isotopes Project y Lunds University [7].

En la siguiente tabla se muestran las actividades de los isótopos emisores gamma descendientes de la cadena de desintegración del Th^{232} , recogidos en el primer filtro y medidos en el detector gamma transcurridos unos días. Los valores de actividad, incertidumbre y actividad mínima detectable vienen expresados como bequerelios por metro cúbico de aire aspirado.

Isótopo	Energía (keV)	Intensidad (%)	Actividad (Bq/m ³)	Incertidumbre (Bq/m ³) (k=1)	AMD (Bq/m ³)
Pb^{212}	238,63	43,34	6,496E-02	1,164E-02	8,796E-03
Tl^{208}	583,19	84,57	3,427E-02	9,107E-03	6,358E-03
Bi^{212}	727,33	6,58	1,141E-01	8,188E-02	6,958E-02

Tabla VIII.7: Actividades en bequerelios/m³ de Pb^{212} , Tl^{208} , Bi^{212} en el filtro 1 recogido en el ensayo de soldadura automática

Se confirma la presencia del torio en estos filtros por la aparición, transcurridos unos días, de los isótopos emisores gamma descendientes de la cadena de desintegración del Th^{232} . Se detecta en el espectro de emisiones gamma que el Pb^{212} , el Bi^{212} y el isótopo Tl^{208} . La cuantificación de los distintos isótopos de torio se realizó mediante análisis por espectrometría alfa.

VIII.1.5. Análisis por espectrometría alfa. Determinación de torio

El análisis por espectrometría alfa permite determinar si existe transferencia de partículas del electrodo a la atmósfera y cuantificar con mucha precisión, las cantidades relativas de los distintos isótopos de torio. Los resultados obtenidos hacen referencia en primer lugar a los cuatro ensayos con el robot automático del que se recogieron cuatro filtros; en segundo lugar los resultados se refieren a tres ensayos realizados con un soldador en una cabina semicerrada en la que se obtuvieron tres filtros y tres etiquetas adhesivas colocadas sobre la mano del soldador. En la tercera parte de este apartado se indican los resultados obtenidos del ensayo de afilado de los electrodos toriados.

Como ya se ha comentado se realizó la toma de muestras del fondo ambiente del taller escuela para poder confirmar que el torio existente se debía a la exposición durante los procesos de soldadura. La espectrometría alfa de este filtro dio como resultado valores por debajo de la actividad mínima detectable para los distintos isótopos de torio y con un rendimiento del procedimiento próximo al 100%

VIII.1.5.1. Resultados de los ensayos de soldadura automática

Los filtros recogidos del ensayo de soldadura automática se analizaron de forma individual por espectrometría alfa. El procedimiento de separación radioquímica aplicado a este tipo de muestras fue el descrito en el Capítulo IV.3., procedimiento de separación de torio en muestras de papel de filtro, basado en el método de Gäfvert [42].

Se utilizó como trazador interno Th^{229} , de una disolución patrón de $20,9 \pm 0,3$ Bq/gr preparada por el Laboratorio de la Unidad de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). La fuente radiactiva alfa para su posterior análisis en el sistema de espectrometría alfa, se realizó según el método descrito en el Capítulo V, preparación de fuentes radiactivas para espectrometría alfa, mediante el procedimiento de electrodeposición.

En la siguiente figura se presenta el espectro de emisiones alfa de uno de los filtros analizados en el espectrómetro alfa, medido durante siete días para obtener una buena estadística en el número de cuentas por cada uno de los isótopos.

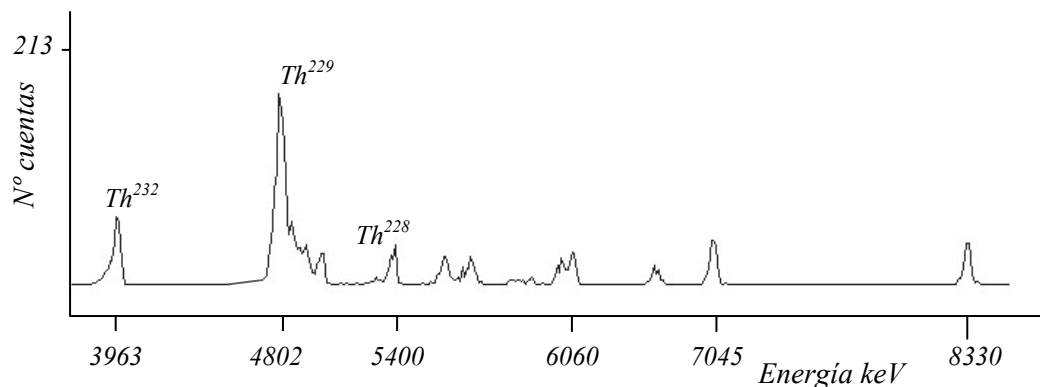


Figura VIII.2: Espectro de emisiones alfa del filtro 1 del ensayo de soldadura automática.

A continuación en las siguientes tablas se presentan las actividades expresadas en bequerelios por metro cúbico de aire aspirado con el muestreador para los isótopos de torio Th²³², Th²²⁸ y Th²³⁰ de cada uno de los cuatro filtros.

Th ²³²	Actividad Bq/m ³	Incertidumbre Bq/m ³ (k=1)	AMD Bq/m ³	Rendimiento %
Filtro 1	8,800E-04	6,551E-05	4,091E-05	98,31
Filtro 2	1,735E-04	2,318E-05	2,562E-05	99,02
Filtro 3	3,651E-04	4,753E-05	3,660E-05	63,50
Filtro 4	No detectado	-	1,469E-05	98,03

Tabla VIII.8: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²³².

Th²²⁸	Actividad Bq/m³	Incertidumbre Bq/m³(k=1)	AMD Bq/m³	Rendimiento %
<i>Filtro 1</i>	<i>2,776E-04</i>	<i>3,679E-05</i>	<i>5,499E-05</i>	<i>98,31</i>
<i>Filtro 2</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>3,444E-05</i>	<i>99,02</i>
<i>Filtro 3</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>4,920E-05</i>	<i>63,50</i>
<i>Filtro 4</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>2,586E-05</i>	<i>98,03</i>

Tabla VIII.9: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²²⁸.

Th²³⁰	Actividad Bq/m³	Incertidumbre Bq/m³(k=1)	AMD Bq/m³	Rendimiento %
<i>Filtro 1</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>4,091E-05</i>	<i>98,31</i>
<i>Filtro 2</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>2,562E-05</i>	<i>99,02</i>
<i>Filtro 3</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>3,660E-05</i>	<i>63,50</i>
<i>Filtro 4</i>	<i>No detectado</i>	<i>-</i>	<i>1,469E-05</i>	<i>98,03</i>

Tabla VIII.10: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²³⁰.

Los resultados obtenidos para el isótopo Th²³² con soldadura automática son semejantes a los obtenidos en otros trabajos [42, 71, 73] que fueron del orden de $2 \cdot 10^{-4}$ Bq/m³, con corriente continua. Se han publicado diversos estudios con corriente alterna, lo que supone la utilización del equipo de soldadura trabajando a mayor intensidad y que exige mayor espesor del material de trabajo. Normalmente los datos publicados en este campo se refieren a soldaduras manuales trabajando con corriente continua o alterna según el tipo de trabajo realizado en ese momento por el soldador. Con los datos obtenidos con el robot automático podemos estimar el trabajo en continuo de un trabajador que se mantuviera soldando una hora como mínimo, cuando en la realidad este tiempo el soldador lo invierte tanto en soldar como en colocar las piezas con las que trabaja.

Las cantidades del isótopo Th²²⁸, expresadas como concentración de la actividad son muy pequeñas, se mantienen las relaciones de concentración entre los dos isótopos

$\text{Th}^{228}/\text{Th}^{232}$, que en el caso del filtro 1 es igual a 0,31. No aparecen cantidades apreciables de Th^{230} , que procederían del isótopo de U^{238} en los filtros.

VIII.1.5.2. Resultados de los ensayos de soldadura manual.

Resultados obtenidos en los filtros de soldadura manual.

Los filtros recogidos del ensayo de soldadura manual, al igual que los filtros del automático se analizaron de forma individual por espectrometría alfa. El procedimiento de separación radioquímica aplicado a este tipo de muestras, fue el descrito en el Capítulo IV.3. Procedimiento de separación de torio en muestras de aerosoles en filtros, basado en el método de Gäfvert [42].

Se utilizó como trazador interno Th^{229} , de una disolución patrón de $20,9 \pm 0,3$ Bq/gr preparada por el Laboratorio de la Unidad de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

La fuente alfa se preparó según el método descrito en el Capítulo V, preparación de fuentes radiactivas para espectrometría alfa, mediante el procedimiento de electrodeposición y posteriormente se analizó en el sistema de espectrometría alfa.

A continuación se presentan en las siguientes tablas las actividades expresadas como bequerelios por metro cúbico de aire que atraviesa el captador para los isótopos de torio Th^{232} , Th^{228} y Th^{230} de cada uno de los tres filtros de la soldadura manual.

Th²³²	Actividad Bq/m³	Incertidumbre Bq/m³(k=1)	AMD Bq/m³	Rendimiento %
<i>Filtro 5</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,051E-04</i>	<i>98,00</i>
<i>Filtro 6</i>	<i>3,001E-03</i>	<i>1,227E-04</i>	<i>4,024E-05</i>	<i>97,90</i>
<i>Filtro 7</i>	<i>4,587E-03</i>	<i>2,390E-04</i>	<i>7,904E-05</i>	<i>96,57</i>

Tabla VIII.11: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²³²

Th²²⁸	Actividad Bq/m³	Incertidumbre Bq/m³(k=1)	AMD Bq/m³	Rendimiento %
<i>Filtro 5</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,849E-04</i>	<i>98,00</i>
<i>Filtro 6</i>	<i>1,356E-03</i>	<i>8,207E-05</i>	<i>7,081E-05</i>	<i>97,90</i>
<i>Filtro 7</i>	<i>2,393E-03</i>	<i>1,728E-04</i>	<i>1,391E-05</i>	<i>96,57</i>

Tabla VIII.12: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²²⁸.

Th²³⁰	Actividad Bq/m³	Incertidumbre Bq/m³(k=1)	AMD Bq/m³	Rendimiento %
<i>Filtro 5</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,051E-04</i>	<i>98,00</i>
<i>Filtro 6</i>	<i>4,273E-04</i>	<i>4,606E-05</i>	<i>4,024E-05</i>	<i>97,90</i>
<i>Filtro 7</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>7,904E-05</i>	<i>96,57</i>

Tabla VIII.13: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²³⁰.

Los valores de concentración obtenidos para el isótopo de Th²³² son semejantes a los que aparecen en diversas publicaciones sobre trabajos realizados también en soldadura manual con este tipo de electrodos. En la siguiente Tabla VIII.14 se presenta un resumen de las concentraciones de actividad encontradas según los distintos autores.

Los valores que se presentan en esta tabla se refieren a trabajos de soldadura manual, las diferencias entre unos y otros son debidas fundamentalmente al tipo de electrodo, al tipo de corriente utilizada continua o alterna y a la intensidad de la misma.

<i>Autor</i>	<i>Th²³² (Bq/m³)</i>	<i>Observaciones</i>
<i>McDowell⁽⁷⁴⁾</i>	<i>6,4E-03</i>	<i>Electrodos WT20. Corriente continua. Estimaciones basadas en Breslin⁽⁷⁵⁾.</i>
<i>Jankovic⁽⁷⁶⁾</i>	<i>0,05E-03--1,5E-03</i>	<i>Electrodos WT20. Corriente continua.</i>
<i>Vinzents⁽⁷³⁾</i>	<i>0,4E-03</i>	<i>Electrodos WT20. Corriente continua.</i>
<i>Crim⁽⁷¹⁾</i>	<i><0,4E-04--3E-04</i>	<i>Electrodos WT20. Corriente continua.</i>
<i>Gäfvvert⁽⁴²⁾</i>	<i>2,7E-03</i>	<i>Electrodos WT20. Corriente continua.</i>
<i>Ludwig⁽⁷²⁾</i>	<i>3,0E-03-- >0,09</i>	<i>En 26 muestras. Corriente alterna</i>
<i>Gäfvvert⁽⁴²⁾</i>	<i>6,9E-03</i>	<i>Electrodos WT20. Corriente alterna</i>
<i>Reichelt⁽⁷⁷⁾</i>	<i>47E-03--142E-03</i>	<i>Electrodos WT40. Corriente alterna.</i>

Tabla VIII.14: Concentración de actividad para el Th²³² en diversas publicaciones.

Las concentraciones de actividad para el Th²³² son del mismo orden de magnitud que las referidas por los distintos autores en aquellos ensayos realizados en condiciones semejantes, es decir con corriente continua y para electrodos toriados con aproximadamente un 2% en óxido de torio.

Los valores de actividad son superiores para electrodos con mayor contenido en óxido de torio (un 4% en el trabajo de Reichelt [77], donde se utilizaron electrodos WT40) y en aquellos en los que la corriente utilizada en el equipo de soldadura es alterna (Saito [78], Ludwig [72] y Reichelt [77]), que implica una mayor intensidad y un mayor desgaste del electrodo, dando lugar a una mayor vaporización y una mayor concentración de torio en la zona de inhalación.

En el trabajo de Gäfvert [42] los valores de concentración de actividad se incrementan con el aumento de la intensidad en aquellos casos en los que se utilizó corriente alterna (Tabla VIII.15). Los datos reflejados en esta tabla son los obtenidos para soldadura manual sin que tuviera lugar ventilación alguna en el lugar donde se realizaba la operación.

Th^{232} (Bq/m ³)	Intensidad AC (amperios)
1,1E-03	120
1,9E-03	120
6,9E-03	130
2,3E-03	150
4,1E-03	150
78E-03	160
141E-03	160

Tabla VIII.15. Concentración de actividad del Th^{232} (1) en soldadura manual realizada con corriente alterna a diversas intensidades.

Al comparar los resultados para el Th^{232} en los filtros durante el ensayo con robot automático (Tabla VIII.8) con los correspondientes a la soldadura manual (Tabla VIII.11), podemos comprobar que en el robot los valores obtenidos para los tres filtros son de 0,88 mBq/m³, 0,173 mBq/m³ y 0,365 mBq/m³, frente a 3 mBq/m³ y 4,587 mBq/m³ del manual. Estas diferencias se deben a que el trabajo realizado con el robot implica un desgaste mínimo del electrodo que permanece fijo en la misma posición sin necesidad de afilarlo durante una hora o más. Mientras que durante la soldadura realizada por un trabajador, el desgaste del electrodo es continuo, cada electrodo puede utilizarse durante varios minutos de forma continuada y se suelen sustituir más frecuentemente las varillas por otras afiladas (los tiempos van a depender de la habilidad del soldador).

Resultados obtenidos en las etiquetas adhesivas de la soldadura manual

Las etiquetas adhesivas colocadas sobre el guante del soldador se recogieron y se sometieron a análisis por espectrometría alfa. El procedimiento de separación radioquímica utilizado para este tipo de muestras es el mismo que el utilizado en los filtros anteriores, y que viene descrito en el Capítulo IV.3.

A continuación presentamos en las siguientes tablas la concentración de actividades expresadas como bequerelios por centímetro cuadrado para cada uno de los isótopos de torio Th^{232} , Th^{228} y Th^{230} de las tres etiquetas colocadas sobre la mano del operador de la soldadura manual.

Th^{232}	Actividad Bq/cm^2	Incertidumbre $\text{Bq/cm}^2(k=1)$	AMD Bq/cm^2	Rendimiento %
<i>Adhesivo I</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>2,818E-06</i>	<i>80,00</i>
<i>Adhesivo II</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>4,080E-06</i>	<i>85,00</i>
<i>Adhesivo III</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,753E-05</i>	<i>18,70</i>

Tabla VIII.16: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th^{232}

Th^{228}	Actividad Bq/cm^2	Incertidumbre $\text{Bq/cm}^2(k=1)$	AMD Bq/cm^2	Rendimiento %
<i>Adhesivo I</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>4,959E-06</i>	<i>80,00</i>
<i>Adhesivo II</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>7,181E-06</i>	<i>85,00</i>
<i>Adhesivo III</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>3,086E-05</i>	<i>18,70</i>

Tabla VIII.17: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th^{228}

Th^{230}	Actividad Bq/cm^2	Incertidumbre $\text{Bq/cm}^2(k=1)$	AMD Bq/cm^2	Rendimiento %
<i>Adhesivo I</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>2,818E-06</i>	<i>80,00</i>
<i>Adhesivo II</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>4,080E-06</i>	<i>85,00</i>
<i>Adhesivo III</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,753E-05</i>	<i>18,70</i>

Tabla VIII.18: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th^{230}

Los rendimientos obtenidos en estos procesos son inferiores a los anteriores debido a que en estas muestras el soporte es más difícil de digerir que en el caso de los filtros de nitrocelulosa.

En las etiquetas adhesivas, recogidas de la mano del soldador mientras realizaba su trabajo de soldadura manual, no se detectan actividades superiores a la actividad mínima detectable para los isótopos de torio.

VIII.1.5.3. Resultados del ensayo de afilado de los electrodos.

Resultados obtenidos en los filtros durante el afilado

Los filtros recogidos durante el afilado mediante el captador contenían depósitos de 0,3 mg, cantidades muy pequeñas para realizar el análisis. Las actividades fueron inferiores a la actividad mínima que es posible detectar incluso en el caso de afilar varios electrodos a la vez.

En la literatura se encuentran datos de concentración de Th^{232} en aire durante el afilado, pero responden a situaciones forzadas que se alejan de la realidad. *Saito, H.* [78] encuentra 40 mBq/m^3 tras 10 minutos ininterrumpidos de afilado. *Reichelt A.* [77] describe $0,27 \text{ Bq/m}^3$ al afilar electrodos con un contenido del 4% en óxido de torio, aunque no especifica las condiciones de trabajo. *Crim, E.M. y Bradley, T.D.* [71] publican valores de 10 mBq/m^3 para la fracción respirable pero con tiempos de afilado de 6 minutos, superiores a los reales ya que la mayoría de los soldadores únicamente

afilan varios electrodos juntos al día y emplean menos de un minuto en el afilado de cada uno de ellos. *Vinzents, P.* [73] encuentra valores de 444 mBq/m³ para el afilado de electrodos con un 4% de óxido de torio durante 139 minutos, dicha situación es totalmente irreal.

Resultados obtenidos en las etiquetas adhesivas durante el afilado

Se realizó la espectrometría alfa de las etiquetas adhesivas colocadas sobre la mano del operador mientras realizaba el afilado de los electrodos. Dichas etiquetas se sometieron al procedimiento de separación radioquímica IV.3 para su posterior análisis en el espectrómetro alfa. Los resultados obtenidos para los distintos isótopos de torio se recogen en las siguientes tablas.

Th²³²	Actividad Bq/cm²	Incertidumbre Bq/cm²(k=1)	AMD Bq/cm²	Rendimiento %
<i>Adhesivo IV</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,115E-05</i>	<i>30,00</i>
<i>Adhesivo V</i>	<i>2,980E-03</i>	<i>8,940E-05</i>	<i>1,584E-05</i>	<i>18,44</i>
<i>Adhesivo VI</i>	<i>1,307E-02</i>	<i>1,922E-04</i>	<i>1,678E-05</i>	<i>33,60</i>

Tabla VIII.19: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²³²

Th²²⁸	Actividad Bq/cm²	Incertidumbre Bq/cm²(k=1)	AMD Bq/cm²	Rendimiento %
<i>Adhesivo IV</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,499E-05</i>	<i>30,00</i>
<i>Adhesivo V</i>	<i>1,455E-03</i>	<i>6,242E-05</i>	<i>2,130E-05</i>	<i>18,44</i>
<i>Adhesivo VI</i>	<i>4,072E-03</i>	<i>1,075E-04</i>	<i>2,256E-05</i>	<i>33,60</i>

Tabla VIII.20: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²²⁸

Th²³⁰	Actividad Bq/cm²	Incertidumbre Bq/cm² (k=1)	AMD Bq/cm²	Rendimiento %
<i>Adhesivo IV</i>	<i>No detectado</i>	-	<i>1,115E-05</i>	<i>30,00</i>
<i>Adhesivo V</i>	<i>6,485E-04</i>	<i>4,170E-05</i>	<i>1,584E-05</i>	<i>18,44</i>
<i>Adhesivo VI</i>	<i>1,786E-03</i>	<i>7,127E-05</i>	<i>1,678E-05</i>	<i>33,60</i>

Tabla VIII.21: Valores de concentración de actividad del isótopo de torio, Th²³⁰

De la misma manera que con los adhesivos del apartado anterior, los rendimientos obtenidos en el proceso son inferiores, debido a la dificultad en la digestión de la matriz y al que se añade la posible digestión de partículas de tungsteno que saltan en el proceso de afilado quedando adheridas a la etiqueta, complicando el proceso radioquímico de separación.

Los valores obtenidos en las etiquetas adhesivas nos servirán para estimar el riesgo de contaminación por depósito de polvo en la mano durante el afilado y para una posible ingestión.

VIII.2. DOSIMETRIA EN LOS ENSAYOS DE SOLDADURA

VIII.2.1. Introducción

Las radiaciones ionizantes son haces de partículas o radiación electromagnética capaces de causar ionización en los átomos de cualquier medio que atraviesen. El proceso de ionización supone cambios en los átomos y moléculas de las células vivas, que ocasionan desde trastornos transitorios hasta daños permanentes.

Todos los seres vivos han estado y están expuestos a la acción de las radiaciones ionizantes, procedentes tanto de los rayos cósmicos que llegan desde el espacio exterior hasta la tierra, como de las sustancias radiactivas que contienen los materiales de la corteza terrestre.

Por otra parte, la producción de radionucleidos artificiales y sus aplicaciones tecnológicas en múltiples campos de la actividad humana, como la medicina, ha dado lugar a una expansión en las últimas décadas de la exposición a las radiaciones ionizantes.

La necesidad de protegerse contra los efectos nocivos de la radiación se hizo patente tras los descubrimientos de los rayos X por Roentgen y de la radiactividad por Bequerel, ambos realizados a finales del siglo XIX. En 1928 se creó el Comité Internacional de Protección contra los rayos X y el radio, como consecuencia de la decisión tomada por el Segundo Congreso Internacional de Radiología. Este Comité se transformó en 1950, en la “International Comisión on Radiological Protection” (ICRP de aquí en adelante) que desde entonces es la organización científica que se encarga de establecer la filosofía de la Protección Radiológica y de proporcionar, al mismo tiempo, recomendaciones para la utilización segura de las radiaciones ionizantes. Desde su creación, la Comisión ha emitido una larga serie de publicaciones, tanto sobre consideraciones generales como sobre temas específicos.

A partir de estas recomendaciones, cada país ha ido formulando y articulando su propia normativa de actuación. En el nuestro, el Consejo de Seguridad Nuclear es el organismo encargado de la protección radiológica y la normativa está recogida en el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes, Real Decreto 783/2001 [79].

De la necesidad de cuantificar los campos de radiaciones ionizantes nace la Dosimetría que es la rama de la Ciencia que evalúa los efectos que se producen en los tejidos vivos. Existen dos ramas dependiendo de la posición de la fuente respecto al individuo: Dosimetría Externa e Interna.

Cuando la fuente de radiación está situada fuera del organismo, el efecto que produce sobre el individuo es debido a una irradiación externa. La determinación de dosis externas requiere la caracterización del tipo de radiación y su energía, que se lleva a cabo mediante dispositivos dosimétricos personales o de área. Este es el campo de la Dosimetría Externa. Si se produce un proceso de ingestión, inhalación o absorción a través de la piel de sustancias radiactivas y por lo tanto la fuente de radiación es incorporada al organismo, el efecto es una contaminación interna. El objetivo de la Dosimetría Interna es la evaluación de dosis, a partir de los resultados de las medidas experimentales.

El objetivo del trabajo descrito en este Capítulo es la evaluación dosimétrica dentro del campo de la dosimetría interna de la incorporación de radionucleidos emisores de partículas alfa. La emisión de partículas alfa se produce con energías elevadas (entre 3 y 9 MeV), producen una ionización alta y su recorrido es muy corto, por lo que ocasionan graves daños en el órgano o tejido dónde se hayan depositado los radionucleidos emisores tras un proceso de incorporación. Además la mayoría de los radionucleidos emisores alfa tienen largos periodos de semidesintegración física y eliminación biológica, lo que prolonga su efecto nocivo en el interior del organismo.

VIII.2.2. Magnitudes Dosimétricas

VIII.2.2.1 Introducción

El proceso de ionización [80] supone necesariamente un cambio, al menos transitorio, en los átomos, lo que implica una alteración de la estructura de las moléculas de las que forman parte. Si las moléculas se encuentran en una célula viva, esta experimentará daños, bien por la acción directa de la radiación o bien indirectamente por cambios sufridos a posteriori, tales como la inducción de radicales libres.

La Protección Radiológica [81] contempla dos tipos de efectos: estocásticos y no estocásticos. Estos últimos, también denominados deterministas, implican la pérdida funcional de los tejidos en órganos debido al daño celular. Estos efectos se producen después de la exposición de determinados órganos o de todo el cuerpo a altas dosis de radiación. En este caso se producen daños celulares, y si estos no se reparasen de forma adecuada, las células afectadas sucumben, no se reproducen o se modifican. La mayoría de los órganos y tejidos del cuerpo no se ven afectados incluso si pierden números sustanciales de células; pero si el número es lo suficientemente importante, habrá un daño susceptible de ser observado, que se reflejará en un deterioro de la función del tejido. Tales daños no se producen por debajo de un cierto valor de dosis umbral, específico para cada uno de estos efectos biológicos, pero por encima de él, la gravedad del efecto causado será proporcional a la magnitud de la dosis recibida.

El segundo tipo, los efectos estocásticos, se manifiestan después de un periodo de latencia desde la exposición e incluyen el incremento del riesgo de cáncer y de trastornos hereditarios; estos efectos parecen no tener umbral y pueden producirse a dosis bajas de radiación aunque su frecuencia sea también baja.

El estudio de los efectos biológicos motivados por las radiaciones se realiza en una rama específica de la ciencia denominada Radiobiología, y en base a estos estudios se han establecido los límites de dosis, tanto para trabajadores profesionalmente expuestos como para el público en general.

Hay que disponer de una serie de magnitudes capaces de evaluar todos estos efectos producidos por una determinada exposición o incorporación. La definición precisa de conceptos y magnitudes utilizadas para cuantificar la exposición a las radiaciones ionizantes, es esencial para evaluar los efectos de dicha exposición.

VIII.2.2.2. Magnitudes utilizadas en Protección Radiológica

Dosis absorbida media en un órgano, D_T

El efecto físico producido se define por la magnitud denominada “Dosis absorbida”, que es la energía absorbida en la materia por unidad de masa, siendo su unidad el Julio por kilogramo y recibe el nombre de Gray (Gy). Puede expresarse mediante la ecuación

$$D_T = \frac{d\varepsilon_T}{dm_T}$$

donde $d\varepsilon_T$ es la energía total absorbida por la masa dm .

Factores de ponderación de la radiación, w_R

Con el fin de evaluar los efectos biológicos de una determinada radiación, la dosis absorbida en un órgano resulta insuficiente debido a que no tiene en cuenta el tipo de radiación que los produce. Diferentes factores han sido utilizados históricamente para cuantificar dicho fenómeno. Desde 1990 se utilizan, con fines de protección radiológica, los factores de ponderación de la radiación w_R . Estos factores dependen del tipo de radiación incidente sobre la persona cuando se trata de la irradiación externa o de la emitida por radioisótopos, cuando éstos están depositados internamente en el cuerpo.

En la siguiente tabla se muestran los valores para los factores de ponderación de la radiación w_R según distintos tipos de radiaciones.

Tipo y rango de energía		Factor de ponderación w_R
Fotones, todas las energías		1
Electrones y muones, todas las energías		1
Neutrones, energía	<10 keV	5
	>10 keV a 100 keV	10
	>100 keV a 2 MeV	20
	>2 MeV a 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protones, salvo los de retroceso, de energía > 2 MeV		5
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados		20

Tabla VIII.2.1: Valores del factor de ponderación de la radiación w_R (R.D. 783/2001 “Protección Sanitaria contra las radiaciones ionizantes” [79]).

Dosis equivalente en un órgano o tejido, H_T

Los efectos producidos por las radiaciones no sólo dependen de la dosis absorbida; la misma cantidad de radiación provoca diferentes efectos biológicos en función del tipo de radiación y de su energía. Teniendo esto en cuenta se multiplica la dosis absorbida por el factor w_R , obteniéndose la magnitud “Dosis equivalente” en un órgano o tejido T, “ H_T ”, que evalúa los efectos debidos a la exposición en un determinado órgano o tejido. La dosis equivalente viene definida en el Real Decreto 783/2001, como la dosis absorbida, en el tejido u órgano T, ponderada en función del tipo y la calidad de la radiación; viene dada por la siguiente expresión:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

Siendo $D_{T,R}$ la dosis absorbida promediada sobre el tejido u órgano T, procedente de la radiación R, y w_R el factor de ponderación de la radiación.

Cuando el campo de radiación se compone de tipos y energías con valores diferentes de w_R la dosis equivalente total, H_T viene dada por la fórmula

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

La unidad para la dosis equivalente es el Julio por kilogramo y recibe el nombre de Sievert (Sv).

Cálculo de la dosis equivalente en un órgano

Una incorporación de material radiactivo da lugar a que éste se deposite en órganos o tejidos. Cada uno de estos órganos o tejidos se comporta como una fuente de irradiación para los órganos o tejidos circundantes y también para sí mismos.

El órgano que irradia se denomina órgano S (del inglés, *source*), y cada uno de los órganos o tejidos irradiados se denominan blanco T (del inglés, *target*). Para cada tipo de radiación (i), de un determinado radionucleido (j), localizado en un órgano fuente S, la dosis equivalente integrada en 50 años $H_T(50)$ en un órgano blanco depende de dos factores: la “actividad integrada U_s ” y la “energía específica efectiva”.

La “actividad integrada U_s ” es el número total de desintegraciones del nucleido j en el órgano fuente S durante un intervalo de tiempo prefijado posterior a la incorporación.

La actividad presente en un órgano o tejido desaparece del mismo por el decaimiento del radionucleido y por su eliminación biológica [81].

La combinación de estos dos procesos da lugar a una función de la actividad, generalmente decreciente en el tiempo y que se denomina “función de retención”. Estas funciones son en general del tipo exponencial o suma de exponenciales:

$$R(t) = \sum_i a_i e^{-\lambda_{ef,i} t}$$

donde $R(t)$ es la actividad retenida, en un determinado órgano o tejido o en el cuerpo entero en un determinado tiempo t y a_i es la fracción de la actividad incorporada que se elimina con una constante de decaimiento efectiva, $\lambda_{ef,i}$.

Esta constante de decaimiento efectiva puede expresarse como la suma de dos términos,

$$\lambda_{ef} = \lambda_f + \lambda_b$$

Donde

$$\lambda_f = \frac{\ln 2}{T_f} \quad T_f \text{ es el periodo de decaimiento físico}$$

$$\lambda_b = \frac{\ln 2}{T_b} \quad T_b \text{ es el periodo de decaimiento biológico}$$

La integral en el tiempo de la “función de retención” se denomina “actividad integrada U_S ” y expresa el número de desintegraciones en el intervalo de tiempo de interés. En el control ocupacional la integración se lleva a cabo por un espacio de tiempo de 50 años. Se contempla así la situación más desfavorable, esto es una incorporación de material radiactivo producida en el comienzo de la vida laboral. En casos particulares, el intervalo de tiempo será el periodo que se considere de interés para calcular la dosis, en nuestro caso será de un año.

Factores de ponderación de los órganos o tejidos, w_T

Se ha observado que la relación existente entre la probabilidad de aparición de efectos estocásticos y la dosis equivalente depende también del órgano o tejido irradiado. Resulta por tanto apropiado definir otra magnitud, derivada de la dosis equivalente, para expresar el efecto total debido a una combinación arbitraria de las dosis recibidas en los diferentes órganos y tejidos del cuerpo. El factor utilizado para ponderar la dosis equivalente en un tejido u órgano se denomina “factor de ponderación del tejido w_T ”. Los valores de estos factores w_T , se especifican en la siguiente Tabla VIII.2.2.

<i>Tejido u órgano</i>	<i>Factores de ponderación de tejidos, w_T</i>
<i>Gónadas</i>	<i>0,20</i>
<i>Médula ósea (roja)</i>	<i>0,12</i>
<i>Colon</i>	<i>0,12</i>
<i>Pulmón</i>	<i>0,12</i>
<i>Estómago</i>	<i>0,12</i>
<i>Vejiga</i>	<i>0,05</i>
<i>Mama</i>	<i>0,05</i>
<i>Hígado</i>	<i>0,05</i>
<i>Esófago</i>	<i>0,05</i>
<i>Tiroides</i>	<i>0,05</i>
<i>Piel</i>	<i>0,01</i>
<i>Superficie de los huesos</i>	<i>0,01</i>
<i>Resto del organismo</i>	<i>0,05</i>

Tabla VIII.2.2: Valores del factor de ponderación de los tejidos w_T (R.D. 783/2001 “Protección Sanitaria contra las radiaciones ionizantes”) [79].

Dosis efectivas E

La “Dosis efectiva E”, es la suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los órganos y tejidos del cuerpo. Viene dada por la siguiente expresión:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

donde H_T es la dosis equivalente en el tejido u órgano T y w_T es el factor de ponderación para el tejido T, definido anteriormente.

La unidad para la dosis efectiva es el Julio por kilogramo, el Sievert (Sv).

Si expresamos H_T en función de la dosis absorbida en el órgano T resulta la siguiente ecuación.

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

En dicha expresión puede observarse la dependencia que presenta la dosis efectiva, tanto de los factores de ponderación de la radiación como de los factores de ponderación de cada órgano T.

Dosis equivalente comprometida en un órgano o tejido, $H_T(\tau)$

La exposición a un campo externo de radiación tiene como resultado inmediato una deposición de energía en cada órgano o tejido. Sin embargo la irradiación interna de un tejido causada por la incorporación de un radionucleido dado se extiende en el tiempo, produciéndose el depósito de energía a medida que el nucleido decae en el interior del organismo.

Hay que tener en cuenta que tras el proceso de incorporación de material radiactivo, hay un periodo de tiempo durante el cual este material está dando lugar a que los tejidos reciban dosis equivalentes. Para considerar este efecto se define la “dosis equivalente comprometida” $H_T(\tau)$, que es la integral en el tiempo de la tasa de dosis equivalente, siendo τ el tiempo de integración en años tras la incorporación. Si no se especifica se sobreentiende que su valor es de 50 años en el caso de personas adultas y de un máximo de 70 años para los niños. La dosis equivalente comprometida viene dada por la siguiente integral

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

La integral corresponde a una sola incorporación al tiempo t_0 y donde H_T es la tasa de dosis equivalente en un tejido u órgano T, al tiempo t y τ es el periodo de tiempo sobre el cual se efectúa la integración.

En la siguiente figura queda esquematizada la relación entre la dosis absorbida, la dosis equivalente y la dosis efectiva.

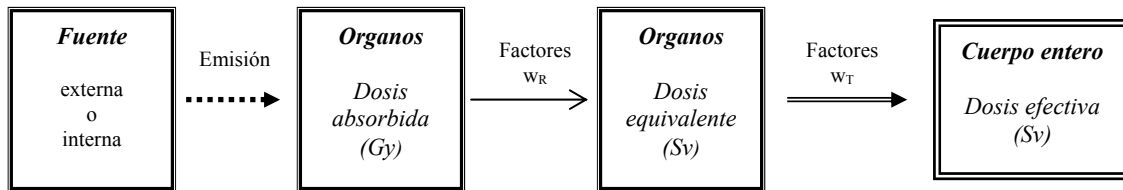


Figura VIII.2.1: Relación entre las dosis en el cuerpo humano

Para cada tipo de radiación, la dosis equivalente comprometida durante un periodo de 50 años, $H_T(50)$ en un órgano determinado T a causa de la irradiación producida por un radionucleido distribuido en un órgano fuente S, viene dada por el producto de dos factores: a) el número total de transformaciones del radionucleido distribuido en el órgano S, durante el periodo de cálculo posterior a su incorporación y b) la energía absorbida por transformación en el órgano T, modificada por el factor de ponderación w_R y teniendo en cuenta la irradiación de tipo R emitida por el radionucleido distribuido en el órgano S.

El cálculo de $H_T(50)$ para un órgano T vendrá dado por el sumatorio de este producto considerando todos los órganos S que pueden irradiar a T. De acuerdo con las recomendaciones de la ICRP (Publicación 60) [82] el cálculo se realiza mediante la expresión siguiente:

$$H_T(50) = \sum_S U_S(50) SEE(T \leftarrow S)$$

Donde

$U_S(50)$ es el número de transformaciones nucleares del radionucleido en el órgano S, durante un periodo de 50 años posterior a su incorporación.

SEE (T←S) es la Energía Efectiva Específica para la radiación R (modificada por el factor w_R) absorbida en el órgano T, a partir de cada transformación que se produce en el órgano S.

La Energía Efectiva Específica se obtiene de acuerdo con la expresión siguiente.

$$SEE(T \leftarrow S) = \sum_R \frac{Y_R E_R w_R AF(T \leftarrow S)_R}{m_T}$$

Donde

Y_R : Rendimiento de la radiación R por transformación nuclear (Bq/seg)

E_R : Energía de la radiación R (Julios)

w_R : Factor de ponderación de la radiación ($w_R = 20$ para partículas alfa)

$AF(T \leftarrow S)_R$: Fracción absorbida en T por transformación en S de la radiación R

m_T : Peso del órgano blanco.

Dosis efectiva comprometida, E (τ)

Las consecuencias para el funcionamiento global del organismo, para una misma dosis equivalente, serán diferentes dependiendo de: el órgano o tejido, la uniformidad de la irradiación o de los diferentes órganos o tejidos que reciban dosis de magnitudes distintas. Para asegurar que el efecto global calculado para el organismo sea el mismo, con independencia de la uniformidad en la irradiación, se define la dosis efectiva comprometida.

La “dosis efectiva comprometida”, E (τ), es la suma de las dosis equivalentes comprometidas en cada tejido u órgano como resultado de una incorporación, multiplicada cada de ellas por el correspondiente factor de ponderación w_T . Esta dosis efectiva se obtiene de la expresión

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

Para evaluar de forma rápida la dosis efectiva comprometida después de la incorporación de un radionucleido, puede utilizarse el concepto de dosis comprometida efectiva [79] por unidad de incorporación $h(g)$, que se define como la dosis que resulta de la incorporación de un bequerelio, para un individuo perteneciente al grupo de edad g . La dosis se expresa en unidades de Sv/Bq y se calcula multiplicando estos coeficientes por la actividad incorporada en bequerelios.

$$E = A [Bq] h(g) \left[\frac{Sv}{Bq} \right]$$

La búsqueda de un coeficiente de dosis en las tablas aplicables a trabajadores requiere primeramente seleccionar el radionucleido y determinar la vía de entrada. Las posibles vías de entrada de un contaminante al organismo son:

- Inhalación
- Ingestión
- Absorción a través de la piel
- Absorción por heridas

A continuación el radionucleido se distribuye siguiendo los caminos metabólicos que correspondan al compuesto incorporado. Si bien en condiciones de trabajo, la vía de entrada más común es la inhalación, en un caso de accidente hay que contemplar todas las demás posibilidades.

Para el caso de inhalación, el depósito en cada una de las distintas regiones pulmonares dependerá de las propiedades aerodinámicas del aerosol. Partículas de mayor tamaño quedarán retenidas en las vías superiores, mientras que las más pequeñas llegan al pulmón. El aerosol está caracterizado por la Mediana del Diámetro Aerodinámico de los aerosoles de la actividad incorporada por inhalación, AMAD (Activity Median Aerodynamic Diameter). Para la exposición ocupacional, el valor del AMAD considerado actualmente como más representativo de los aerosoles en el lugar de trabajo es de $5\mu\text{m}$ [83].

También hay que especificar, en el tipo de inhalación del compuesto, la velocidad de eliminación del radionucleido del pulmón, que puede ser de tres tipos:

F (Fast) significa una salida rápida

M (Medium) significa una salida moderada

S (Slow) significa una salida lenta

También, se deberá consignar el valor del factor f , que representa la fracción del material radiactivo incorporado que pasa al tracto gastrointestinal.

Podemos entonces calcular la dosis efectiva como el producto del coeficiente $h(g)$ (Sv/Bq) para el radionucleido determinado de la tabla correspondiente, por la actividad incorporada (en bequerelios) del radionucleido.

Los coeficientes de dosis por unidad de incorporación utilizados en este trabajo [70] para estimar la dosis efectiva por inhalación e ingestión son los que aparecen en el Anexo III del Real Decreto 783/2001 (Tablas *a, b, c*) [79].

VIII.2.2.3. Límites Básicos de dosis

La legislación española (BOE 178/2001) [79] establece, para trabajadores profesionalmente expuestos, el límite de 100 mSv durante todo un periodo de cinco años oficiales consecutivos, sujeto a una dosis efectiva de 50 mSv por año oficial. Se establece así mismo un límite de dosis equivalente para la piel de 500 mSv por año oficial, que se aplicará a la dosis promediada sobre cualquier superficie de 1 cm^2 , con independencia de la zona expuesta. Y un límite para las manos, antebrazos, pies y tobillos de 500 mSv y 150 mSv para el cristalino por año oficial.

El problema de la evaluación de las dosis debidas a una contaminación interna es uno de los más complejos en Protección Radiológica. Hay que tener en cuenta que no se trata de dosis instantáneas, sino que se trata de una irradiación continua hasta la eliminación del radionucleido del organismo, bien por desintegración radiactiva o por procesos biológicos.

VIII.2.2.4. Estimación de dosis para el torio

La determinación de dosis externas requiere la caracterización de la radiación incidente, que se realiza mediante dispositivos dosimétricos personales o de área. En este apartado se calcula la dosis comprometida anualmente derivada de la exposición interna por inhalación y por ingestión para los distintos isótopos de torio en los dos trabajos de soldadura: simulación con robot automático y soldadura manual descritos en el Capítulo VIII.1.1 y VIII.1.2. Se estima también la posible contaminación por exposición interna durante el afilado de los electrodos descrita en el Capítulo VIII.1.3. Finalmente se calcula la estimación de dosis por exposición externa debida al posible depósito de polvo del afilado sobre la mano del soldador.

Estimación de dosis para el Th^{232} , Th^{228} , Th^{230} por exposición interna

La dosis derivada de la exposición interna por inhalación o por ingestión se calcula (Ecuación VIII.2.1) como el producto de la actividad del nucleido determinado por espectrometría alfa y el correspondiente coeficiente de dosis por unidad de incorporación, teniendo en cuenta un caudal de respiración de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ [84] y 1.700 horas de trabajo, siendo 1.540 horas de soldadura al año [84] y 160 horas de afilado al año. La ecuación utilizada en este cálculo proporciona la dosis en unidades de Sievert por año de exposición.

$$E \left[\frac{\text{Sv}}{\text{y}} \right] = A \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] h \left[\frac{\text{Sv}}{\text{Bq}} \right] Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] W \left[\frac{\text{h}}{\text{y}} \right]$$

Ecuación VIII.2.1: Dosis efectiva comprometida anualmente derivada de la exposición interna por inhalación o por ingestión.

Los valores de los coeficientes de dosis por unidad de incorporación por inhalación y por ingestión, para trabajadores expuestos y para los distintos isótopos de torio se presentan en la siguiente Tabla VIII.2.3.

Se definen en relación a dos tipos de retención pulmonar, como ya se comentó anteriormente. Una retención del tipo M representa una eliminación moderada del radionucleido alojado en el pulmón y del tipo S para una eliminación lenta del mismo. Estos valores vienen correlacionados con el factor f que está definido, como ya se comentó anteriormente, como la fracción del elemento químico estable que pasa al tracto gastrointestinal.

Los coeficientes considerados son los correspondientes para una distribución de tamaños de las partículas del aerosol inhalado de 5 μm , de acuerdo con las recomendaciones de la ICRP 68 [83] y las determinaciones efectuadas por Jancovic [76].

Nucleido	Periodo semidesintegración	Inhalación			Ingestión
		Tipo	f	$h(g)_{5\mu\text{m}} \text{ Sv/Bq}$	$h(g)_{5\mu\text{m}} \text{ Sv/Bq}$
Th^{232}	1,405E10 a	M	5,0E-04	2,9E-05	2,2E-07
		S	2,0E-04	1,2E-05	9,2E-08
Th^{228}	1,911 a	M	5,0E-04	2,3E-05	7,0E-08
		S	2,0E-04	3,2E-05	3,5E-08
Th^{230}	75.380 a	M	5,0E-04	2,8E-05	2,1E-07
		S	2,0E-04	7,2E-06	8,7E-08

Tabla VIII.2.3: Coeficientes de dosis efectivas comprometidas por unidad de incorporación (Sv/Bq) por inhalación y por ingestión para los trabajadores expuestos. (R.D. 783/2001 “Protección Sanitaria contra las radiaciones ionizantes” [79]).

Con los valores de dosis efectivas comprometidas por unidad de incorporación para el caso de inhalación y con las actividades analizadas en los filtros durante la simulación en robot automático, en soldadura manual y durante el afilado, podemos obtener los correspondientes valores de dosis efectiva.

A continuación se recogen en las siguientes Tablas (VIII.2.4 y VIII.2.5) los valores obtenidos de dosis efectiva por inhalación para el caso de simulación en robot automático (los filtros son los recogidos en la soldadura automática, Tabla VIII.1), para los isótopos de torio en los que se detectó actividad. (Apartado VIII.1.5.1). Las dosis obtenidas vienen indicadas en unidades de Sievert por año de trabajo.

Radionucleido	Nº Filtro	Actividad Bq/m³	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²³²	<i>Filtro 1</i>	8,800E-04	<i>M</i>	6,508E-02
			<i>S</i>	2,693E-02
	<i>Filtro 2</i>	1,735E-04	<i>M</i>	1,283E-02
			<i>S</i>	5,309E-03
	<i>Filtro 3</i>	3,651E-04	<i>M</i>	2,700E-02
			<i>S</i>	1,117E-02

Tabla VIII.2.4: Dosis efectiva para el Th²³² en el trabajo de soldadura en robot automático.

Radionucleido	Nº Filtro	Actividad Bq/m³	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²²⁸	<i>Filtro 1</i>	2,776E-04	<i>M</i>	1,628E-02
			<i>S</i>	2,265E-02

Tabla VIII.2.5: Dosis efectiva para el Th²²⁸ en el trabajo de soldadura en robot automático.

Así el valor medio del compromiso de dosis debido a la actividad realizada en soldadura automática para el torio es de 0,040 mSv/año para el caso de una eliminación moderada (tipo M) y de 0,022 mSv/año para una eliminación lenta (tipo S), valores alejados del límite establecido en la legislación de 50 mSv/año para trabajadores expuestos.

Los valores de dosis efectiva para inhalación en el caso de la soldadura manual y para aquellos filtros en los que se detectó actividad (Capítulo VIII.1.5.2), se recogen en las siguientes Tablas (VIII.2.6, VIII.2.7 y VIII.2.8) para los tres isótopos de torio.

Radionucleido	Nº Filtro	Actividad Bq/m³	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²³²	Filtro 6	3,001E-03	M	2,219E-01
			S	9,183E-02
	Filtro 7	4,587E-03	M	3,392E-01
			S	1,404E-01

Tabla VIII.2.6: Dosis efectiva para el Th²³² en el trabajo de soldadura manual.

Radionucleido	Nº Filtro	Actividad Bq/m³	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²²⁸	Filtro 6	1,356E-03	M	7,953E-02
			S	1,106E-01
	Filtro 7	2,393E-03	M	1,403E-01
			S	1,953E-01

Tabla VIII.2.7: Dosis efectiva para el Th²²⁸ en el trabajo de soldadura manual.

Radionucleido	Nº Filtro	Actividad Bq/m³	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²³⁰	Filtro 6	4,273E-04	M	3,051E-02
			S	7,845E-03

Tabla VIII.2.8: Dosis efectiva para el Th²³⁰ en el trabajo de soldadura manual.

En el caso de soldadura manual los valores medios del compromiso de dosis para el torio son de 0,406 mSv/año para una eliminación moderada (tipo M) y de 0,273 mSv/año para una eliminación lenta (tipo S). Los valores de dosis son más elevados que en el caso del robot y como ya se comentó en el Capítulo VIII.1.5 de esta memoria, es debido a que en la soldadura manual se produce más desgaste de los electrodos y por lo tanto se detecta más actividad, que se traduce en un aumento de la dosis efectiva. Todas las dosis calculadas son muy inferiores a los límites permitidos.

Los valores de dosis efectivas comprometidas anualmente descritos en el trabajo de *Gäfvert* [42], son semejantes a los calculados en este trabajo y oscilan entre 0,100 y 0,400 mSv/año para soldadura TIG con electrodos con un contenido del 2% en óxido de torio. Estos valores son superiores para electrodos con mayor contenido en óxido de torio y para aquellas soldaduras realizadas con corriente alterna.

A continuación se efectúa una estimación de la dosis efectiva comprometida anualmente por exposición interna durante el afilado de los electrodos. Para ello se considera que la mano queda cubierta por una capa de polvo, pudiendo ser ingerido por el trabajador con posterioridad y que esta capa permanece durante toda la jornada laboral. Aunque debe considerarse que en la situación real el trabajador emplea guantes durante el afilado; lo que conllevaría ingestión nula; la mayor parte del polvo cae al suelo. Así cabe esperar que la cantidad ingerida no sobrepase el 10% del total a diferencia de otras hipótesis [10] que consideran una ingestión del 50%.

Se considera un caudal de respiración de $1,5\text{m}^3/\text{h}$ [84] y 160 horas al año invertidas en la operación de afilado. El depósito de radionucleidos se calcula para una superficie de 50 cm^2 , que sería la superficie de la mano ($7\times 7\text{ cm}$) sobre la cual se produciría el depósito.

Los resultados para los tres isótopos de torio se describen en las Tablas VIII.2.9, VIII.2.10 y VIII.2.11 donde se incluye la actividad en bequerelios por cm^2 y se calculan las dosis con los coeficientes por ingestión citados anteriormente en la Tabla VIII.2.3.

Radionucleido	Nº Adhesivo	Actividad Bq/cm²	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²³²	Adhesivo 5	2,980E-03	M	1,940E-03
			S	0,811E-03
	Adhesivo 6	1,307E-02	M	0,851E-03
			S	3,560E-03

Tabla VIII.2.9: Dosis efectiva para el Th²³² durante el afilado de los electrodos.

Radionucleido	Nº Adhesivo	Actividad Bq/cm²	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²²⁸	Adhesivo 5	1,455E-03	M	0,304E-03
			S	0,150E-03
	Adhesivo 6	4,072E-03	M	0,843E-03
			S	0,422E-03

Tabla VIII.2.10: Dosis efectiva para el Th²²⁸ durante el afilado de los electrodos.

Radionucleido	Nº Adhesivo	Actividad Bq/cm²	Tipo retención	Dosis efectiva mSv/año
Th²³⁰	Adhesivo 5	6,485E-04	M	0,403E-03
			S	0,167E-03
	Adhesivo 6	1,786E-03	M	1,110E-03
			S	0,460E-03

Tabla VIII.2.11: Dosis efectiva para el Th²³⁰ durante el afilado de los electrodos.

Los valores medios del compromiso de dosis para el torio durante el afilado son de 0,0027 mSv/y para eliminación moderada (tipo M) y de 0,003 mSv/y para eliminación lenta (tipo S).

Estimación de dosis para el Th^{232} , Th^{228} , Th^{230} por exposición externa

Para obtener el compromiso anual de dosis derivada de la exposición externa se calcula (Ecuación VIII.2.2) el producto de la actividad del nucleido determinado por espectrometría alfa, expresada en bequerelios por cm^2 , y el correspondiente coeficiente de dosis por unidad de incorporación en Sv/h por bequerelio por cm^2 . Se considera el depósito sobre la mano del operador utilizado en la anterior estimación, que será la causa de la irradiación de la piel mediante emisión alfa y beta, ya que ahora la contribución gamma será despreciable.

La ecuación utilizada en este cálculo (Ecuación VIII.2.2.) nos permite estimar la dosis efectiva comprometida en Sv/año, para 160 horas de afilado al año.

$$E \left[\frac{\text{Sv}}{y} \right] = A \left[\frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2} \right] h \left[\frac{\text{Sv cm}^2}{h \text{ Bq}} \right] W \left[\frac{h}{y} \right]$$

Ecuación VIII.2.2: *Dosis efectiva comprometida anualmente derivada de la exposición externa.*

Los coeficientes de dosis, por exposición externa para los isótopos de torio, utilizados para el cálculo de dosis efectiva por depósito sobre la mano, son los publicados por la Comisión Europea [85] y se incluye en la siguiente Tabla VIII.2.12.

<i>Nucleido</i>	<i>h (Sv/h) por (Bq/cm²)</i>
<i>Th²³²</i>	<i>2,52E-08</i>
<i>Th²²⁸</i>	<i>5,41E-08</i>
<i>Th²³⁰</i>	<i>8,51E-08</i>

Tabla VIII.2.12: Coeficientes de dosis efectivas comprometidas por unidad de incorporación (Sv/h por Bq/cm²) por exposición externa para los trabajadores expuestos. (Radiation Protection 107) [85].

Las dosis efectivas comprometidas para los isótopos de torio por exposición externa por depósito de polvo de electrodo durante el afilado se muestran en las siguientes Tablas III.2.13, VIII.2.14, VIII.2.15.

Radionucleido	Nº Adhesivo	Actividad Bq/cm²	Dosis efectiva μSv/año
Th²³²	<i>Adhesivo 5</i>	<i>2,980E-03</i>	<i>0,012</i>
	<i>Adhesivo 6</i>	<i>1,307E-02</i>	<i>0,053</i>

Tabla VIII.2.13: Dosis efectiva por el Th²³² por exposición externa

Radionucleido	Nº Adhesivo	Actividad Bq/cm²	Dosis efectiva μSv/año
Th²²⁸	<i>Adhesivo 5</i>	<i>1,455E-03</i>	<i>0,013</i>
	<i>Adhesivo 6</i>	<i>4,072E-03</i>	<i>0,035</i>

Tabla VIII.2.14: Dosis efectiva por el Th²²⁸ por exposición externa

Radionucleido	Nº Adhesivo	Actividad Bq/cm²	Dosis efectiva μSv/año
Th²³⁰	<i>Adhesivo 5</i>	<i>6,485E-04</i>	<i>0,008</i>
	<i>Adhesivo 6</i>	<i>1,786E-03</i>	<i>0,024</i>

Tabla VIII.2.15: Dosis efectiva por el Th²³⁰ por exposición externa

Los valores de dosis calculados por exposición externa son muy inferiores a los límites permitidos. El valor medio de dosis eficaz para el torio sería de 0,073 $\mu\text{Sv/año}$. Por otra parte, si comparamos los coeficientes de dosis (Tabla VIII.2.12) para el Th^{232} y para el Th^{228} [85] con los correspondientes coeficientes de dosis por inhalación [79], (Tabla VIII.2.3) son 1150 y 425 veces menores para una eliminación tipo M y para el tipo S 476 y 591 veces menores. Se puede considerar que la contribución por exposición externa es mínima [42] con respecto a la de la fracción respirable.

Estimación de dosis para el torio durante el proceso de soldadura TIG

Para el cálculo de dosis efectiva comprometida anualmente durante el proceso de soldadura TIG de un operador que trabaja 1.700 horas al año soldando con electrodos TIG con un contenido del 2% en óxido de torio e invierte 160 horas al año en el afilado de los electrodos se utiliza la siguiente fórmula [79].

$$E = E_{Ext} + [E_{Inh} + E_{Ing}]_{Int}$$

Ecuación VIII.2.3: Dosis efectiva comprometida anualmente.

Se calcula como la suma de la dosis por exposición externa más la dosis por exposición interna; que es a su vez la estimación de dosis por inhalación más la posible dosis por ingestión. Se calcula para los dos tipos de eliminación.

$$E = 0,073 \cdot 10^{-03} \frac{mSv}{año} + 0,406 \frac{mSv}{año} + 0,0027 \frac{mSv}{año} = 0,408 \frac{mSv}{año}$$

El resultado obtenido, para una eliminación moderada (tipo M), es una dosis total de 0,408 mSv/año.

$$E = 0,073 \cdot 10^{-03} \frac{mSv}{año} + 0,273 \frac{mSv}{año} + 0,003 \frac{mSv}{año} = 0,276 \frac{mSv}{año}$$

El resultado para una eliminación lenta del radionucleido es de 0,276 mSv/año, estando dos ordenes de magnitud por debajo del límite permitido, 50 mSv/año para trabajadores expuestos, en ambos casos.

Como el radionucleido considerado, el torio se encuentra en forma de óxido ThO₂, el tipo de eliminación que se debería considerar como la más probable sería la lenta S, según se describe en el R.D. 783/2001 en la Tabla e [79] del Anexo III, que hace referencia a los tipos de absorción pulmonar para las formas químicas de los elementos en relación con el cálculo de los coeficientes de inhalación.

CAPITULO IX

ELECTRODOS PARA SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

IX.1. INTRODUCCION

A lo largo de esta memoria se han presentado los resultados obtenidos para un tipo determinado de electrodos, los utilizados en la soldadura TIG y en concreto aquellos que contenían óxido de torio, pero también se ha considerado interesante conocer si el torio se encuentra presente en los electrodos cuyo uso está más generalizado. En este capítulo se realiza un estudio de la composición de las materias primas utilizadas para fabricar el recubrimiento de dichos electrodos. Se inicia este capítulo con un repaso a los distintos tipos de soldadura y más concretamente aquella que utiliza electrodos revestidos. Posteriormente se procede al análisis de los distintos recubrimientos mediante espectrometría gamma. Se describe también la preparación del patrón de calibración utilizado en el estudio de este tipo de muestras que se ha realizado en el Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

La soldadura es un proceso de fabricación [86] en donde se realiza la unión de materiales, generalmente metales o termoplásticos, a través de la fusión. Las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno (metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir una mezcla de material fundido que, al enfriarse, se convierte en una unión fuerte.

Muchas fuentes de energía pueden ser usadas para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un haz de electrones, procesos de fricción o ultrasonido.

La soldadura es un proceso industrial y puede ser hecha en muchos ambientes diferentes, incluyendo el aire libre, debajo del agua y en el espacio. Existen una gran variedad de procesos de soldadura [86], los más importantes se enumeran a continuación, con la nomenclatura especificada por el organismo de referencia mundial en el ámbito de la soldadura AWS (American Welding Society):

- Soldadura por arco eléctrico:

Soldadura por arco con gas de protección:

TIG (Tungsten Inert Gas)

MAG (Metal Active Gas)

MIG (Metal Inert Gas)

FCAW-G (Gas shielded Flux Cored Arc Welding) con electrodo tubular

Soldadura por arco sin gas de protección:

FSAW-S (Self-shielded Flux Cored Arc Welding)

Soldadura por arco sumergido:

SAW (Submerged-Arc Welding)

Soldadura por arco con electrodo revestido:

SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

- Soldadura por gas:

Soldadura oxigás OFW (Oxy-fuel gas Welding)

Soldadura oxiacetilénica OAW (Oxy-acetylene Welding)

- Soldadura por resistencia RW (Resistance Welding):

Soldadura por puntos RSW (Resistance Spot Welding)

Soldadura de costuras RSEW (Resistance Seam Welding)

Soldadura por proyección PW (Projection Welding)

Soldadura por chispa FW (Flash Welding)

Soldadura por recalado UW (Upset Welding)

- Soldadura por rayo de energía:

Soldadura por rayo láser EBW (Electron Beam Welding)

Soldadura por haz de electrones LBW (Laser Beam Welding)

- Soldadura de estado sólido:
 - Soldadura ultrasónica USW (Ultrasonic Welding)
 - Soldadura en frío CW (Cold Welding)
 - Soldadura con rodillos ROW (Row Welding)
 - Soldadura en caliente con presión HPW (Hot Pressure Welding)
 - Soldadura por difusión DFW (Difusión Welding)
 - Soldadura explosiva EW (Explosion Welding)
 - Soldadura por fricción FRW (Friction Welding)

IX.2. SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODOS REVESTIDOS

De los distintos tipos de soldadura, una de las más extendidas y que potencialmente podría tener una mayor incidencia sobre los operarios es la soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) [12].

El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método tan útil es su simplicidad y, por tanto, su bajo precio. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles, la soldadura con electrodo revestido no ha sido desplazada del mercado. La sencillez hace de ella un procedimiento práctico; todo lo que necesita un soldador para trabajar es una fuente de alimentación, cables, un portaelectrodo y electrodos. El soldador no tiene que estar junto a la fuente y no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección, sin embargo, no se presta para su automatización

El procedimiento es excelente para diversos tipos de trabajos: de reparación, de fabricación y de construcción. Además la soldadura SMAW es muy versátil, su campo de aplicación es enorme: casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con el electrodo revestido; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo. La utilización de esta soldadura está muy extendida, de ahí la necesidad de conocer la composición de este tipo de electrodos y su posible impacto ambiental.

Para iniciar el trabajo de soldadura se induce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo cual se ioniza el aire entre ellos que pasa a ser conductor, de modo que se cierra el circuito y se crea un arco eléctrico. El calor del arco funde parcialmente el material de base y el de aporte, el cual se deposita y crea el cordón de soldadura.

Los electrodos son varillas metálicas preparadas para servir como polo del circuito; en su extremo se genera el arco. En algunos casos, sirven también como material fundente. La varilla metálica a menudo va recubierta de distintos materiales, en función de la pieza a soldar y del procedimiento empleado. Una de las funciones del recubrimiento es proteger el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera apropiada para que se produzca la transferencia de metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el baño de fusión en el material base. Estas gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida procedente de la fusión del recubrimiento. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido.

Como son los propios electrodos los que aportan el flujo de metal fundido será necesario reponerlos cuando se desgasten. Los electrodos están compuestos de dos piezas: el alma y el revestimiento.

El alma o varilla es alambre (de diámetro original de 5,5 mm.) que se comercializa en rollos continuos. Tras obtener el material, el fabricante lo decapa mecánicamente, a fin de eliminar el óxido y aumentar la pureza y posteriormente lo trefila para reducir su diámetro.

El revestimiento se produce mediante la combinación de una gran variedad de elementos (minerales, celulosa, mármol, aleaciones, etc.) convenientemente seleccionados y probados por los fabricantes, que mantienen el proceso, cantidades y dosificaciones en riguroso secreto. La composición y clasificación de cada tipo de electrodo está regulada por la AWS (American Welding Society).

El material de aportación se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas (ver Figura IX.1). La protección se obtiene por la descomposición del revestimiento en forma de gases y de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y, posteriormente, solidifica.

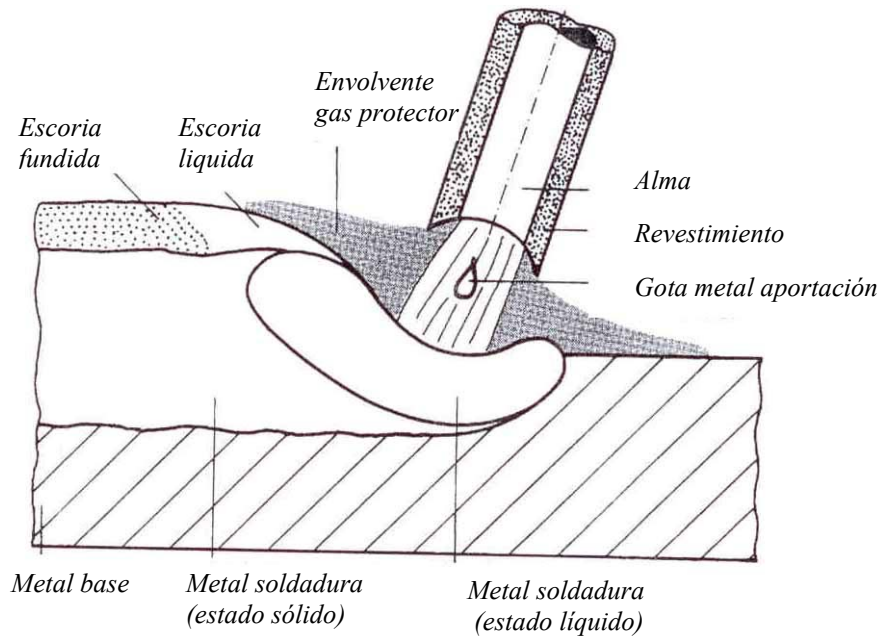


Figura IX.1: Proceso de soldadura por arco

El equipo de soldadura (Figura IX.2) es muy sencillo, no muy caro y portátil; consiste en la fuente de energía, la conexión de masa y los cables de soldeo. El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido. No es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares. Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante debe emplearse siempre protegido del viento y de la lluvia.

Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos o cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases, por lo que se emplea en lugares relativamente alejados de la fuente

de energía. Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general mayores de 2 mm. y para la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.

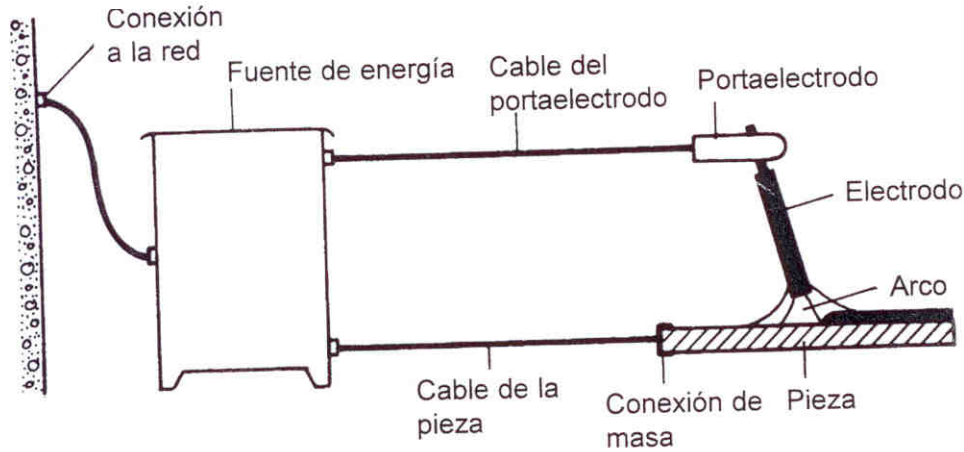


Figura IX.2: Esquema de una instalación para soldadura por arco.

Sin embargo como limitaciones de este procedimiento se puede señalar que es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos. Requiere gran habilidad por parte del soldador.

No es aplicable a metales de bajo punto de fusión como plomo, estaño, cinc y sus aleaciones, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos. Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio, circonio, tántalo y niobio, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.

Otra desventaja es que no es aplicable a espesores inferiores a 1,5-2 mm. La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo, como FCAW o GMAW. Esto se debe a que el electrodo sólo puede consumirse hasta una longitud mínima, unos 5 cm., cuando alcanza esa medida el soldador tiene que retirarlo e insertar uno nuevo.

A pesar de estas limitaciones la soldadura por arco con electrodos revestidos es uno de los procesos de mayor utilización, especialmente en soldaduras de producción cortas, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones en campo.

La mayor parte de las aplicaciones se dan con espesores comprendidos entre 3 y 38 mm. El proceso es aplicable a aceros al carbono, aceros aleados, inoxidable, fundiciones y metales no féreos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones. Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de maquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderas, refineries de petróleo, oleoductos y gaseoductos y en cualquier otro tipo de trabajo similar. Se puede aplicar en combinación con otros procesos de soldadura, por ejemplo en tuberías se completa la unión con la soldadura TIG, tratada con anterioridad en este trabajo.

En cuanto al tipo de corriente se puede realizar tanto en corriente alterna como con corriente continua, la elección dependerá del tipo de fuente de energía disponible, del electrodo a utilizar y del material base. Para el soldeo en corriente continua se utilizan transformadores-rectificadores o generadores y para corriente alterna transformadores. Para la selección de la fuente de energía se deberá tener en cuenta el electrodo que se va a emplear, de forma que pueda suministrar el tipo de corriente, rango de intensidades y tensión de vacío que se requiera. Los electrodos básicos necesitan mayores tensiones de vacío en comparación con los electrodos de rutilo o los ácidos. Salvo para algunos tipos de electrodos específicos, los básicos requieren corriente continua, mientras que los demás tipos de revestimientos pueden ser empleados indistintamente con las dos corrientes.

IX.3. ELECTRODOS REVESTIDOS

IX.3.1. Tipos de electrodos revestidos

El electrodo revestido es el elemento fundamental en el proceso de soldadura ya que establece el arco, protege el baño de fusión y al consumirse, produce la aportación del material que, unido al material fundido del metal base, va a constituir la soldadura.

Los electrodos revestidos (Figura IX.3) están formados por:

- 1.-Un alambre de sección circular uniforme, denominado *alma*, de composición normalmente similar a la del metal base. Hace de conductor de corriente para la alimentación del arco y de aporte de material para el llenado de la junta.
- 2.-El *revestimiento* que es un cilindro que envuelve el alma, concéntrico con ella y de espesor uniforme, constituido por una mezcla de compuestos que caracterizan el electrodo y que cumple varias funciones, las cuales evitan los inconvenientes del electrodo desnudo. (Figura IX.4).

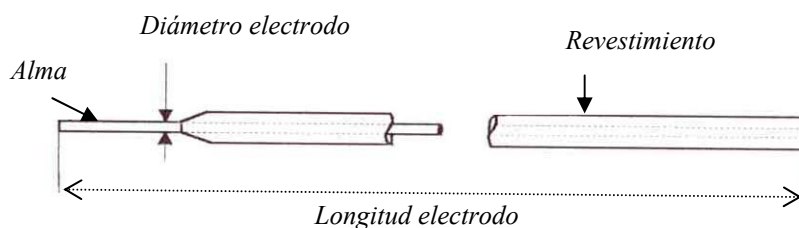


Figura IX.3: Esquema de un electrodo revestido

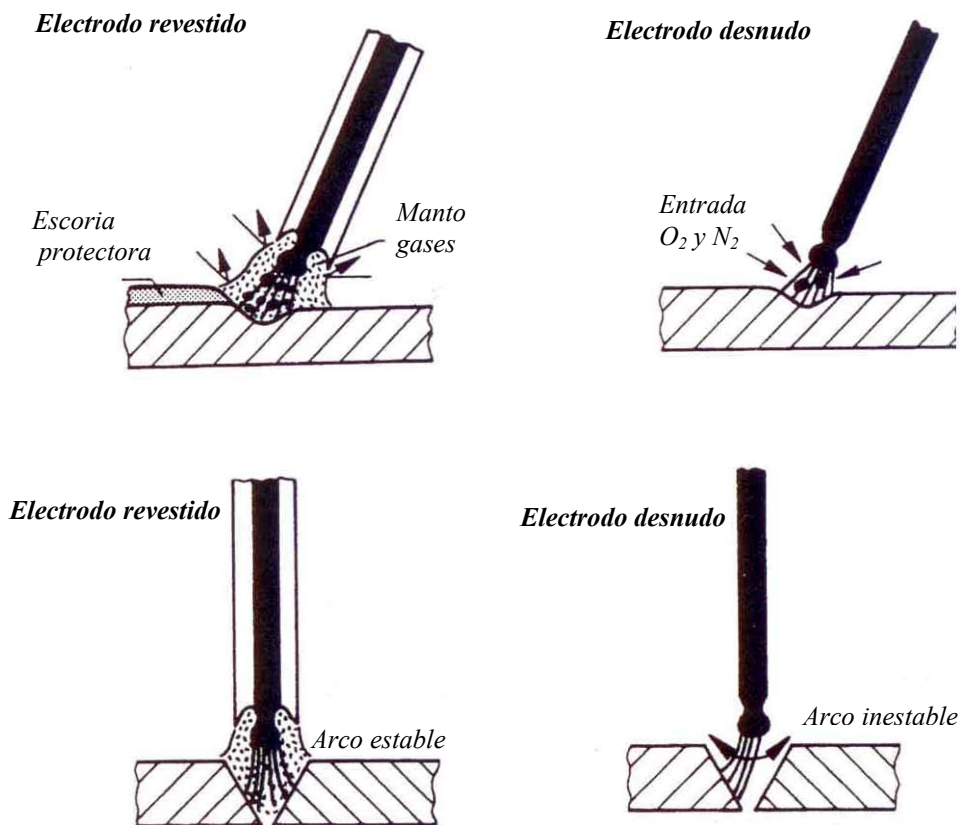


Figura IX.4: Esquema de las funciones del revestimiento del electrodo.

Las funciones más importantes del revestimiento si lo comparamos con los resultados obtenidos con un electrodo desnudo, son que los revestidos facilitan el cebado y estabilizan el arco, protegen el metal fundido impidiendo la entrada de oxígeno y del nitrógeno del aire que sería perjudicial para la soldadura. Para ello se producen gases que envuelven el arco y se produce escoria que recubre el metal fundido hasta que solidifique y se enfríe. La escoria protege el metal fundido desde el primer momento de la formación de las gotas. El revestimiento compensa la pérdida de elementos de aleación que se produce durante la fusión del metal base, o aporta elementos de aleación para mejorar las características del metal base.

Los electrodos tienen longitudes normalizadas de 150, 200, 250, 300, 350 y 450 mm. en función de su diámetro, siendo los más utilizados los de 250, 300 350 y 450 mm. Un extremo del alma está sin cubrir, en una longitud de 20 a 30 mm. para la inserción del

mismo en la pinza del portaelectrodo. Los diámetros del alma también están normalizados, los más comunes son de 1,6; 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6; 6,3; 8; 10; 12,5 mm., siendo los de 1,6; 2,5; 3,25 y 4 mm. los más empleados.

Atendiendo al espesor del revestimiento, o a la relación entre el diámetro del alma y el del revestimiento, los electrodos se clasifican en:

- *Delgados*: Los electrodos de revestimiento delgado protegen poco el metal fundido, por lo que sólo se utilizan en el aprendizaje de las técnicas de soldeo
- *Medios*: Estos electrodos obtienen una mayor estabilidad del arco, permiten el soldeo con corriente alterna y protegen mejor al metal soldado, la escoria recubre el metal ya solidificado reduciendo la velocidad de enfriamiento y la oxidación.
- *Gruesos*: Los electrodos con revestimiento grueso permiten obtener las mejores cualidades del metal soldado.

En función de su composición que determinará sus cualidades y aplicaciones, los principales tipos de electrodos son:

- *Electrodos con revestimiento ácido*
Los revestimientos de estos electrodos están formados por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas de manganeso y silicio. Garantizan una buena estabilidad del arco que los hace idóneos tanto para corriente alterna como para continua. Tienen un baño muy fluido que no permite soldaduras en determinadas posiciones; además no tienen un gran poder de limpieza en el material base y esto puede causar grietas. No soportan elevadas temperaturas de secado, con el consiguiente riesgo de humedad residual y por lo tanto de inclusiones de hidrógeno en la soldadura.
- *Electrodos con revestimiento al rutilo*
El revestimiento de estos electrodos está compuesto esencialmente por rutilo; óxido de titanio, compuesto muy estable que garantiza una óptima estabilidad

del arco y una elevada fluidez del baño. Facilita la formación de una escoria abundante y viscosa que permite un buen deslizamiento en la soldadura, sobretodo en posición horizontal. Sin embargo estos revestimientos no tienen una gran eficacia como limpiadores y por lo tanto sólo se aconsejan en los casos donde el material base no contiene muchas impurezas; además no secan bien y por lo tanto desarrollan mucho hidrógeno en la soldadura.

En algunas aplicaciones se combina el rutilo con otro componente típico de otros revestimientos, como la celulosa (electrodo rutilo-celulósico) o la fluorita (electrodo rutilo-básico). El objetivo es normalmente obtener un electrodo con arco estable pero con unas características de soldadura con mayor rendimiento. La estabilidad del arco permite el empleo de este tipo tanto en corriente alterna como continua con polaridad directa. Se usa sobretodo en espesores reducidos.

- *Electrodos con revestimiento celulósico*

El revestimiento de estos electrodos está formado sobretodo por celulosa integrada con aleaciones ferrosas (magnesio y silicio). El revestimiento se gasifica casi completamente, permitiendo de esta manera la soldadura también en posición vertical descendente, lo que no está permitido en otros tipos de electrodo; la elevada gasificación de la celulosa reduce la cantidad de escorias presentes en la soldadura. El elevado desarrollo de hidrógeno (derivado de la especial composición química del revestimiento) hace que la temperatura del baño sea elevada, con la fusión de una notable cantidad de material base, se obtienen de esta manera soldaduras que penetran en profundidad y con pocas escorias en el baño.

Las características mecánicas de la soldadura son óptimas; el nivel estético es bastante bajo ya que la casi total ausencia de la protección líquida ofrecida por el revestimiento impide una modelación del baño durante la solidificación.

La corriente de soldadura, dada la escasa estabilidad del arco, es normalmente en corriente continua con polaridad inversa.

- *Electrodos con revestimiento básico*

El revestimiento de los electrodos básicos está formado por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas y sobretodo por carbonatos de calcio y magnesio a los cuales, por adición de fluoruro de calcio, se obtiene la fluorita para facilitar la fusión. Tienen una elevada capacidad de depuración del material base, por lo que se obtienen soldaduras de calidad y con una notable robustez mecánica. Además, estos electrodos soportan elevadas temperaturas de secado, y por lo tanto no contaminan el baño con hidrógeno.

Sin embargo la florita hace que el arco sea muy inestable, el baño menos fluido, se producen frecuentes cortocircuitos debido a una transferencia del material de aporte con grandes gotas; el arco debe mantenerse muy corto por la escasa volatilidad del mismo revestimiento. Todas estas características hacen necesario que el soldador tenga una buena experiencia. Presentan una escoria dura y difícil de quitar.

Estos electrodos se prestan para realizar soldaduras en posiciones verticales. Se distinguen por la elevadísima cantidad de material depositado y se adaptan notablemente a la soldadura de juntas de grandes espesores. Son fuertemente higroscópicos y se aconseja mantenerlos en ambientes secos y en cajas bien cerradas; si esto no fuese posible, se debe efectuar un nuevo secado antes de su utilización.

En lo que se refiere a la corriente a emplear, se recomienda el empleo de generadores de corriente continua en polaridad inversa.

IX.3.2. Materias primas del revestimiento de los electrodos

La composición de los distintos recubrimientos en los electrodos utilizados en la soldadura por arco eléctrico, como se ha comentado anteriormente, depende de cada fabricante. Los minerales utilizados y las cantidades presentes en cada tipo de electrodo

son propiedad de la empresa fabricante, aunque suelen facilitarse los porcentajes de algunos de los metales que contienen para información del consumidor.

En este trabajo, y en colaboración con la empresa de soldadura que proporcionó los electrodos toriados analizados en capítulos anteriores, se hace una recopilación de las materias primas utilizadas en la fabricación de los distintos electrodos revestidos. Fabrican aproximadamente 80 tipos diferentes de electrodos para este tipo de soldadura con una producción media de un millón de electrodos al día.

Se procedió a la recogida de las 63 materias utilizadas, en botes de polipropileno Brand de 7,3 cm de diámetro y un volumen de 120 ml. A continuación en la Tabla IX.1., se enumeran los productos (tal y como aparecen descritos en el envase que los contiene) junto con la cantidad de cada uno de ellos y con algunas observaciones sobre su composición para algunos metales, dicha información ha sido facilitada por la propia empresa.

Dichos productos están almacenados en sacos, son la mayoría de ellos material en polvo; también se analizan los pigmentos colorantes que se utilizan en algunos electrodos para diferenciarlos de otros fabricantes.

	MATERIA PRIMA	PESO(Kg)	OBSERVACIONES
1	F10 Carbonato cálcico	0,0769	CaCO ₃ con SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgCO ₃
2	F25 Dolomita	0,1090	CaMg(CO ₃) ₂ con SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ ...
3	R10 Celulosa	0,0180	
4	P11 Ferromanganeso	0,2365	Mn y Fe y otros elementos
5	K25 Carbonato de hierro	0,1117	FeCO ₃
6	P30 Ferrosilicio 45%	0,2573	Fe y Si
7	E41 Rutilo molido	0,1480	TiO ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅
8	P50 Magnesio en polvo	0,0778	Mg
9	Q33 Ferrocromo afinado	0,3296	Fe, Cr y otros elementos
10	G20E Feldespato Potásico	0,0730	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O con Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO
11	S12 Carbonato Potásico	0,1230	K ₂ CO ₃
12	P17 Ferromanganeso.carbur	0,3224	Mn, Fe, C y otros elementos
13	E40A Rutilo (africano)	0,2210	TiO ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅
14	E40 Rutilo (australiano)	0,2123	TiO ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅
15	M20APolvo Hierro W40/29	0,3043	Fe y pequeñas cantidades de otros elementos
16	K10 Oligisto	0,2324	Fe ₂ O ₃ con SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, MnO...
17	E60 Ilmenita	0,1960	TiO ₂ y Fe ₂ O ₃ con SiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅
18	G30 Mica en polvo	0,0575	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O con gO, CaO, TiO ₂
19	G16 Silice de Neubourg	0,0367	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ con SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O
20	F70X Espato Fluor	0,1011	CaF ₂ 97% con TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO
21	R40 Alginato Cálcico	0,0350	CaO con Na ₂ O, K ₂ O, NaCl
22	R50 Resina polyox	0,0280	Oxido de polietileno
23	R48 Goma arábica	0,0433	
24	P20Manganeso electrolítico	0,3055	Mn
25	E70 Silicato de zirconio	0,2214	SiO ₂ , ZrO ₂ con TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO...
26	G57 Talco	0,0462	SiO ₂ , MgO, Al ₂ O ₃ y Fe ₂ O ₃ con TiO ₂ , CaO
27	G40 Caolín	0,0330	SiO ₂ y Al ₂ O ₃ , K ₂ O con TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Na ₂ O, MgO...
28	F30 Carbonato de bario	0,0956	BaCO ₃ , SrCO ₃
29	G60A Wollastonita	0,0675	CaO y SiO ₂

	MATERIA PRIMA	PESO(Kg)	OBSERVACIONES
30	G33 Mica calcinada	0,0300	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ ,Na ₂ O,K ₂ OconMgO,CaO,TiO ₂
31	R44 Carboximetilcelulosa	0,0514	C y pequeñas cantidades de NaCl
32	G31 Mica calcinada	0,0212	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ ,Na ₂ O,K ₂ OconMgO,CaO,TiO ₂
33	G41 Bentonita	0,0622	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ ,Na ₂ O,K ₂ O con MgO,CaO
34	G22 Fonolita	0,0760	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Na ₂ O,K ₂ OconFe ₂ O ₃ ,CaO,MgO,TiO ₂
35	G21 Nefelina Sienita	0,0644	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Na ₂ O,K ₂ O con CaO
36	G20M80Feldespatopotásico	0,0740	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Na ₂ O,K ₂ O con Fe ₂ O ₃ ,CaO,MgO
37	E45 Dióxido de titanio	0,0528	TiO ₂ ,SiO ₂ ,ZrO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ ,Cr ₂ O ₃ ,V ₂ O ₅ ,Nb ₂ O ₅
38	R25 Harina de madera	0,0103	
39	R26 Harina de coco	0,0440	
40	Q70 Cobre en polvo	0,2194	Cu
41	S71A Zink-Fritte	0,0602	Esmalte
42	Q28 Ferromolibdeno	0,3120	Fe y Mo
43	P45 Aluminio en polvo	0,0887	Al
44	Q17 Níquel en polvo	0,1980	Ni
45	K92 Oxido de níquel	0,1725	NiO
46	Q36 Ferrocromo carbur.	0,2441	Fe,Cr, C y otros elementos
47	P40 Ferrotitanio	0,2071	Fe, Ti Al y otros elementos
48	Q38A Cromo carburado	0,2227	Fe, Cr, C Y otros elementos
49	Q30A Cromo	0,2346	Cr
50	E50 Titanato potásico	0,0734	TiO ₂ y K ₂ O con SiO ₂ ,ZrO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃
51	F20 Magnesita cruda rey	0,0563	
52	G10 Sílice	0,0768	SiO ₂ conTiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ ,CaO,MgO,Na ₂ O,K ₂ O
53	K16 Oxido férrico	0,0582	Fe ₂ O ₃ , SiO ₂
54	G73 Alúmina calcinada	0,0732	
55	K46 Hausmanita	0,0736	Mn ₃ O ₄ con Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃
56	P70 Carburo de silicio	0,1150	
57	S10 Carbonato sódico	0,0417	Na ₂ CO ₃
58	R72 Pigmento azul	0,0257	

	MATERIA PRIMA	PESO(Kg)	OBSERVACIONES
59	R72/V Pigmento verde	0,0275	
60	R81 Pigmento azul	0,0271	Oxido de Cr, Co y Al
61	P81 Grafito	0,0267	(87-90%)
62	R-51 Napol	0,0520	Detergente líquido
63	B-1 Silicato	0,0803	Detergente líquido

Tabla IX.1: Listado de Materias primas analizadas por espectrometría gamma y observaciones de interés sobre su composición química.

Algunas de estas sustancias se mezclan en una tolva en distintas cantidades según el tipo de revestimiento y según el tipo de electrodo que se esté fabricando.

IX.4. ANALISIS POR ESPECTROMETRIA GAMMA DE LAS MATERIAS PRIMAS DE LOS ELECTRODOS REVESTIDOS

IX.4.1. Introducción

Con objeto de efectuar una primera evaluación de la radiactividad de los recubrimientos y decidir sobre un posible trabajo más detallado se procedió al análisis por espectrometría gamma de las materias primas que se utilizan en los recubrimientos de los electrodos utilizados en la soldadura por arco eléctrico. Este análisis ha proporcionado información sobre los isótopos emisores gamma que están presentes en los electrodos y que podrían suponer un potencial riesgo radiológico para los usuarios de este tipo de soldadura.

Los isótopos emisores gamma analizados son los correspondientes a las cadenas de desintegración del U^{238} y del Th^{232} ; cuyas energías de emisión, intensidades y tiempos de desintegración presentamos en las Tablas IX.2 y IX.3. Junto con estos emisores se han analizado también los isótopos artificiales: Am^{241} , Cs^{137} , Co^{60} y el isótopo natural

de potasio K^{40} . Los valores de las energías de las emisiones gamma de estos últimos, se presentan en la Tabla IX.4.

ISOTOPO	ENERGIA (keV)	INTENSIDAD	PERIODO
Pb^{210}	46,503	4,25	22,26 años
Ra^{226}	186,21	3,59	1.600 años
Pb^{214}	295,224	19,3	26,8 min
	351,932	37,6	26,8 min
Bi^{214}	609,312	46,1	19,9 min
	1764,49	15,4	19,9 min

Tabla IX.2: Energías de emisión gamma de los isótopos de la cadena de desintegración radiactiva del U^{238} .

ISOTOPO	ENERGIA (keV)	INTENSIDAD	PERIODO
Pb^{212}	238,632	43,3	10,643horas
Tl^{208}	583,14	84,5	3,052 min
	860,37	12,455	3,052 min
	2614,5	99,8	3,052 min
Bi^{212}	727,33	6,58	60,55 min
Ac^{228}	911,204	25,8	6,15 horas
	968,971	15,8	6,15 horas

Tabla IX.3: Energías de emisión gamma de los isótopos de la cadena de desintegración radiactiva del Th^{232} .

ISOTOPO	ENERGIA (keV)	INTENSIDAD	PERIODO
Am^{241}	59,541	35,9	432,2 años
Cs^{137}	661,657	85,1	30,07 años
Co^{60}	1173,237	99,9736	5,2714 años
	1332,501	99,9856	5,2714 años
K^{40}	1460,83	11	1.277M.años

Tabla IX.4: Energías de emisión gamma de los isótopos artificiales Am^{241} , Cs^{137} , Co^{60} y del isótopo natural K^{40} .

IX.4.2. Procedimiento de preparación del patrón de calibración para espectrometría gamma

En el Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) se procedió a la preparación de un patrón de calibración para espectrometría gamma con la misma geometría que la utilizada en el análisis de las materias que conforman los distintos revestimientos y siguiendo las recomendaciones del CSN [19].

La matriz utilizada como soporte del patrón de calibración es un suelo seco, triturado y tamizado a 0,5 mm., con un peso de 108,1 gr. Dicha muestra se colocó en un bote cilíndrico de polipropileno Brand de 7,3 cm. de diámetro y 120 ml. de capacidad.

Se utilizaron dos soluciones patrón certificadas que contienen los radionucleidos emisores gamma de interés y que cubren el rango energético objeto de la calibración. El volumen total de las soluciones a verter en la matriz debe ser como máximo de 2 ml., ya que es la cantidad máxima que este volumen de suelo es capaz de absorber sin correr el riesgo de filtrado de la solución al fondo del recipiente.

Las soluciones patrón contienen los radionucleidos que aparecen en la siguiente Tabla IX.5 y en las concentraciones de actividad certificadas por el CIEMAT que se indican.

RADIONUCLEIDO	CONCENTRACION DE ACTIVIDAD
Am^{241}	$53,1 \pm 0,8 \text{ Bq/ml}$
Pb^{210}	$456 \pm 9 \text{ Bq/ml}$
Na^{22}	$427 \pm 8 \text{ Bq/gr}$
Co^{60}	$99,4 \pm 1,5 \text{ Bq/gr}$
Cs^{137}	$43,0 \pm 1.0 \text{ Bq/gr}$

Tabla IX.5: Concentraciones de actividad de los radionucleidos de las soluciones patrón.

Todo el proceso se llevó a cabo en campana extractora. Se vertió con una pipeta calibrada la solución patrón en el suelo, contenido en la caja con la geometría de medida. La dosificación de la solución patrón se efectuó homogeneizando la densidad superficial de gotas, sin verter ninguna gota en el mismo punto en el que ya había caído otra gota previamente, dado que esto podría provocar filtración, con la consecuente llegada del trazador al fondo y la pérdida de actividad. La forma más eficaz de obtener una dosificación superficial aproximadamente homogénea consiste en trazar diámetros, manteniendo una distancia de seguridad entre los extremos del diámetro y el recipiente, al objeto de que el trazador no llegue a las paredes del recipiente. Como ya se ha indicado, el volumen máximo de trazador que podía verterse en el suelo era de 2 ml.

A continuación se puso a secar el patrón en el horno (60°C) durante 24 horas, el secado se llevó a cabo con la caja abierta, utilizando papel de aluminio a modo de tapadera de la misma, y efectuando una serie de pequeñas incisiones en el citado papel, con el objeto de permitir la salida de los vapores del secado de los ácidos de la solución. Una vez seco el suelo, se llevó a la campana extractora, donde se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Se procedió a disgregar los grumos formados en el proceso de secado, y a homogeneizar el trazador en la muestra. Se empleó una varilla de vidrio y se disgregaron las gotas secas, se pasó el contenido a una vasija grande de vidrio para triturar y remover bien el suelo. Para terminar se pasó el contenido a la caja con una cuchara y se disgregaron los posibles grumos presentes en la misma cuchara con la varilla antes de depositarlos. Se aplanó ligeramente la superficie del suelo con la cuchara, al objeto de conseguir una geometría aproximadamente cilíndrica. Se puso la tapa y se selló con cinta adhesiva. El patrón quedó preparado para su medida por espectrometría gamma.

IX.4.3. Resultados obtenidos por espectrometría gamma

El detector utilizado para la espectrometría gamma es un detector de germanio de bajo fondo de Canberra Extended Range. La eficiencia, calculada tomando como referencia la de un cristal de yoduro sódico dopado con talio de 3x3x3 pulgadas de tamaño es de 43,7 % y 1,77 keV de resolución para 1.332 keV.

Se inició el análisis por espectrometría gamma con la medida del patrón de calibración durante veinticuatro horas. El espectro de las emisiones gamma, características de los radionucleidos presentes en el patrón, se incluye a continuación en la Figura IX.5

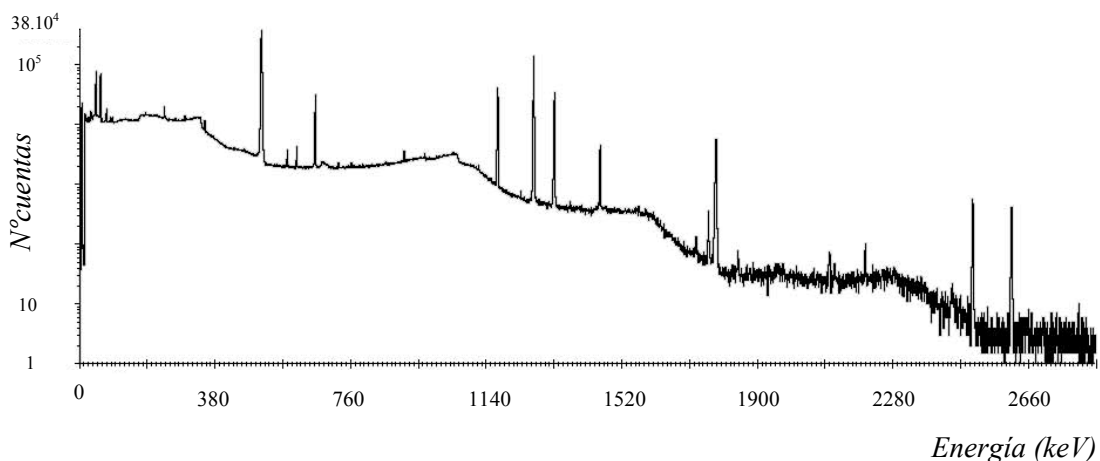


Figura IX.5: Espectro gamma del patrón de calibración.

También se presenta la correspondiente curva de calibración en eficiencia en la Figura IX.6 que se emplea para calcular la eficiencia para valores de energía superiores a 150 keV. Sin embargo para los isótopos de Am^{241} y Pb^{210} se calcula la eficiencia manualmente ya que la calibración para energías menores de 150 keV no se ajusta a una recta y resulta más exacto trabajar con eficiencias puntuales. En este trabajo, con la geometría utilizada y con el detector de germanio empleado, se obtiene una eficiencia para el Am^{241} de 0,0814 y para el Pb^{210} de 0,0711.

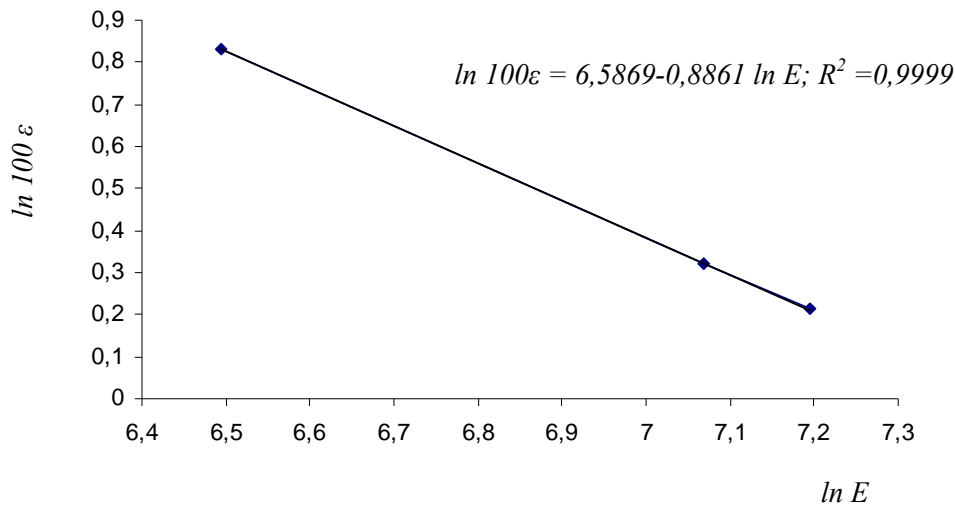


Figura IX.6: Curva de calibración en eficiencia del patrón gamma.

Se llevó a cabo también la medida del fondo del laboratorio durante 60 horas para tener en cuenta en el cálculo de la actividad de los distintos radionucleidos. A continuación se incluyen el espectro de emisión y una tabla con los radionucleidos detectados para cada una de las 63 materias. Se ha realizado una medición de veinticuatro horas para cada una de ellas en detector de germanio. En la tabla se presentan los valores de actividad por unidad de masa y la incertidumbre expandida con un factor de cobertura k igual a 2 y el valor de la actividad mínima detectable.

Materia 1: F-10 Carbonato de cal

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	163±60	8,108E+00	2,984E+00	5,324E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	184±80	1,194E+01	5,191E+00	4,833E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	390±84	6,470E+00	1,393E+00	1,140E+00
	351,932	697±93	6,935E+00	9,253E-01	5,169E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	494±75	6,520E+00	9,899E-01	4,960E-01
	1.764,49	80±39	8,109E+00	3,953E+00	1,845E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	6,629E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	3,859E-01
	860,37	-	-	-	2,574E+00
	2.614,5	-	-	-	4,332E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	4,396E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	1,421E+00
	968,971	-	-	-	2,031E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	5,918E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	3,576E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	3,678E-01
	1.332,501	-	-	-	3,970E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	66±34	7,923E+00	4,081E+00	2,757E+00

Tabla IX.6: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 1.

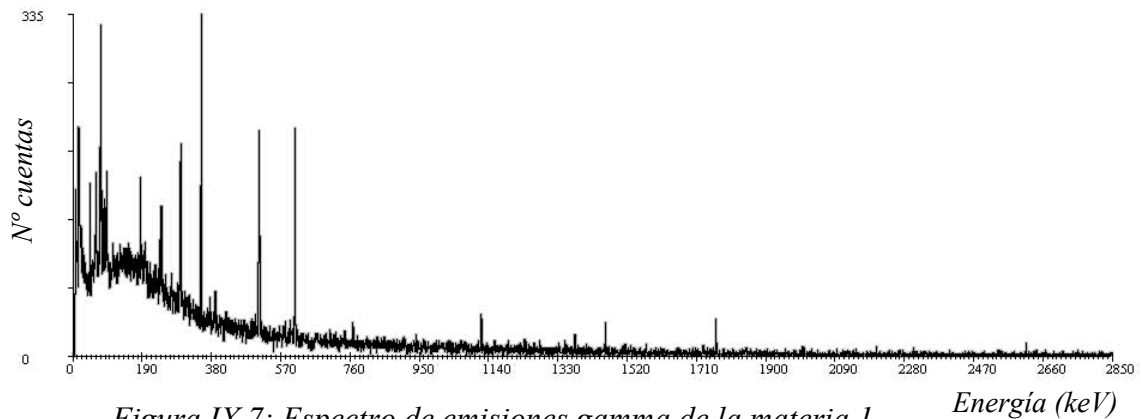


Figura IX.7: Espectro de emisiones gamma de la materia 1.

Materia 2: F-25 Dolomita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	296±90	3,061E+00	9,307E-01	2,786E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	484±101	2,217E+01	4,627E+00	3,687E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	879±106	1,030E+01	1,242E+00	1,080E+00
	351,932	1.433±136	1,007E+01	9,554E-01	4,027E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	1.024±106	9,542E+00	9,878E-01	3,877E-01
	1.764,49	185±46	1,324E+01	3,292E+00	1,372E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	5,309E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	2,693E-01
	860,37	-	-	-	2,043E+00
	2.614,5	-	-	-	2,260E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	3,555E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	93±70	2,212E+00	1,665E+00	9,952E-01
	968,971	-	-	-	1,539E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	4,804E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	2,716E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	2,501E-01
	1.332,501	-	-	-	3,002E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	2,887E+00

Tabla IX.7: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 2.

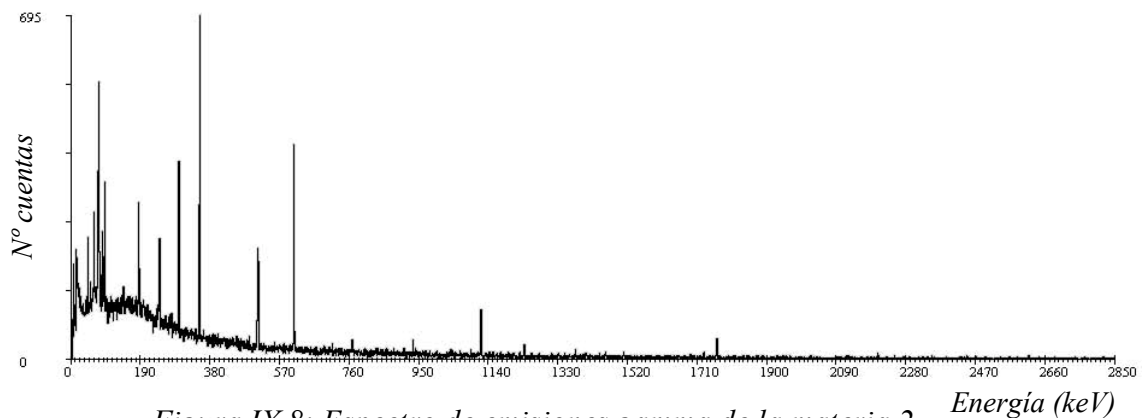


Figura IX.8: Espectro de emisiones gamma de la materia 2.

Materia 3: R-10 Celulosa

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,978E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	2,874E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	5,966E+00
	351,932	-	-	-	3,307E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	3,102E-01
	1.764,49	-	-	-	1,020E+01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	2,535E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,519E+00
	860,37	-	-	-	9,800E+00
	2.614,5	-	-	-	2,013E+00
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	2,117E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	5,273E+00
	968,971	-	-	-	9,527E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,967E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,491E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,211E+00
	1.332,501	-	-	-	1,507E+00
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,363E+01

Tabla IX.8: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 3.

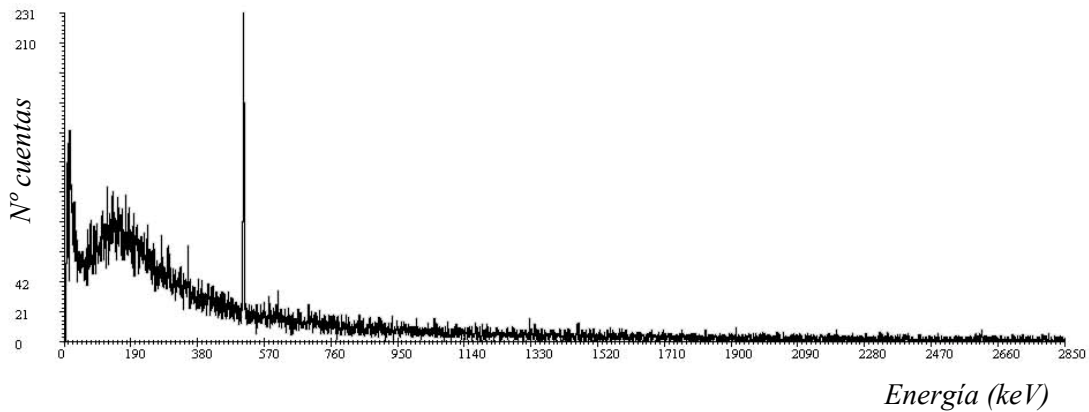


Figura IX.9: Espectro de emisiones gamma de la materia 3.

Materia 4: P-11 Ferromanganeso

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,461E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	2,300E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	4,736E-01
	351,932	-	-	-	2,420E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,421E-01
	1.764,49	-	-	-	6,366E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,930E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,200E-01
	860,37	-	-	-	8,538E-01
	2.614,5	-	-	-	1,544E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,596E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,652E-01
	968,971	-	-	-	6,545E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,517E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,114E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,124E-01
	1.332,501	-	-	-	1,256E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,218E+00

Tabla IX.9: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 4.

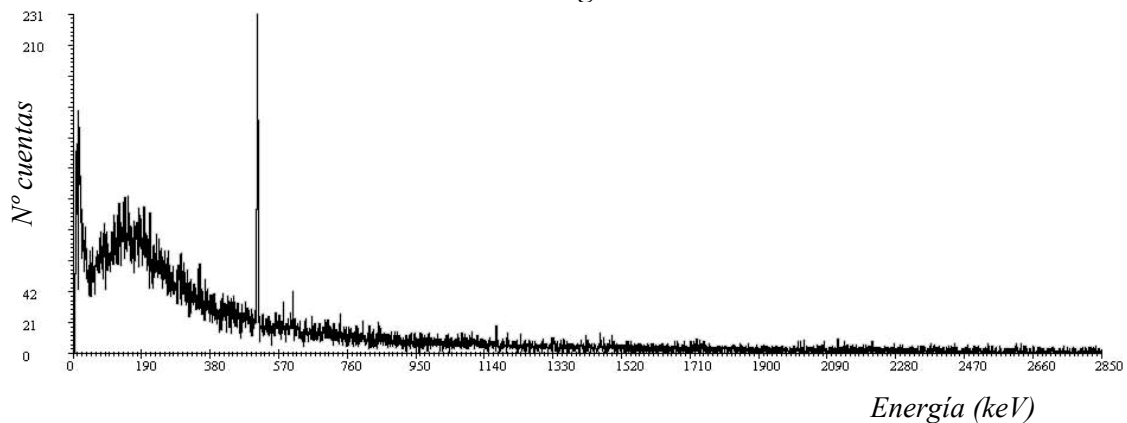


Figura IX.10: Espectro de emisiones gamma de la materia 4.

Materia 5: K-25 Carbonato de hierro

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	157±96	5,415E+00	3,311E+00	4,794E-01
Ra^{226}	186,21	491±104	2,209E+01	4,679E+00	3,848E+00
Pb^{214}	295,224	668±104	7,683E+00	1,196E+00	7,631E-01
	351,932	1.205±122	8,312E+00	8,416E-01	4,214E-01
Bi^{214}	609,312	905±101	8,281E+00	9,242E-01	4,140E-01
	1.764,49	158±43	1,110E+01	3,022E+00	1,311E+00
Pb^{212}	238,632	446±111	1,8993E+00	4,712E-01	3,329E-01
Tl^{208}	583,14	183±54	8,787E-01	2,543E-01	3,142E-01
	860,37	-	-	-	2,286E+00
	2.614,5	69±29	1,060E+00	4,456E-01	1,578E-01
Bi^{212}	727,33	-	-	-	3,831E+00
Ac^{228}	911,204	128±48	2,990E+00	1,121E+00	8,091E-01
	968,971	79±40	3,182E+00	1,611E+00	1,269E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	4,794E-01
Cs^{137}	661,657	-	-	-	2,933E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	3,143E-01
	1.332,501	-	-	-	2,814E-01
K^{40}	1.460,83	729±87	6,067E+01	7,241E+00	2,174E+00

Tabla IX.10: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 5.

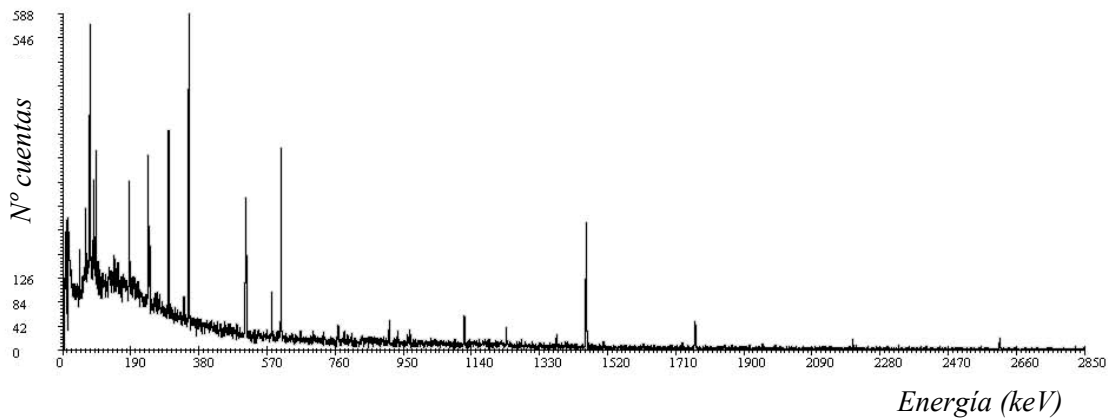


Figura IX.11: Espectro de emisiones gamma de la materia 5.

Materia 6: P-30 Ferrosilicio

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	-	-	-	1,618E+00
Ra^{226}	186,21	390±95	7,578E+00	4,846E+00	1,559E+00
Pb^{214}	295,224	-	-	-	4,608E-01
	351,932	-	-	-	2,488E-01
Bi^{214}	609,312	-	-	-	2,194E-01
	1.764,49	-	-	-	7,455E-01
Pb^{212}	238,632	2.079±157	3,812E+00	2,879E-01	1,440E-01
Tl^{208}	583,14	652±86	1,352E+00	1,784E-01	8,716E-02
	860,37	81±34	1,609E+00	6,752E-01	8,520E-01
	2.614,5	252±51	1,672E+00	3,384E-01	1,080E-01
Bi^{212}	727,33	135±45	4,373E+00	1,458E+00	9,767E-01
Ac^{228}	911,204	-	-	-	3,930E-01
	968,971	-	-	-	6,787E-01
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,769E-01
Cs^{137}	661,657	-	-	-	1,078E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	9,696E-02
	1.332,501	-	-	-	1,113E-01
K^{40}	1.460,83	-	-	-	1,124E+00

Tabla IX.11: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 6.

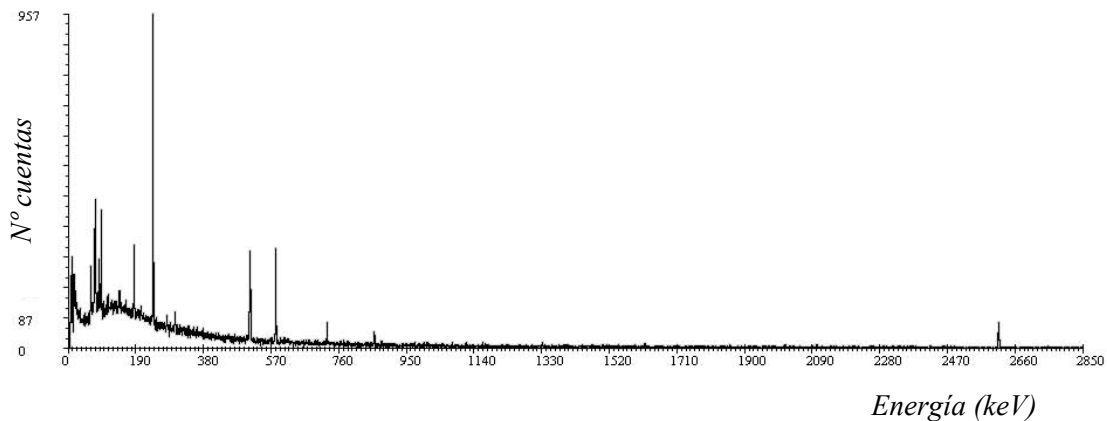


Figura IX.12: Espectro de emisiones gamma de la materia 6.

Materia 7: E-41 Rutilo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	7.595±461	1,964E+02	1,192E+01	9,325E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	23.643±610	7,977E+02	2,058E+01	1,343E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	47.700±722	4,115E+02	6,228E+00	2,338E+00
	351,932	82.280±896	4,257E+02	4,6363E+00	1,263E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	59.066±749	4,054E+02	5,140E+00	1,192E+00
	1.764,49	9.491±305	5,003E+02	1,608E+01	4,158E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	31.692±673	1,009E+02	2,143E+00	1,377E+00
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	11.656±363	4,198E+01	1,307E+00	6,211E-01
	860,37	1.452±174	5,007E+01	6,001E+00	4,419E+00
	2.614,5	4.001±201	4,611E+01	2,316E+00	5,777E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	2.645±216	1,488E+02	1,215E+01	8,391E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	8.030±308	1,407E+02	5,395E+00	2,382E+00
	968,971	4.135±243	1,249E+02	7,340E+00	4,276E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,925E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	8,822E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	7,775E-01
	1.332,501	-	-	-	7,878E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	641±192	4,001E+01	1,198E+01	7,315E+00

Tabla IX.12: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 7.

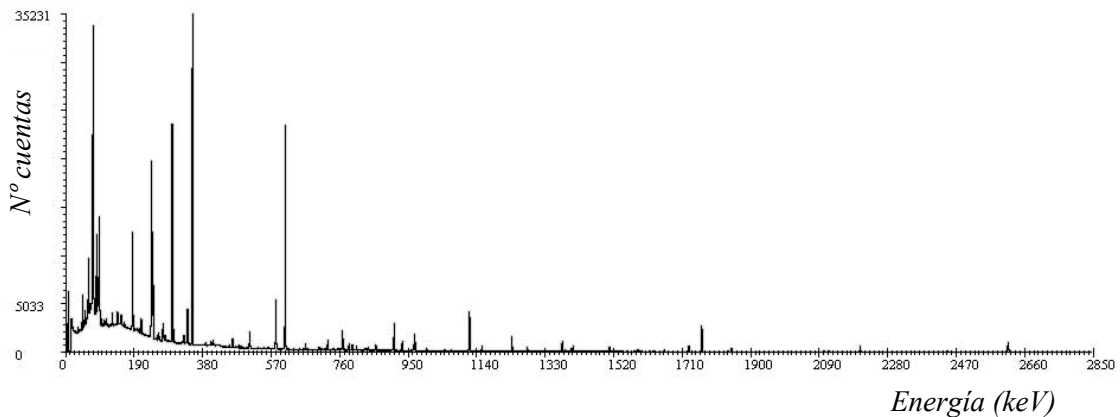


Figura IX.13: Espectro de emisiones gamma de la materia 7.

Materia 8: P-50 Magnesio en polvo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	322±80	1,584E+01	3,936E+00	3,117E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	6,709E+00
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	-	-	-	1,424E+00
	351,932	-	-	-	4,369E-01
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	65±40	8,486E-01	5,222E-01	4,430E-01
	1.764,49	-	-	-	2,241E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	-	-	-	6,098E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	-	-	-	3,463E-01
	860,37	-	-	-	2,582E+00
	2.614,5	-	-	-	4,029E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	4,488E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	1,158E+00
	968,971	-	-	-	1,953E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	4,753E-01
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	3,188E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	3,477E-01
	1.332,501	-	-	-	2,424E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	-	-	-	3,089E+00

Tabla IX.13: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 8.

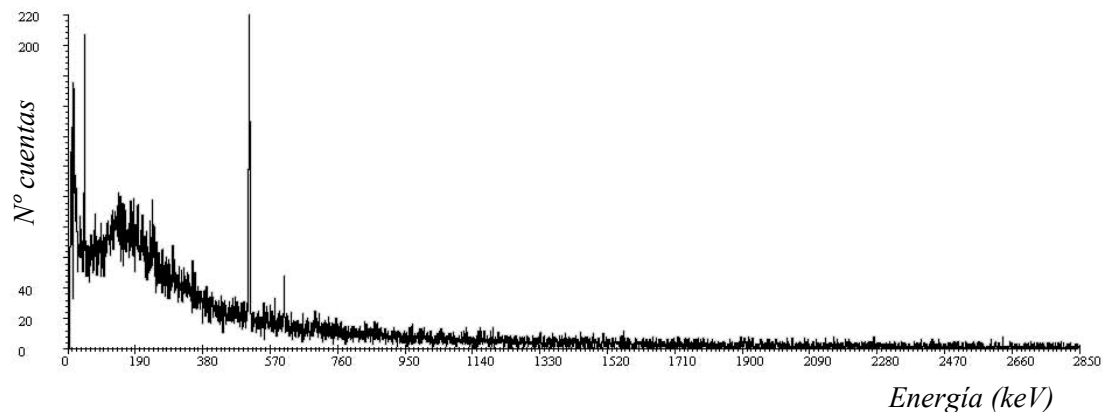


Figura IX.14: Espectro de emisiones gamma de la materia 8.

Materia 9: Q-33 Ferrocromo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	.
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,587E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	3,368E-01
	351,932	-	-	-	1,033E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,048E-01
	1.764,49	-	-	-	5,299E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,442E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	8,189E-02
	860,37	-	-	-	6,106E-01
	2.614,5	-	-	-	9,528E-02
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,061E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	2,738E-01
	968,971	-	-	-	4,618E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,124E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	7,538E-02
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	8,222E-02
	1.332,501	-	-	-	5,732E-02
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	7,304E-01

Tabla IX.14: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 9.

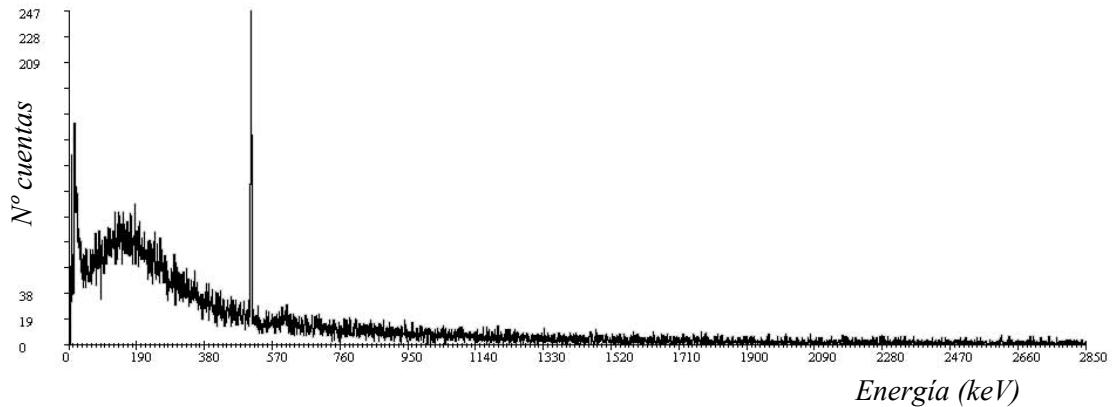


Figura IX.15: Espectro de emisiones gamma de la materia 9.

Materia 10: Q-20E Feldespato potásico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	-	-	-	1,591E+01
Ra^{226}	186,21	174±123	1,190E+01	8,414E+00	8,822E+00
Pb^{214}	295,224	223±104	3,900E+00	1,819E+00	1,703E+00
	351,932	380±110	3,986E+00	1,154E+00	1,035E+00
Bi^{214}	609,312	284±88	3,952E+00	1,224E+00	1,051E+00
	1.764,49	52±30	5,557E+00	3,206E+00	2,107E+00
Pb^{212}	238,632	684±128	4,416E+00	8,263E-01	7,177E-01
Tl^{208}	583,14	219±89	1,599E+00	6,498E-01	5,574E-01
	860,37	-	-	-	6,551E+00
	2.614,5	98±33	2,290E+00	7,710E-01	6,649E-01
Bi^{212}	727,33	-	-	-	1,098E+01
Ac^{228}	911,204	194±81	6,890E+00	2,877E+00	2,586E+00
	968,971	-	-	-	6,311E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,558E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	7,765E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,371E+00
	1.332,501	-	-	-	9,015E-01
K^{40}	1.460,83	22.240±437	2,815E+03	5,530E+01	5,008E+00

Tabla IX.15: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 10.

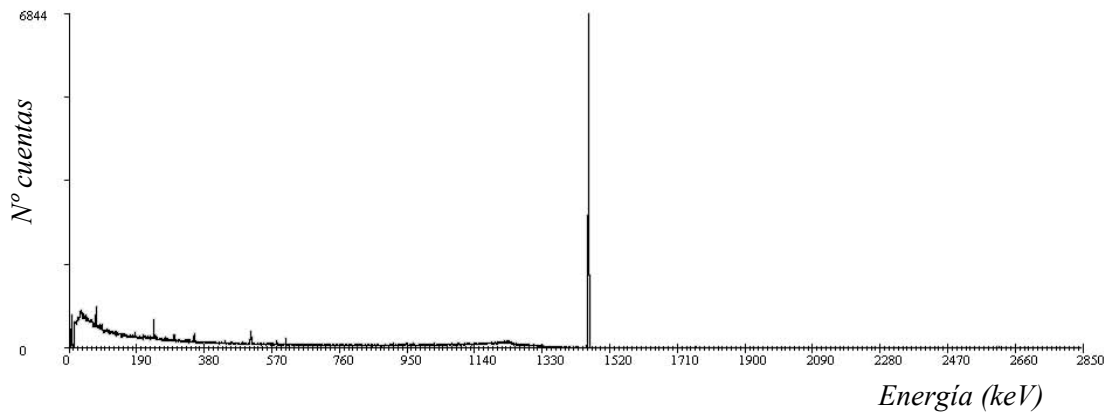


Figura IX.16: Espectro de emisiones gamma de la materia 10.

Materia 11: S-12 Carbonato potásico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	2,474E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,884E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	4,055E+01
	351,932	-	-	-	2,190E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	2,246E+00
	1.764,49	-	-	-	1,664E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,702E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,188E+00
	860,37	-	-	-	1,069E+01
	2.614,5	-	-	-	2,676E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,739E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	5,484E+00
	968,971	-	-	-	9,978E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	2,569E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,272E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	2,382E+00
	1.332,501	-	-	-	1,545E+00
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	211.952±1350	1,592E+04	1,014E+02	7,406E+00

Tabla IX.16: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 11.

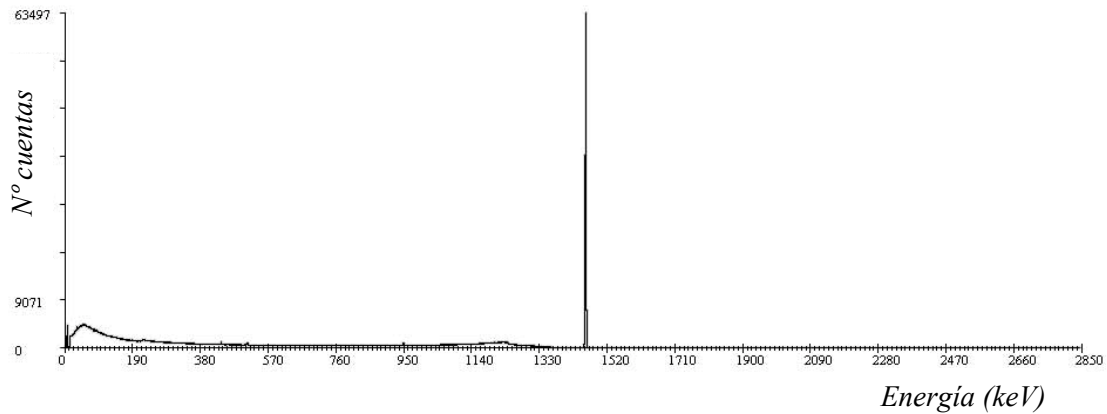


Figura IX.17: Espectro de emisiones gamma de la materia 11.

Materia 12: P-17 Ferromanganeso

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	100±59	1,187E+00	7,006E-01	6,894E-01
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	1,787E+00
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	84±56	3,326E-01	2,218E-01	2,115E-01
	351,932	126±61	2,993E-01	1,449E-01	1,290E-01
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	130±53	4,096E-01	1,670E-01	1,278E-01
	1.764,49	34±27	8,227E-01	6,533E-01	4,174E-01
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	96±60	1,403E-01	8770E-02	9,339E-02
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	58±41	9,588E-02	6,778E-02	6,160E-02
	860,37	-	-	-	1,089E+00
	2.614,5	26±20	1,375E-01	1,058E-01	8,612E-02
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	1,089E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	3,122E-01
	968,971	-	-	-	5,294E-01
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,160E-01
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	8,539E-02
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	8,765E-02
	1.332,501	-	-	-	7,413E-02
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	-	-	-	5,826E-01

Tabla IX.17: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 12.

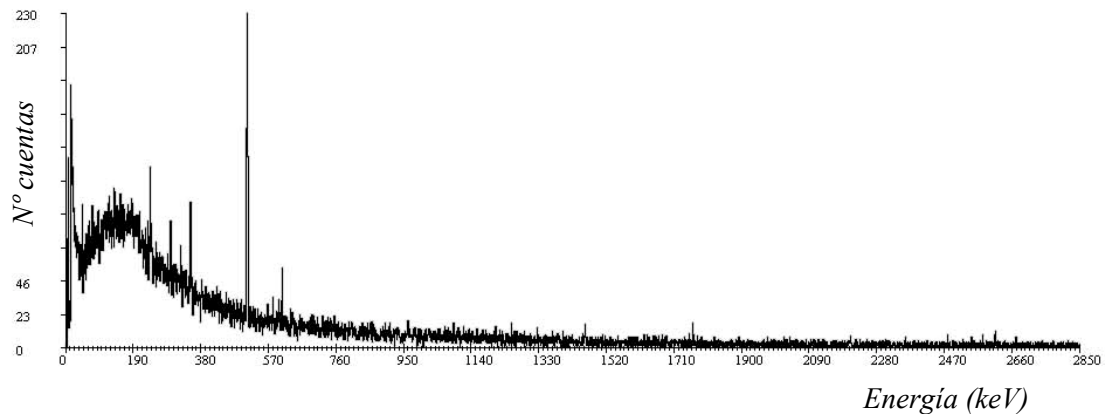


Figura IX.18: Espectro de emisiones gamma de la materia 12.

Materia 13: E-40 A Rutilo africano

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	5.655±388	9,795E+01	6,721E+00	6,280E+00
Ra^{226}	186,21	21.362±616	4,827E+02	1,392E+01	9,617E+00
Pb^{214}	295,224	44.344±697	2,562E+02	4,026E+00	1,631E+00
	351,932	76.334±876	2,645E+02	3,035E+00	8,796E-01
Bi^{214}	609,312	55.674±728	2,559E+02	3,346E+00	7,990E-01
	1.764,49	9.288±303	3,278E+02	1,070E+01	2,601E+00
Pb^{212}	238,632	36.502±706	7,783E+01	1,505E+00	9,423E-01
Tl^{208}	583,14	13.438±396	3,241E+01	9,550E-01	4,224E-01
	860,37	1.619±177	3,739E+01	4,088E+00	2,999E+00
	2.614,5	4.772±217	3,683E+01	1,675E+00	3,032E-01
Bi^{212}	727,33	2.937±223	1,106E+02	8,400E+00	5,606E+00
Ac^{228}	911,204	9.307±326	1,092E+02	3,824E+00	1,585E+00
	968,971	4.988±255	1,009E+02	5,158E+00	2,743E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,273E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	6,134E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	5,101E-01
	1.332,501	-	-	-	5,133E-01
K^{40}	1.460,83	-	-	-	5,238E+00

Tabla IX.18: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 13.

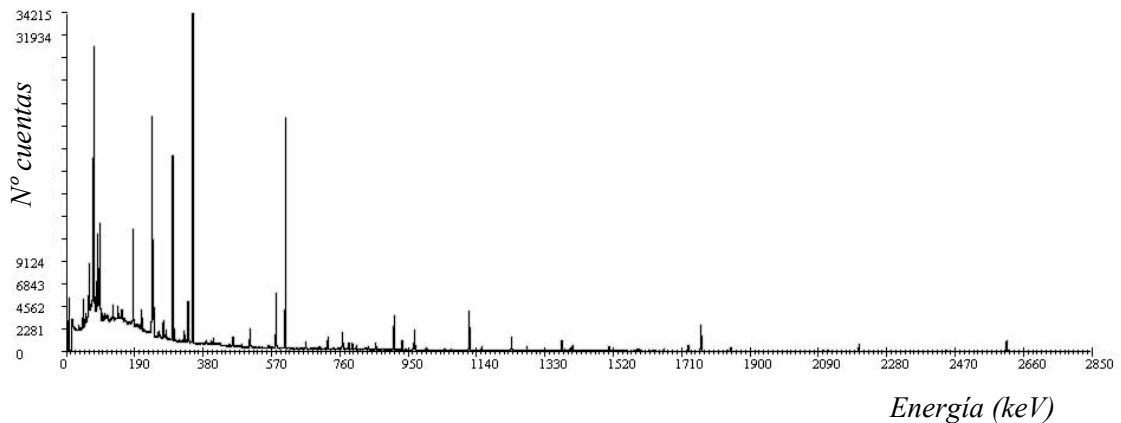


Figura IX.19: Espectro de emisiones gamma de la materia 13.

Materia 14: E-40 Rutilo australiano

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	10.174±491	1,835E+02	8,853E+00	7,759E+00
Ra^{226}	186,21	37.612±774	8,847E+02	1821E+01	1,154E+01
Pb^{214}	295,224	80.167±919	4,821E+02	5,526E+00	1,972E+00
	351,932	136.868±1156	4,936E+02	4,169E+00	1,072E+00
Bi^{214}	609,312	98.974±959	4,735E+02	4,588E+00	9,441E-01
	1.764,49	16.784±400	6,167E+02	1,470E+01	2,956E+00
Pb^{212}	238,632	3.905±351	8,668E+00	7,7915E-01	8,846E-01
Tl^{208}	583,14	3.025±248	7,594E+00	6,226E-01	4,787E-01
	860,37	343±149	8,246E+00	3,582E+00	3,637E+00
	2.614,5	1.231±115	9,889E+00	9,239E-01	2,702E-01
Bi^{212}	727,33	675±172	2,647E+01	6,745E+00	6,373E+00
Ac^{228}	911,204	2.314±213	2,826E+01	2,601E+00	1,933E+00
	968,971	975±160	2,053E+01	3,369E+00	2,926E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,559E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	6,779E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	6,368E-01
	1.332,501	-	-	-	6,611E-01
K^{40}	1.460,83	-	-	-	6,657E+00

Tabla IX.19: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 14.

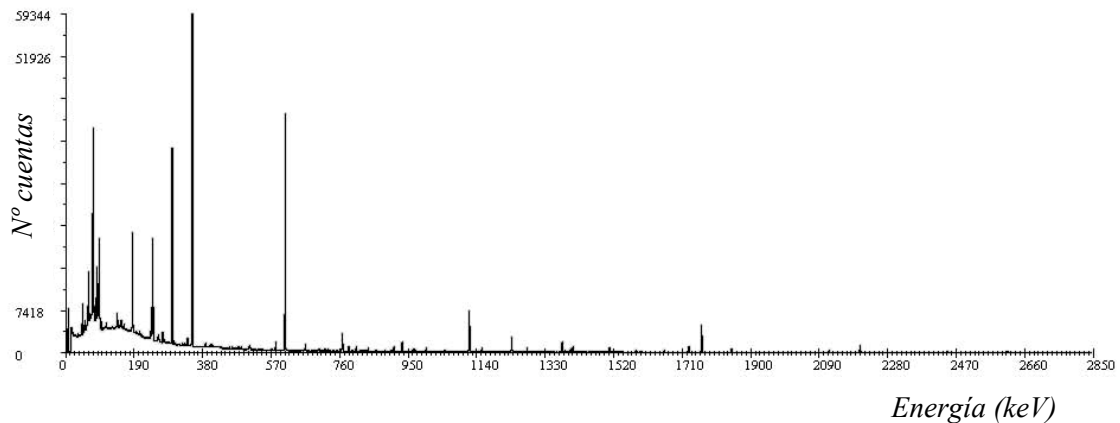


Figura IX.20: Espectro de emisiones gamma de la materia 14.

Materia 15: M20 A Polvo de hierro W40/29

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	-	-	-	1,490E+00
Ra^{226}	186,21	201±90	3,298E+00	1,477E+00	1,1473E+00
Pb^{214}	295,224	375±89	1,573E+00	3,734E-01	2,918E-01
	351,932	565±90	1,422E+00	2,265E-01	1,480E-01
Bi^{214}	609,312	444±77	1,482E+00	2,570E-01	1,431E-01
	1.764,49	97±36	2,487E+00	9,229E-01	4,866E-01
Pb^{212}	238,632	1.498±143	2,320E+00	2,215E-01	1,356E-01
Tl^{208}	583,14	474±76	8,320E-01	1,331E-01	7,936E-02
	860,37	-	-	-	8,125E-01
	2.614,5	209±48	1,171E+00	2,690E-01	7,180E-02
Bi^{212}	727,33	112±44	3,064E+00	1,204E+00	9,408E-01
Ac^{228}	911,204	426±72	3,629E+00	6,134E-01	2,844E-01
	968,971	278±59	4,084E+00	8,668E-01	4,824E-01
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,543E-01
Cs^{137}	661,657	-	-	-	1,113E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	9,341E-02
	1.332,501	-	-	-	1,071E-01
K^{40}	1.460,83	-	-	-	6,652E-01

Tabla IX.20: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 15.

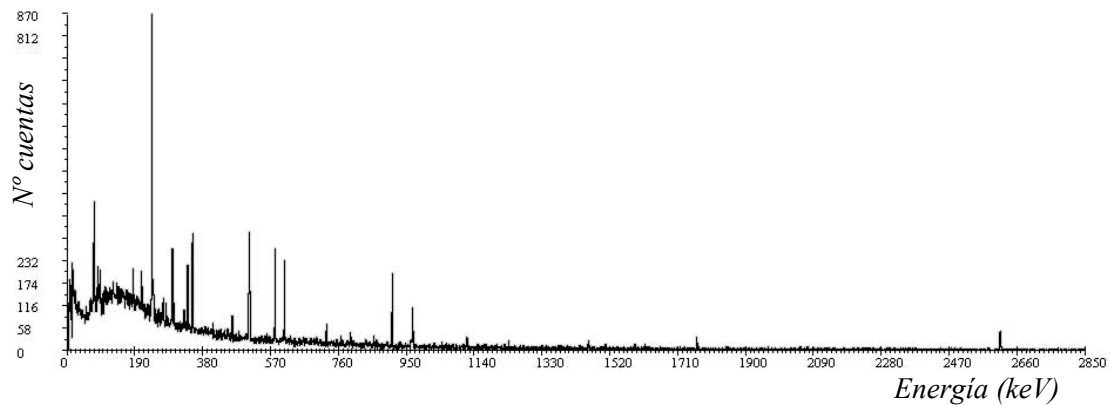


Figura IX.21: Espectro de emisiones gamma de la materia 15.

Materia 16: K-10 Oligisto

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	281±132	4,629E+00	2,174E+00	1,500E+00
Ra^{226}	186,21	1.489±162	3,199E+01	3,481E+00	2,540E+00
Pb^{214}	295,224	3.253±194	1,787E+01	1,066E+00	4,717E-01
	351,932	5.334±235	1,757E+01	7,743E-01	2,645E-01
Bi^{214}	609,312	3.899±195	1,704E+01	8,523E-01	2,420E-01
	1.764,49	680±85	2,283E+01	2,853E+00	9,516E-01
Pb^{212}	238,632	312±130	6,327E-01	2,636E-01	2,087E-01
Tl^{208}	583,14	263±71	6,032E-01	1,628E-01	1,207E-01
	860,37	-	-	-	1,271E+00
	2.614,5	91±35	6,678E-01	2,569E-01	1,113E-01
Bi^{212}	727,33	59±46	2,113E+00	1,648E+00	1,621E+00
Ac^{228}	911,204	157±59	1,751E+00	6,582E-01	5,157E-01
	968,971	86±44	1,654E+00	8,464E-01	7,071E-01
Am^{241}	59,541	-	-	-	2,959E-01
Cs^{137}	661,657	-	-	-	1,706E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,819E-01
	1.332,501	-	-	-	1,673E-01
K^{40}	1.460,83	167±54	6,639E+00	2,147E+00	1,419E+00

Tabla IX.21: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 16.

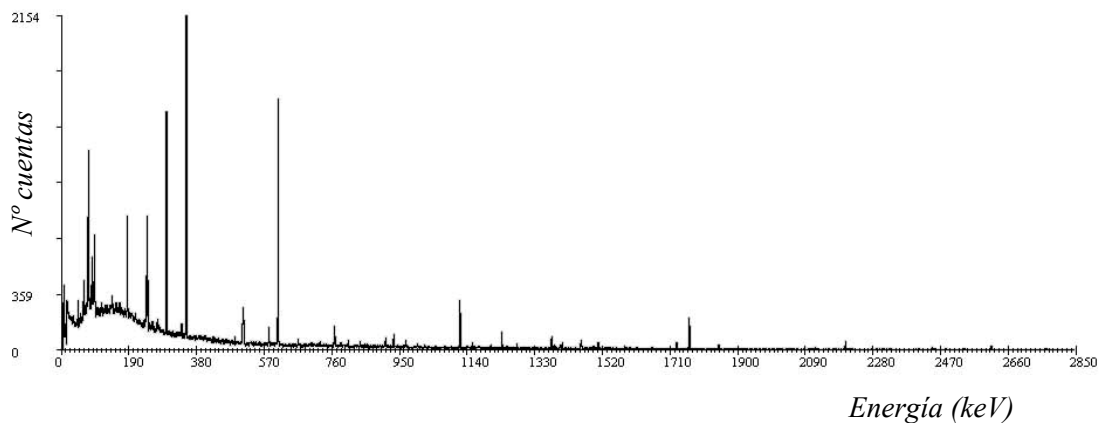


Figura IX.22: Espectro de emisiones gamma de la materia 16.

Materia 17: K-60 Ilmenita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	1.050±227	2,051E+01	4,434E+00	4,748E+00
Ra^{226}	186,21	4.560±352	1,162E+02	8,968E+00	7,623E+00
Pb^{214}	295,224	9.479±355	6,174E+01	2,312E+00	1,304E+00
	351,932	16.655±431	6,507E+01	1,684E+00	6,877E-01
Bi^{214}	609,312	12.276±359	6,362E+01	1,860E+00	6,517E-01
	1.764,49	2.031±147	8,083E+01	5,851E+00	2,025E+00
Pb^{212}	238,632	49.278±750	1,185E+02	1,803E+00	7,644E-01
Tl^{208}	583,14	15.834±405	4,306E+01	1,101E+00	3,672E-01
	860,37	1.857±158	4,836E+01	4,114E+00	2,265E+00
	2.614,5	5.566±237	4,843E+01	2,062E+00	4,514E-01
Bi^{212}	727,33	3.375±213	1,434E+02	9,047E+00	4,984E+00
Ac^{228}	911,204	10.948±329	1,448E+02	4,352E+00	1,232E+00
	968,971	5.937±257	1,354E+02	5,862E+00	2,362E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	9,394E-01
Cs^{137}	661,657	-	-	-	5,373E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	3,674E-01
	1.332,501	-	-	-	3,948E-01
K^{40}	1.460,83	-	-	-	4,062E+00

Tabla IX.22: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 17.

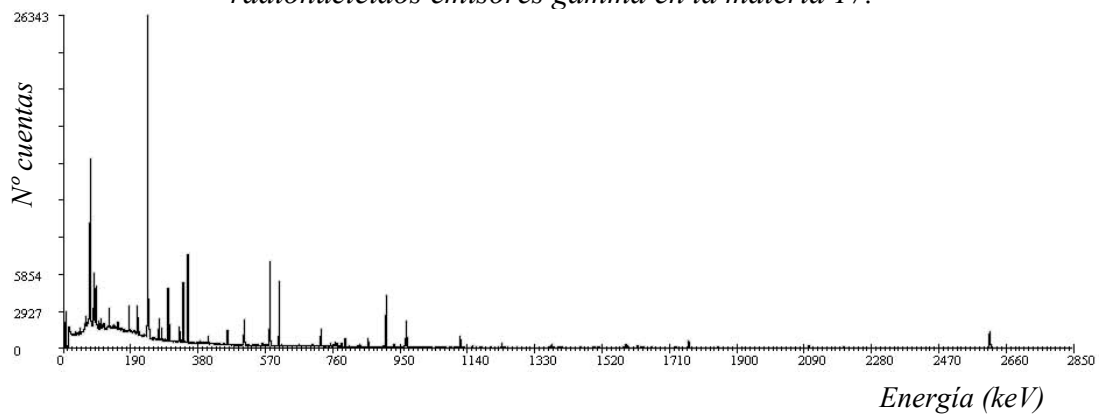


Figura IX.23: Espectro de emisiones gamma de la materia 17.

Materia 18: G-30 Mica en polvo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	1.439±186	9,580E+01	1,238E+01	1,089E+01
Ra^{226}	186,21	1.505±176	1,316E+02	1,528E+01	1,156E+01
Pb^{214}	295,224	3.209±199	7,125E+01	4,418E+00	2,258E+00
	351,932	5.260±239	7,005E+01	3,183E+00	1,240E+00
Bi^{214}	609,312	3.657±197	6,460E+01	3,480E+00	1,243E+00
	1.764,49	574±79	7,787E+01	1,072E+01	3,910E+00
Pb^{212}	238,632	3.090±211	2,532E+01	1,729E+00	1,118E+00
Tl^{208}	583,14	1.094±121	1,014E+01	1,122E+00	6,315E-01
	860,37	107±56	9,498E+00	4,971E+00	4,448E+00
	2.614,5	360±62	1,068E+01	1,839E+00	6,149E-01
Bi^{212}	727,33	193±66	2,794E+01	9,556E+00	8,293E+00
Ac^{228}	911,204	760±104	3,427E+01	4,689E+00	2,699E+00
	968,971	354±79	2,752E+01	6,142E+00	4,414E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,893E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	9,616E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,219E+00
	1.332,501	-	-	-	9,989E-01
K^{40}	1.460,83	9.116±287	1,465E+03	4,611E+01	6,557E+00

Tabla IX.23: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 18.

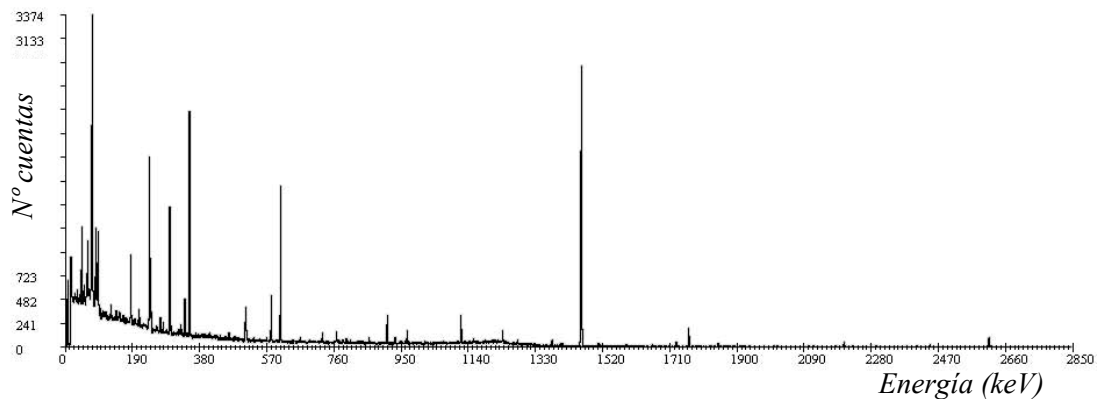


Figura IX.24: Espectro de emisiones gamma de la materia 18.

Materia 19: G-16 Silice de Neubourg

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	170±80	1,773E+01	8,345E+00	8,273E+00
Ra^{226}	186,21	179±80	2,436E+01	1,089E+01	1,069E+01
Pb^{214}	295,224	330±82	1,148E+01	2,852E+00	2,292E+00
	351,932	488±72	1,018E+01	1,794E+00	1,167E+00
Bi^{214}	609,312	385±72	1,066E+01	1,993E+00	1,158E+00
	1.764,49	60±46	1,275E+01	9,778E+00	4,591E+00
Pb^{212}	238,632	1.660±148	2,132E+01	1,900E+00	1,036E+00
Tl^{208}	583,14	476±76	6,913E+00	1,104E+00	5,742E-01
	860,37	61±36	8,484E+00	5,007E+00	4,065E+00
	2.614,5	173±43	8,040E+00	1,998E+00	5,976E-01
Bi^{212}	727,33	113±48	2,563E+01	1,089E+01	8,974E+00
Ac^{228}	911,204	325±65	2,296E+01	4,592E+00	2,487E+00
	968,971	161±43	1,961E+01	5,969E+00	4,213E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,391E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	8,829E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	8,673E-01
	1.332,501	-	-	-	8,169E-01
K^{40}	1.460,83	349±63	8,785E+01	1,586E+01	6,562E+00

Tabla IX.24: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 19.

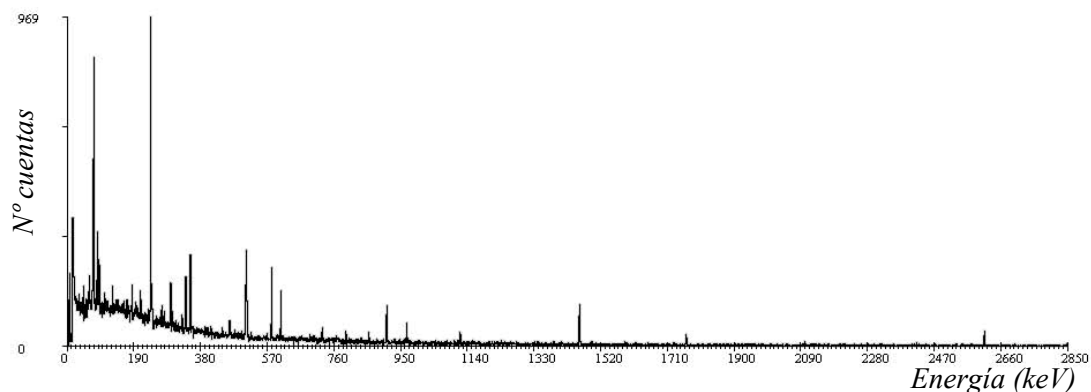


Figura IX.25: Espectro de emisiones gamma de la materia 19.

Materia 20: F-70X Espato fluor

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	93±73	3,521E+00	2,764E+00	2,852E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	108±63	5,334E+00	3,112E+00	3,463E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	298±77	3,763E+00	9,7232E-01	7,838E-01
	351,932	504±82	3,597E+00	6,210E-01	3,823E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	358±70	3,597E+00	7,0333E-01	4,061E-01
	1.764,49	66±29	5,093E+00	2,238E+00	1,089E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	755±106	3,519E+00	4,941E-01	3,374E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	245±62	1,292+00	3,269E-01	2,146E-01
	860,37	-	-	-	2,133E+00
	2.614,5	88±33	1,485E+00	5,567E-01	2,230E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	63±55	5,188E+00	4,529E+00	3,780E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	156±49	4,000E+00	1,257E+00	1,326E+00
	968,971	69±33	3,051E+00	1,636E+00	1,326E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	4,712E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	3,012E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	2,684E-01
	1.332,501	-	-	-	2,960E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	164±47	1,499E+01	4,295E+00	2,358E+00

Tabla IX.25: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 20.

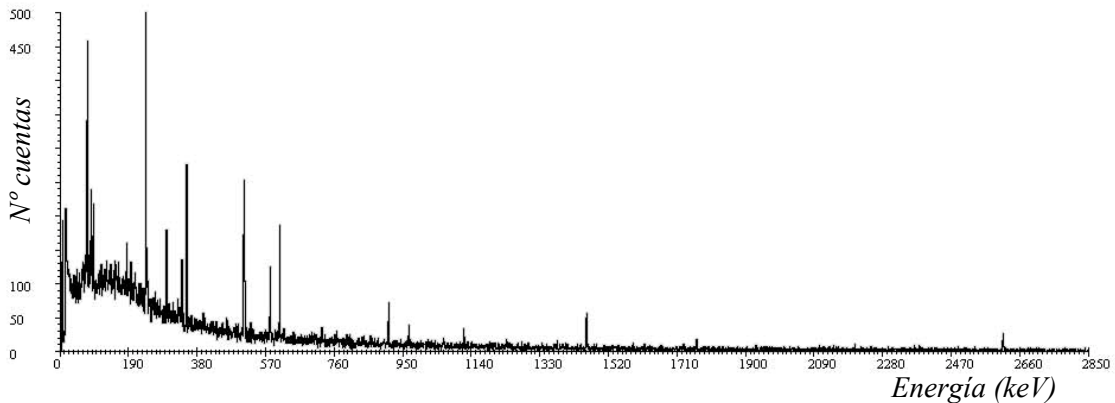


Figura IX.26: Espectro de emisiones gamma de la materia 20.

Materia 21: R-40 Alginato cálcico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	-	-	-	1,007E+01
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	8,455E+00
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	-	-	-	3,101E+00
	351,932	-	-	-	1,121E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	-	-	-	1,490E+00
	1.764,49	-	-	-	5,514E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	161±59	2,168E+00	7,944E-01	7,710E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	70±41	1,066E+00	6,244E-01	7,710E-01
	860,37	-	-	-	5,466E+00
	2.614,5	-	-	-	9,921E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	1,027E+01
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	2,695E+00
	968,971	-	-	-	4,501E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,049E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	8,010E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	7,868E-01
	1.332,501	-	-	-	7,752E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	-	-	-	8,534E-01

Tabla IX.26: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 21.

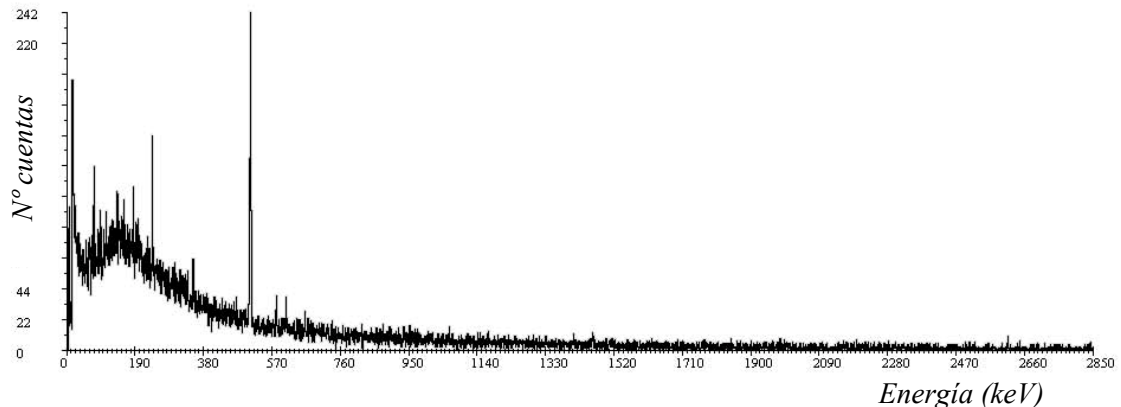


Figura IX.27: Espectro de emisiones gamma de la materia 21.

Materia 22: R-50 Resina óxido de polietileno

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,254E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,958E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	2,151E+00
	351,932	-	-	-	2,006E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,886E+00
	1.764,49	-	-	-	6,904E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,5710E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	9,617E-01
	860,37	-	-	-	7,009E+00
	2.614,5	-	-	-	1,1531E+00
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,256E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,634E+00
	968,971	-	-	-	5,920E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,298E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	9,033E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	8,771E-01
	1.332,501	-	-	-	7,498E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	6,193E+00

Tabla IX.27: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 22.

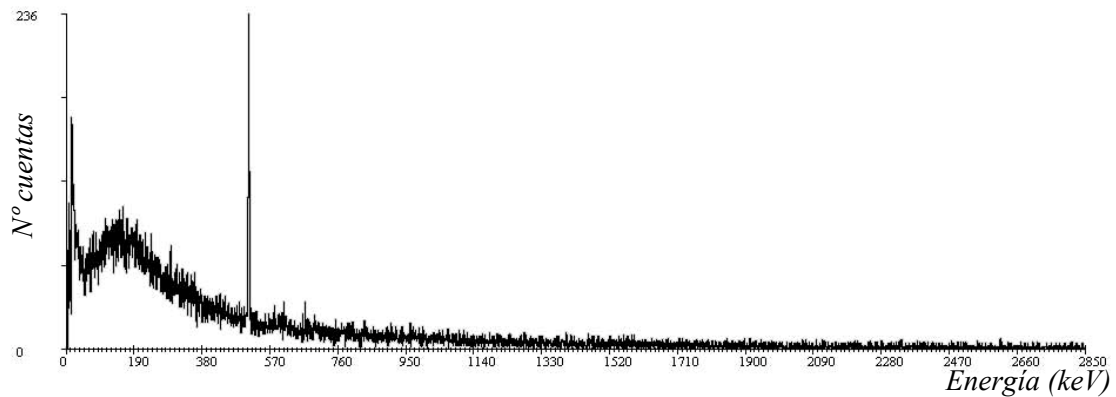


Figura IX.28: Espectro de emisiones gamma de la materia 22.

Materia 23: R-48 goma arábica

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	-	.	-	8,630E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	1,262E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	-	-	-	2,618E+00
	351,932	-	-	-	1,393E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	61±40	1,431E+00	9,383E+00	8,525E-01
	1.764,49	-	-	-	4,702E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	-	-	-	1,071E+00
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	-	-	-	7,710E-01
	860,37	-	-	-	4,545E+00
	2.614,5	-	-	-	7,149E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	8,119E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	2,327E+00
	968,971	-	-	-	3,905E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	9,125E-01
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	6,873E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	7,150E-01
	1.332,501	-	-	-	6,424E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	371±65	7,915E+01	1,387E+01	5,552E+00

Tabla IX.28: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 23.

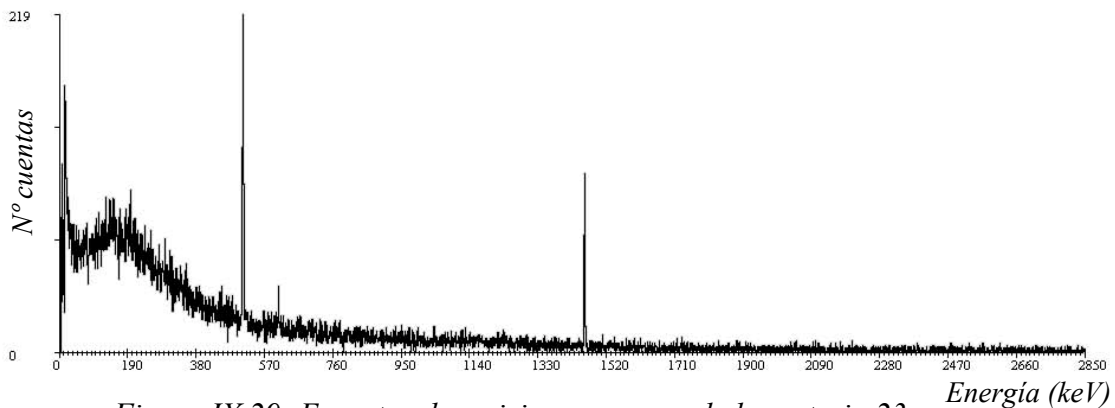


Figura IX.29: Espectro de emisiones gamma de la materia 23.

Materia 24: P-20 Manganese electrolítico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,155E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,814E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	2,073E-01
	351,932	78±51	1,955E-01	1,278E-01	1,269E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	86±45	2,859E-01	1,496E-01	1,304E-01
	1.764,49	-	-	-	3,825E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,529E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	7,710E-01
	860,37	-	-	-	5,946E-02
	2.614,5	-	-	-	7,174E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,209E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,102E-01
	968,971	-	-	-	5,767E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,217E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	9,254E-02
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	7,589E-02
	1.332,501	-	-	-	8,859E-02
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	7,974E-01

Tabla IX.29: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 24.

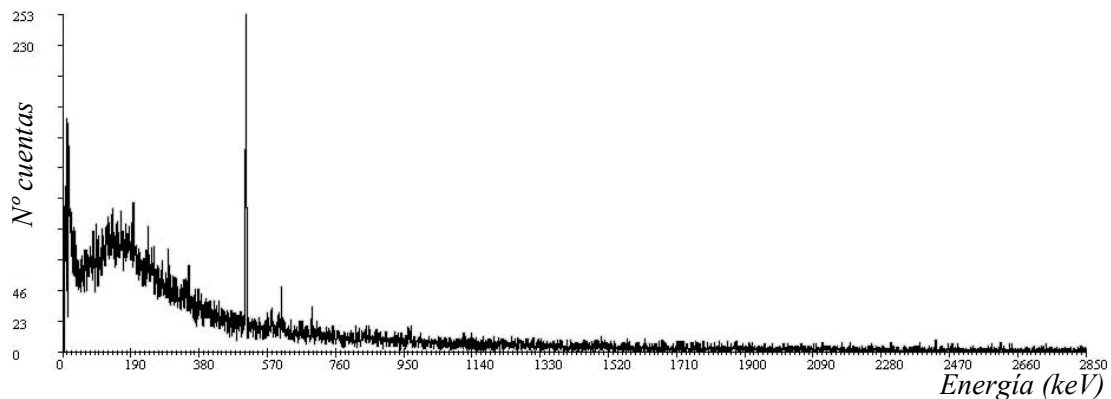


Figura IX.30: Espectro de emisiones gamma de la materia 24.

Materia 25: E-70 Silicato de zirconio

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	17.144±924	2,964E+02	1,598E+01	1,774E+01
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	229.773±1988	5,182+03	4,484E+01	3,05E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	523.770±2394	3,020E+03	1,380E+01	5,412E+00
	351,932	914.999±3005	3,164E+03	1,039E+01	2,964E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	678.430±2542	3,112E+03	1,166E+01	2,713E+00
	1.764,49	1.166.472±1069	4,104E+02	3,767E+01	8,633E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	218.632±1976	4,654E+02	4,206E+00	2,895E+00
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	92.298±1094	2,222+02	2,634E+00	1,363E+00
	860,37	11.069±516	2,552E+02	1,190E+01	9,656E+00
	2.614,5	34.518±592	2,659E+02	4,560E+00	8,757E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	20.667±634	7,771E+02	2,384E+01	1,737E+01
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	65.236±909	7,639E+02	1,064E+01	5,176E+00
	968,971	34.505±718	6,967E+02	1,450E+01	8,855E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	3,296E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	1,888E+00
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	1,540E+00
	1.332,501	-	-	-	1,710E+00
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	-	-	-	1,677E+01

Tabla IX.30: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 25.

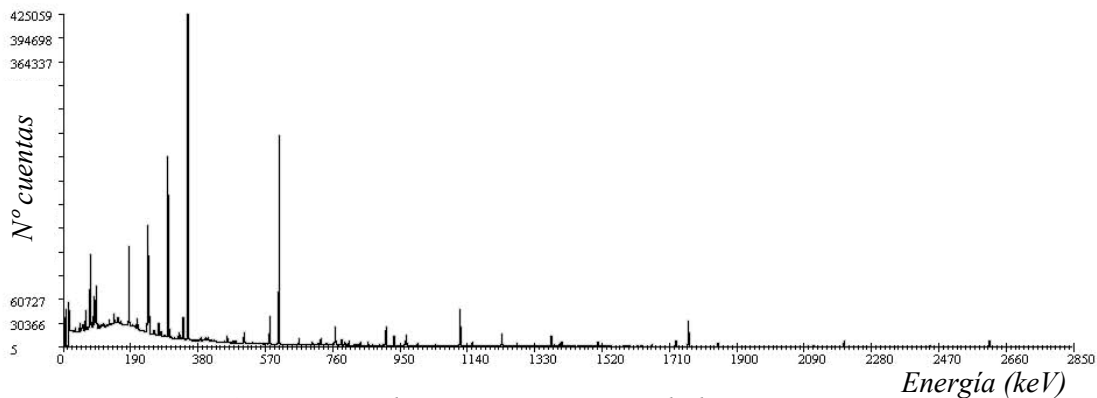


Figura IX.31: Espectro de emisiones gamma de la materia 25.

Materia 26: G-57 Talco

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	853±122	7,068E+01	1,011E+01	8,466E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	1.039±138	1,123E+02	1,492E+01	1,110E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	2.017±155	5,574E+01	4,283E+00	2,154E+00
	351,932	3.340±189	5,536E+01	3,132E+00	1,184E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	2.386±157	5,246E+01	3,452E+00	1,187E+00
	1.764,49	361±64	6,095E+01	1,081E+01	4,405E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	2.355±181	2,402E+01	1,846E+00	1,121E+00
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	771±99	8,895E+00	1,142E+00	6,007E-01
	860,37	88±43	9,722E+00	4,750E+00	4,061E+00
	2.614,5	281±54	1,037E+01	1,993E+00	5,947E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	155±58	2,793E+01	1,045E+01	8,500E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	498±80	2,795E+01	4,489E+00	2,205E+00
	968,971	274±67	2,561E+01	6,483E+00	4,216E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,580E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	8,863E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	7,885E-01
	1.332,501	-	-	-	8,111E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	-	-	-	5,459E+00

Tabla IX.31: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 26.

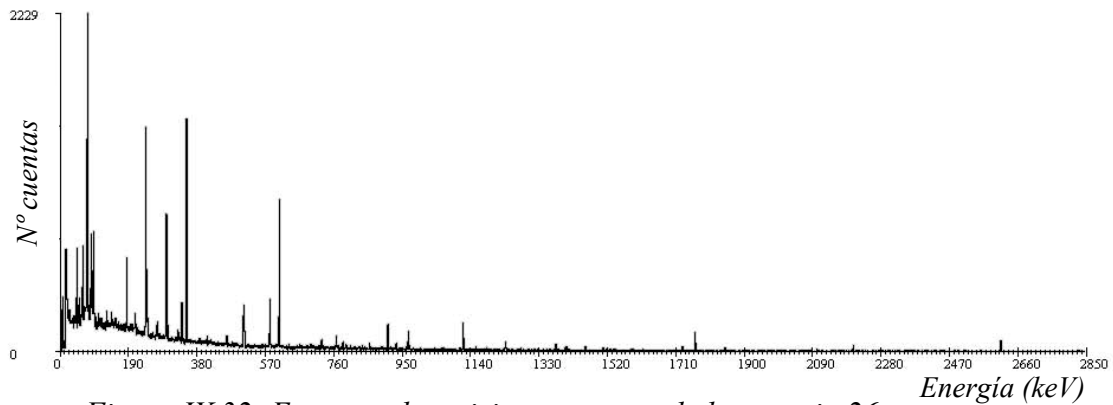


Figura IX.32: Espectro de emisiones gamma de la materia 26.

Materia 27: G-40 Caolín

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	321±87	3,724E+01	1,009E+01	9,771E+00
Ra^{226}	186,21	431±114	6,522E+01	1,725E+01	1,487E+01
Pb^{214}	295,224	657±100	2,542E+01	3,869E+00	2,495E+00
	351,932	1.101±120	5,536E+01	3,132E+00	1,184E+00
Bi^{214}	609,312	788±99	2,425E+01	3,047E+00	1,534E+00
	1.764,49	103±39	2,435E+01	9,219E+00	5,413E+00
Pb^{212}	238,632	1.871±157	2,672E+01	2,242E+00	1,295E+00
Tl^{208}	583,14	577±85	9,319E+00	1,373E+00	7,375E-01
	860,37	105±46	1,624E+01	7,115E+00	5,467E+00
	2.614,5	209±47	1,080E+01	2,429E+00	5,452E-01
Bi^{212}	727,33	149±57	3,759E+01	1,438E+01	1,053E+01
Ac^{228}	911,204	332±67	2,608E+01	5,264E+00	2,885E+00
	968,971	218±56	2,953E+01	7,586E+00	4,923E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,796E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	1,130E+00
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,015E+00
	1.332,501	-	-	-	9,442E-01
K^{40}	1.460,83	756±88	2,116E+02	2,464E+01	8,155E+00

Tabla IX.32: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 27.

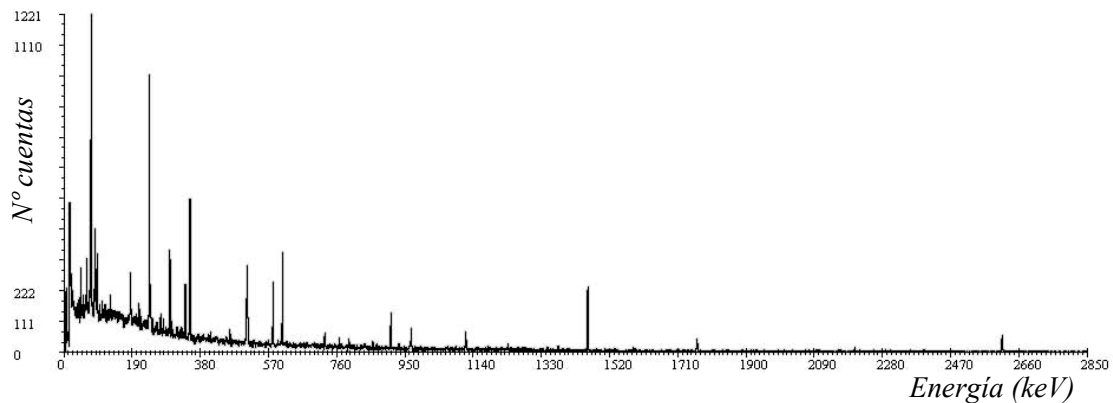


Figura IX.33: Espectro de emisiones gamma de la materia 27.

Materia 28: F-30 Carbonato de bario

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	4,637E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	368±100	1,922E+01	5,223E+00	4,591E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	1.292±127	1,725E+01	1,696E+00	9,201E-01
	351,932	2139±	1,713E+01	1,225E+00	5,021E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	1.628±130	1,730E+01	1,381E+00	4,877E-01
	1.764,49	280±56	2,285E+01	4,570E+00	1,596E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	550±101	2,711E+00	4,979E-01	3,868E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	180±56	1,004E+00	3,122E-01	2,260E-01
	860,37	-	-	-	5,467E+00
	2.614,5	66±28	1,177E+00	4,995E-01	2,517E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,053E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	104±46	2,820E+00	1,247E+00	9,690E-01
	968,971	-	-	-	2,293E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	4,644E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	3,561E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	3,326E-01
	1.332,501	-	-	-	3,138E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	2,237E+00

Tabla IX.33: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 28.

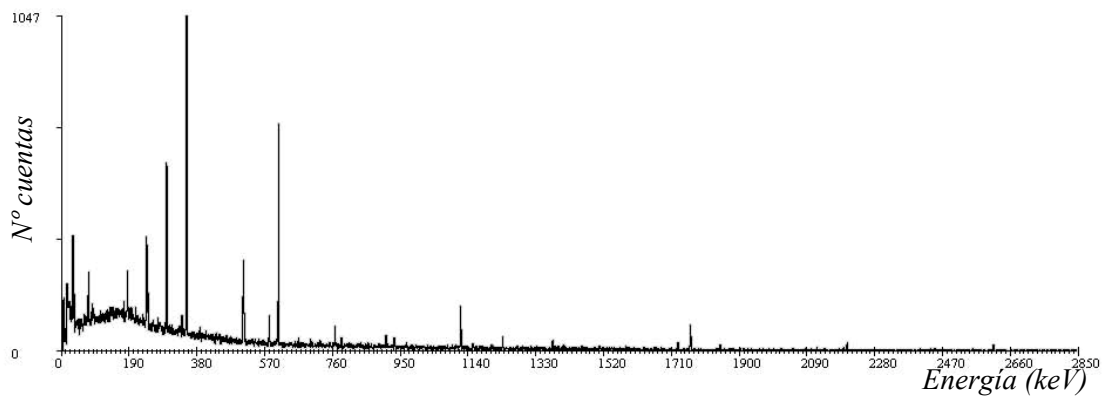


Figura IX.34: Espectro de emisiones gamma de la materia 28.

Materia 29: G-60 Wollastonita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	269±80	1,526E+01	4,537E+00	4,065E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	359±97	2,656E+01	7,176E+00	6,239E+00
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	674±98	1,275E+01	1,854E+00	1,188E+00
	351,932	1.054±114	1,196E+01	1,293E+00	6,678E-01
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	773±94	1,163E+01	1,414E+00	6,471E-01
	1.764,49	127±39	1,468E+01	4,507E+00	2,362E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	162±99	1,131E+00	6,912E-01	3,392E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	-	-	-	4,341E-01
	860,37	-	-	-	2,958E+00
	2.614,5	21±16	5,306E-01	4,043E-01	2,479E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	5,641E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	1,564E+00
	968,971	-	-	-	2,784E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	7,404E-01
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	4,695E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	4,757E-01
	1.332,501	-	-	-	3,967E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	166±45	2,272E+01	6,159E+00	3,160E+00

Tabla IX.34: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 29.

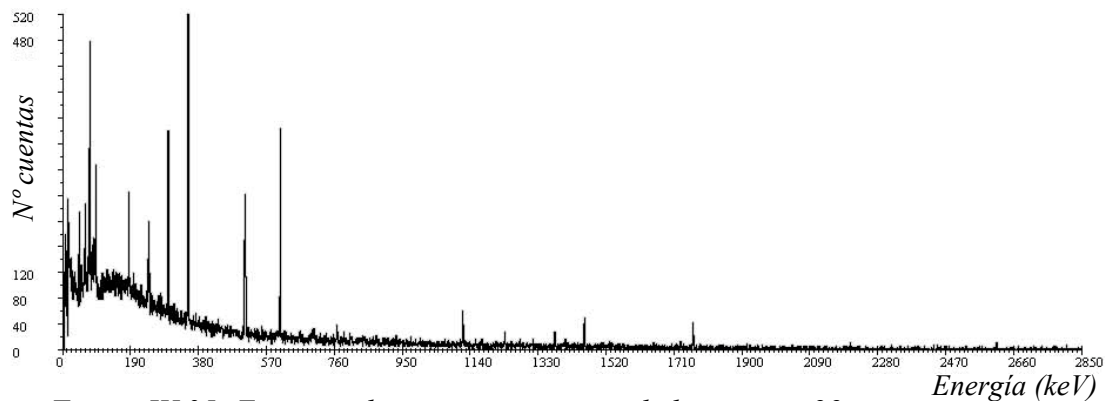


Figura IX.35: Espectro de emisiones gamma de la materia 29.

Materia 30: G-33 Mica calcinada

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	230±118	2,935E+01	1,506E+01	1,661E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	368±109	6,125E+01	1,814E+01	1,700E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	504±100	2,145E+01	4,256E+00	3,347E+00
	351,932	890±117	2,272E+01	2,986E+00	1,982E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	596±95	2,018E+01	3,216E+00	1,984E+00
	1.764,49	83±32	2,158E+01	8,321E+00	4,899E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	608±112	9,551E+00	1,759E+00	1,443E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	201±68	3,571E+00	1,208E+00	9,965E-01
	860,37	-	-	-	1,191E+01
	2.614,5	66±31	3,752E+00	1,762E+00	9,238E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	66±52	1,832E+01	1,443E+01	1,459E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	144±58	1,244E+01	5,012E+00	4,086E+00
	968,971	55±44	8,196E+00	6,557E+00	6,408E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	2,743E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,509E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	2,115E+00
	1.332,501	-	-	-	1,628E+00
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	8.541±274	2,630E+03	8,438E+01	9,876E+00

Tabla IX.35: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 30.

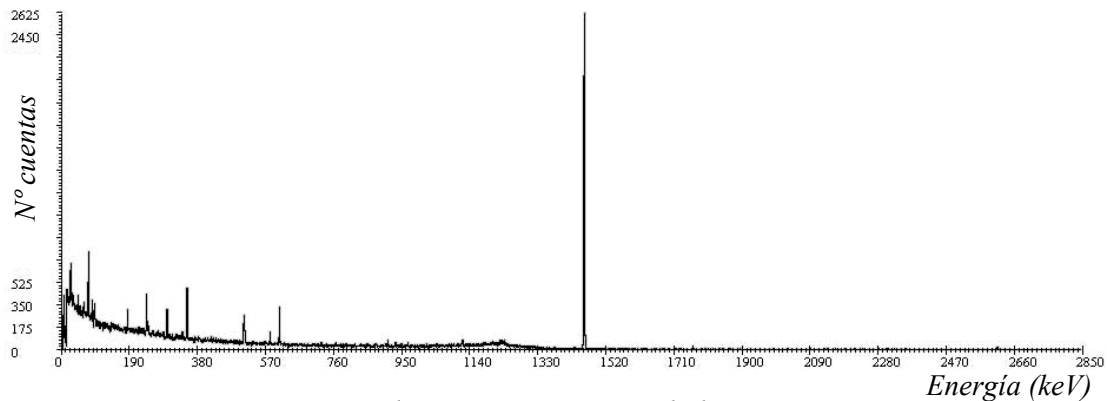


Figura IX.36: Espectro de emisiones gamma de la materia 30.

Materia 31: R-44 Carboximetilcelulosa

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	6,700E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,035E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	2,042E+00
	351,932	-	-	-	9,130E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,090E+00
	1.764,49	-	-	-	3,032E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	8,881E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	5,104E-01
	860,37	-	-	-	3,656E+00
	2.614,5	-	-	-	7,316E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	7,230E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	2,008E+00
	968,971	-	-	-	3,060E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	7,004E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	5,398E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	4,584E-01
	1.332,501	-	-	-	5,375E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	44±31	7,908E+00	5,572E+00	3,640E+00

Tabla IX.36: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 31.

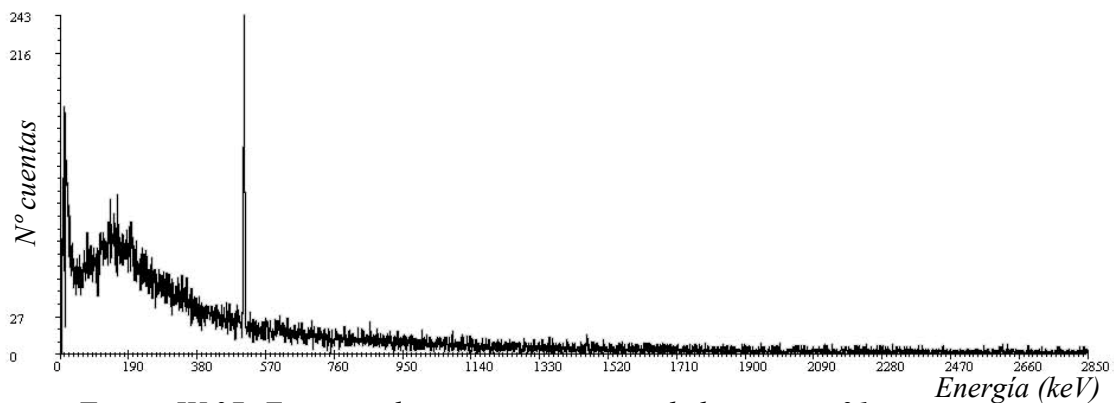


Figura IX.37: Espectro de emisiones gamma de la materia 31.

Materia 32: G-31 Mica calcinada

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	246±117	4,442E+01	2,113E+01	2,181E+01
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	260±97	6,124E+01	2,285E+01	2,216E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	517±103	3,113E+01	6,203E+00	4,959E+00
	351,932	939±120	3,391E+01	4,334E+00	2,801E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	664±97	3,181E+01	4,647E+00	2,749E+00
	1.764,49	117±38	4,305E+01	1,398E+01	7,105E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	475±114	1,056E+01	2,534E+00	2,237E+00
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	161±62	4,048E+00	1,559E+00	1,362E+00
	860,37	-	-	-	1,191E+01
	2.614,5	44±24	3,540E+00	1,931E+00	1,125E+00
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	2,798E+01
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	77±45	9,416E+00	5,503E+00	4,569E+00
	968,971	66±52	1,392E+01	1,097E+01	1,008E+01
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	3,561E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	2,200E+00
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	2,637E+00
	1.332,501	-	-	-	2,135E+00
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	6.438±239	2,805E+03	1,041E+02	1,233E+01

Tabla IX.37: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 32.

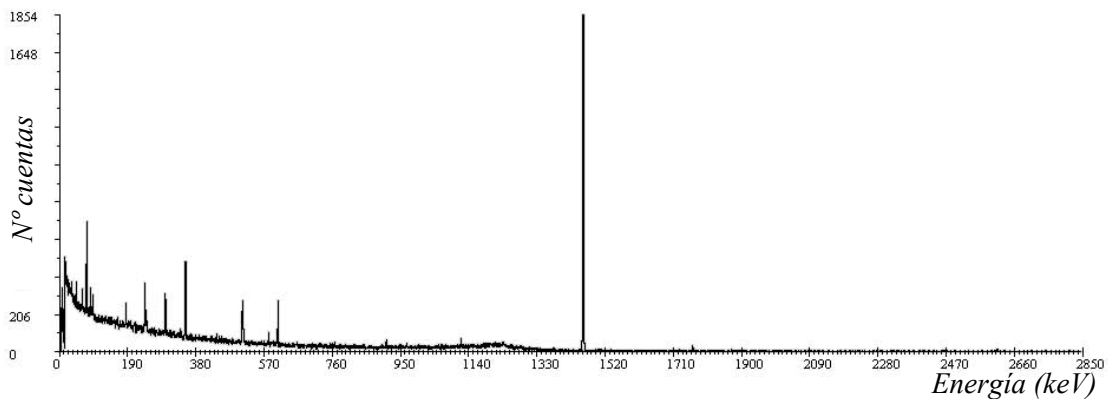


Figura IX.38: Espectro de emisiones gamma de la materia 32.

Materia 33: G-41 Bentonita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	2.621±232	1,603E+02	1,419E+01	1,197E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	3.813±260	3,042E+02	2,074E+01	1,443E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	5.470±260	1,116E+02	5,302E+00	2,700E+00
	351,932	9.447±316	1,156E+02	3,865E+00	1,442E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	6.759±264	1,097E+02	4,284E+00	1,406E+00
	1.764,49	1.047±109	1,305E+02	1,358E+01	4,557E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	18.650±466	1,404E+02	3,508E+00	1,571E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	5.576±246	4,747E+01	2,094E+00	7,886E-01
	860,37	643±100	5,243E+01	8,153E+00	5,387E+00
	2.614,5	1.936±136	5,275E+01	3,705E+00	4,953E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	1.316±138	1,750E+02	1,835E+01	1,092E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	3.837±202	1,589E+02	8,366E+00	2,905E+00
	968,971	2.234±162	1,595E+02	1,157E+01	5,030E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	2,369E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,111E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	8,633E-01
	1.332,501	-	-	-	9,421E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	984±110	1,452E+02	1,623E+01	7,402E+00

Tabla IX.38: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 33.

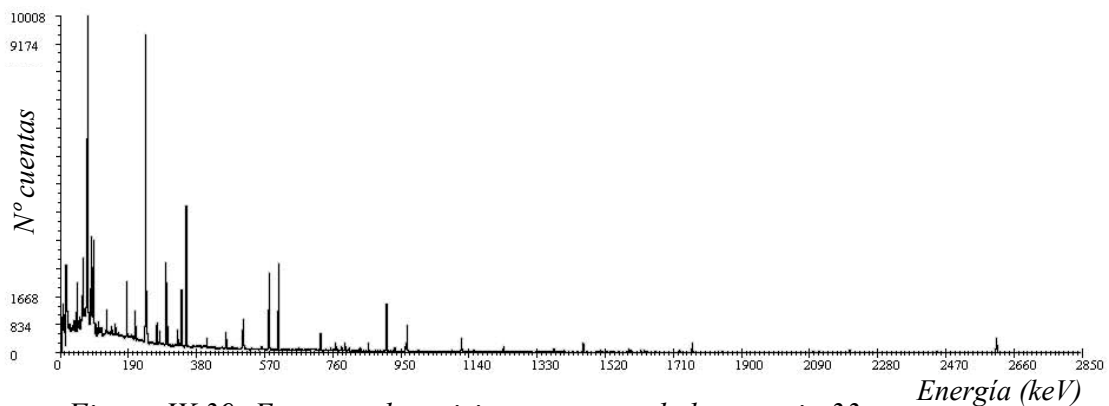


Figura IX.39: Espectro de emisiones gamma de la materia 33.

Materia 34: G-22 Fonolita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	2.714±247	1,369E+02	1,246E+01	1,043E+01
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	2.000±203	1,316E+02	1,336E+01	1,021E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	4.311±234	7,251E+01	3,936E+00	1,958E+00
	351,932	7.369±282	7,434E+01	2,845E+00	1,097E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	5.050±229	6,758E+01	3,065E+00	1,081E+00
	1.764,49	799±88	8,212E+01	9,044E+00	2,711E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	2.665±204	1,655E+01	1,267E+00	9,298E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	763±117	5,358E+00	8,216E-01	5,879E-01
	860,37	-	-	-	6,506E+00
	2.614,5	259±52	5,820E+00	1,168E+00	8,168E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	2,798E+01
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	402±123	1,373E+01	4,201E+00	2,467E+00
	968,971	312±93	1,838E+01	5,478E+00	4,535E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,723E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	8,526E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	1,085E+00
	1.332,501	-	-	-	8,773E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	16.462±376	2,004E+03	4,577E+01	5,556E+00

Tabla IX.39: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 34.

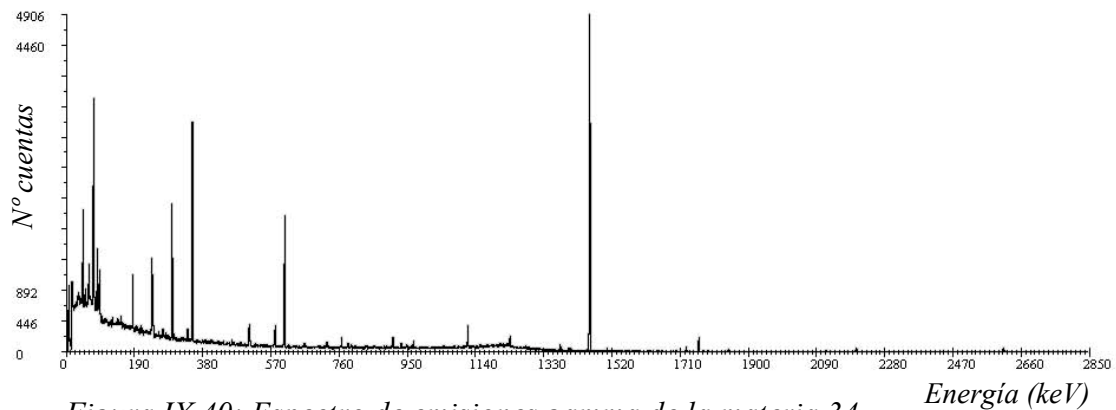


Figura IX.40: Espectro de emisiones gamma de la materia 34.

Materia 35: G-21 Nefelina sienita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	-	-	-	1,268E+01
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	1,122E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	157±97	3,112E+00	1,804E+00	1,806E+00
	351,932	312±92	3,710E+00	1,094E+00	9,397E-01
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	317±78	5,000E+00	1,230E+00	9,074E-01
	1.764,49	50±30	6,057E+00	3,634E+00	2,294E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	408±100	2,986E+00	7,318E-01	6,417E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	200±78	1,655E+00	6,455E-01	5,266E-01
	860,37	-	-	-	5,252E+00
	2.614,5	66±32	1,748E+00	8,475E-01	4,682E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	9,090E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	59±47	2,375E+00	1,892E+00	1,850E+00
	968,971	-	-	-	4,887E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,233E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	6,746E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	1,079E+00
	1.332,501	-	-	-	7,284E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	9.359±287	1,343E+03	4,117E+01	4,268E+00

Tabla IX.40: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 35.

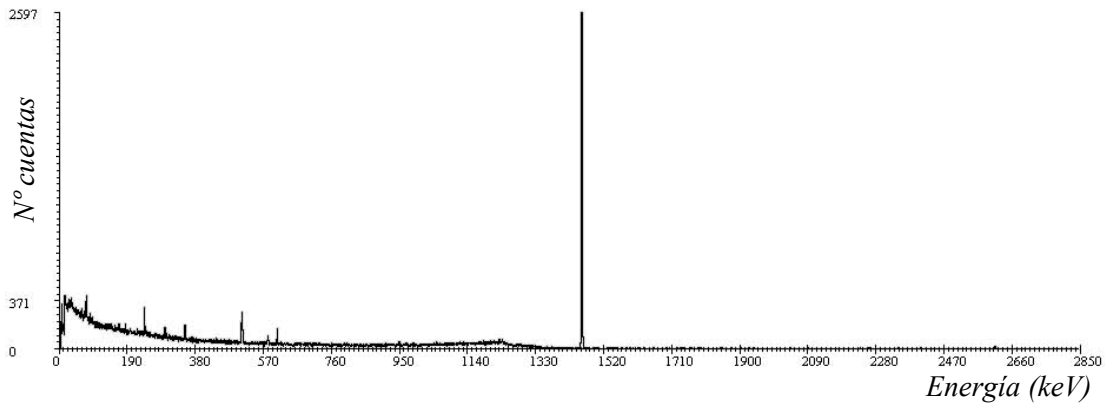


Figura IX.41: Espectro de emisiones gamma de la materia 35.

Materia 36: G-20/M80 Feldespato potásico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	773±175	3,999E+01	9,053E+00	8,069E+00
Ra^{226}	186,21	1.173±157	7,915E+01	1,059E+01	8,374E+00
Pb^{214}	295,224	2.087±167	3,601E+01	2,881E+00	1,630E+00
	351,932	3.611±204	3,736E+01	2,111E+00	9,142E-01
Bi^{214}	609,312	2.368±165	3,250E+01	2,265E+00	9,338E-01
	1.764,49	377±67	3,974E+01	7,063E+00	2,884E+00
Pb^{212}	238,632	1.753±171	1,116E+01	1,089E+00	8,110E-01
Tl^{208}	583,14	603±97	4,343E+00	6,986E-01	4,653E-01
	860,37	79±57	5,449E+00	3,931E+00	3,827E+00
	2.614,5	214±52	4,932E+00	1,198E+00	3,858E-01
Bi^{212}	727,33	106±63	1,193E+01	7,088E+00	6,770E+00
Ac^{228}	911,204	430±89	1,506E+01	3,118E+00	2,197E+00
	968,971	216±72	1,305E+01	4,350E+00	3,500E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,630E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	6,855E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,001E+00
	1.332,501	-	-	-	7,087E-01
K^{40}	1.460,83	9.455±294	1,180E+03	3,670E+01	5,620E+00

Tabla IX.41: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 36.

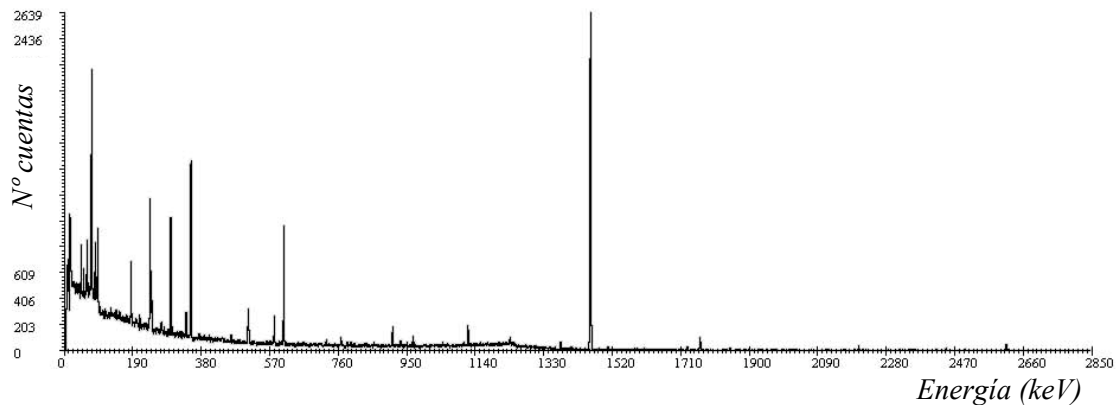


Figura IX.42: Espectro de emisiones gamma de la materia 36.

Materia 37: E-45 Dióxido de titanio

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	150±80	1,088E+01	5,800E+00	5,599E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	131±68	1,239E+01	6,431E+00	6,647E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	232±77	5,610E+00	1,862E+00	1,562E+00
	351,932	319±77	4,626E+00	1,117E+00	8,036E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	294±66	5,656E+00	1,270E+00	7,793E-01
	1.764,49	67±39	9,899E+00	5,762E+00	2,710E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	132±67	1,178E+00	5,980E-01	6,138E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	3,563E-01
	860,37	-	-	-	4,021E+00
	2.614,5	-	-	-	5,478E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	6,666E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	1,962E+00
	968,971	-	-	-	3,211E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	8,114E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	5,670E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	5,810E-01
	1.332,501	-	-	-	3,602E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	465±71	8,136E+01	1,242E+01	3,879E+00

Tabla IX.42: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 37.

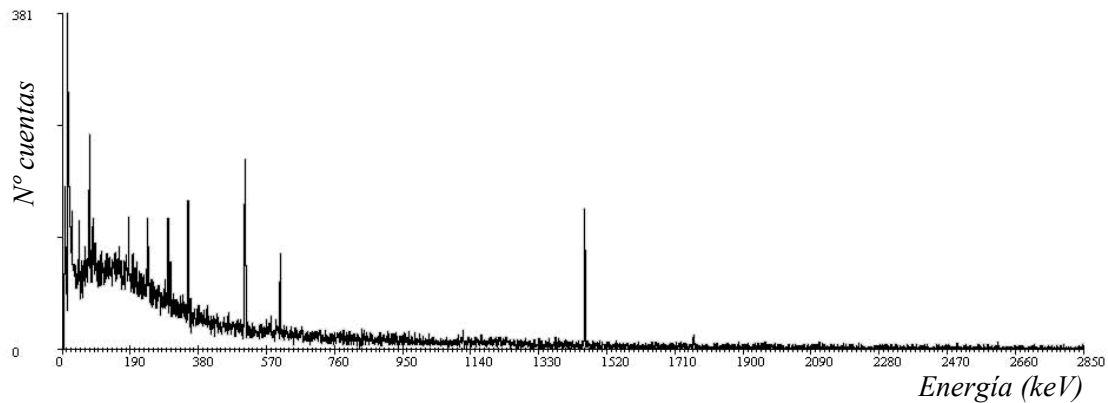


Figura IX.43: Espectro de emisiones gamma de la materia 37.

Materia 38: R-25 Harina de madera

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	3,504E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	5,129E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	81±60	1,004E+01	7,437E+00	7,263E+00
	351,932	-	-	-	3,443E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	5,248E+00
	1.764,49	-	-	-	1,631E+01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	4,454E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	103±85	5,330E+00	4,398E+00	2,539E+00
	860,37	-	-	-	1,651E+01
	2.614,5	-	-	-	3,060E+00
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	3,471E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	8,905E+00
	968,971	-	-	-	1,474E+01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	3,570E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	155±51	8,908E+00	2,931E+00	1,966E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	2,700E+00
	1.332,501	-	-	-	2,529E+00
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	2,516E+01

Tabla IX.43: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 38.

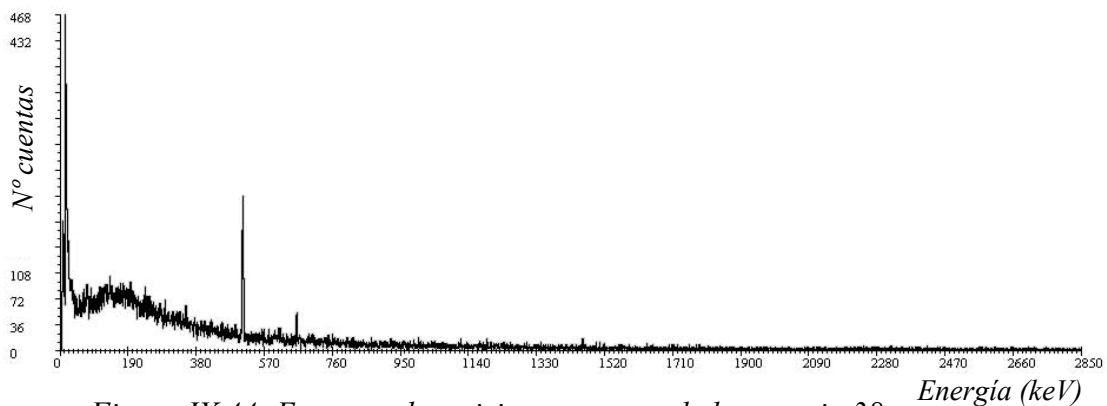


Figura IX.44: Espectro de emisiones gamma de la materia 38.

Materia 39: R-26 Harina de coco

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	-	-	-	9,502E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	1,225E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	-	-	-	2,462E+00
	351,932	-	-	-	1,405E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	-	-	-	8,421E-01
	1.764,49	-	-	-	4,023E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	-	-	-	1,102E+00
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	-	-	-	6,266E-01
	860,37	-	-	-	4,545E+00
	2.614,5	-	-	-	8,314E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	8,399E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	2,302E+00
	968,971	-	-	-	3,673E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	9,276E-01
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	6,508E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	6,719E-01
	1.332,501	-	-	-	5,821E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	243±50	5,102E+01	1,050E+01	8,312E+00

Tabla IX.44: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 39.

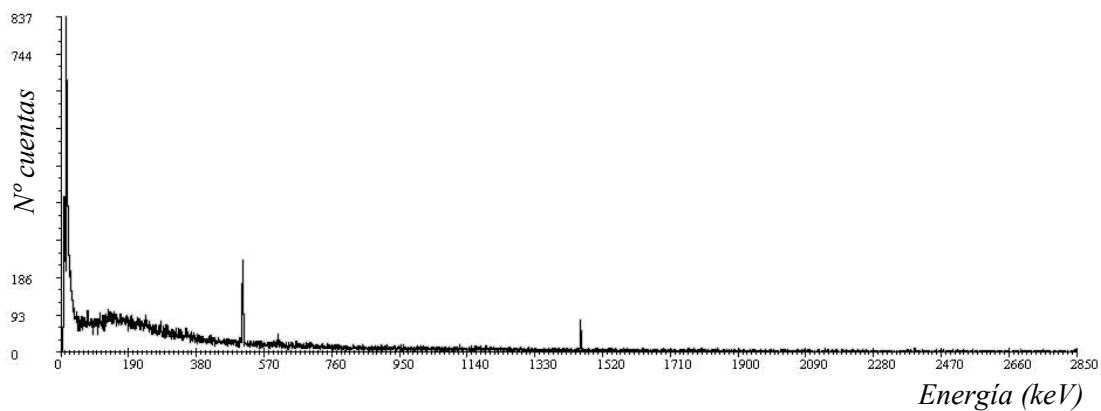


Figura IX.45: Espectro de emisiones gamma de la materia 39.

Materia 40: Q-70 Cobre en polvo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,597E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	2,503E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	4,961E-01
	351,932	-	-	-	2,673E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,491E-01
	1.764,49	-	-	-	8,971E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	2,062E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,145E-01
	860,37	-	-	-	8,605E-01
	2.614,5	-	-	-	1,495E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,623E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,937E-01
	968,971	-	-	-	6,337E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,652E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,153E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,212E-01
	1.332,501	-	-	-	1,158E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,062E+00

Tabla IX.45: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 40.

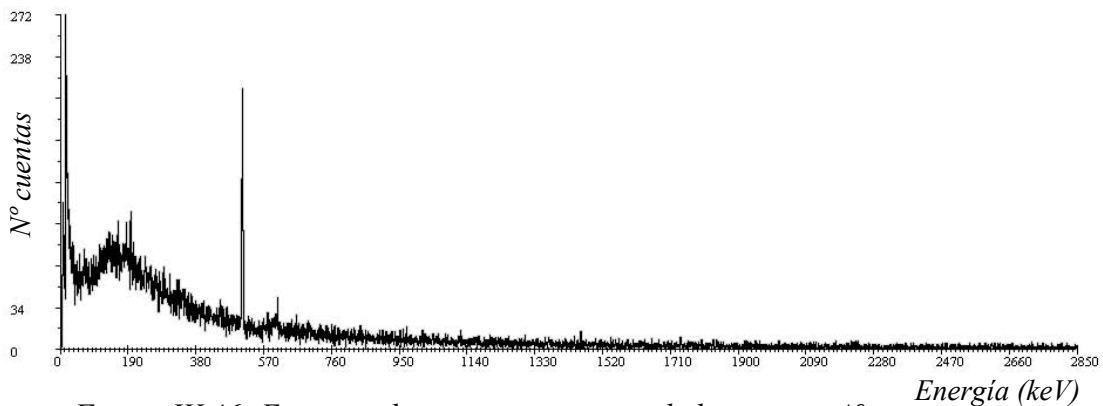


Figura IX.46: Espectro de emisiones gamma de la materia 40.

Materia 41: S-71A Zink-Fritte

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	291±143	1,850E+01	9,093E+00	7,685E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	316±113	2,621E+01	9,373E+00	8,914E+00
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	530±105	1,124E+01	2,227E+00	1,792E+00
	351,932	993±125	1,263E+01	1,590E+00	1,024E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	685±98	1,156E+01	1,654E+00	9,420E-01
	1.764,49	86±35	1,114E+01	4,535E+00	2,567E+00
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	1.399±151	1,095E+01	1,182E+00	8,075E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	434±86	3,842E+00	7,614E-01	5,160E-01
	860,37	-	-	-	5,943E+00
	2.614,5	120±43	3,400E+00	1,218E+00	5,275E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	113±59	1,563E+01	8,159E+00	7,483E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	229±66	9,862E+00	2,842E+00	2,105E+00
	968,971	151±60	1,121E+01	4,456E+00	3,731E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,340E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	7,240E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	1,104E+00
	1.332,501	-	-	-	7,383E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	8.215±268	1,261E+03	4,113E+01	4,687E+00

Tabla IX.46: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 41.

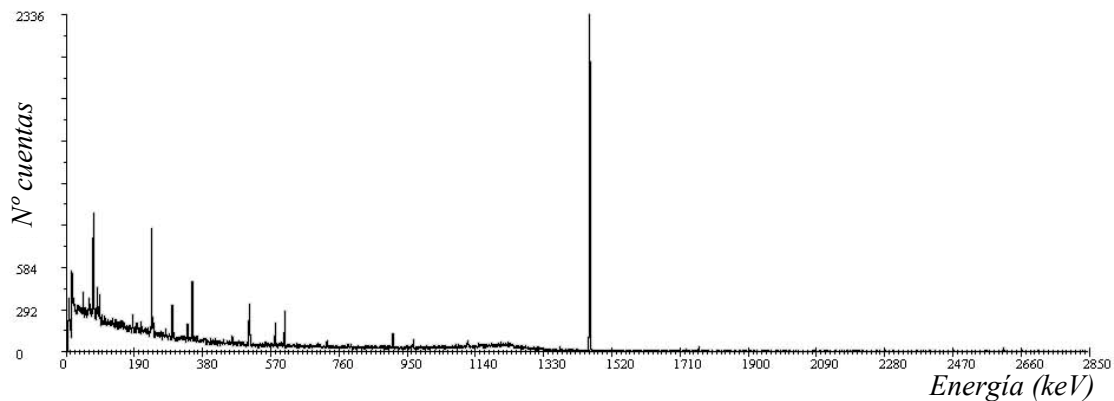


Figura IX.47: Espectro de emisiones gamma de la materia 41.

Materia 42: Q-28 Ferromolibdeno

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,085E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,694E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	3,370E-01
	351,932	-	-	-	1,137E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,700E-01
	1.764,49	-	-	-	6,201E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,434E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	8,246E-02
	860,37	-	-	-	6,455E-01
	2.614,5	-	-	-	9,703E-02
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,121E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	2,976E-01
	968,971	-	-	-	4,791E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,140E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	8,513E-02
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	8,228E-02
	1.332,501	-	-	-	7,561E-02
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	8,507E-01

Tabla IX.47: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 42.

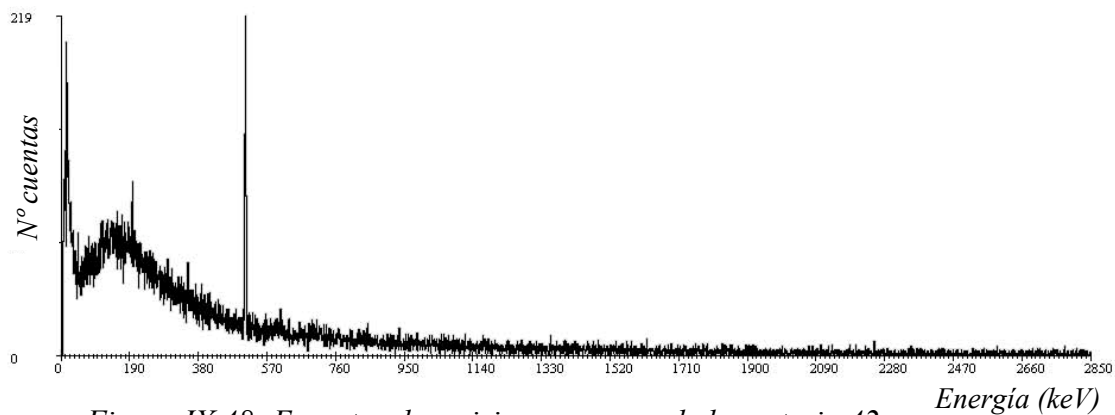


Figura IX.48: Espectro de emisiones gamma de la materia 42.

Materia 43: P-45 Aluminio en polvo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	233±77	1,006E+01	3,323E+00	2,924E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	182±73	1,025E+01	4,110E+00	3,749E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	1,248E+00
	351,932	73±56	6,302E-01	4,834E-01	4,743E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	6,513E-01
	1.764,49	-	-	-	2,130E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	259±76	1,376E+00	4,038E-01	3,417E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	64±43	3,846E-01	2,584E-01	2,319E-01
	860,37	-	-	-	2,364E+00
	2.614,5	-	-	-	4,228E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	4,390E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	1,036E+00
	968,971	-	-	-	1,707E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	4,756E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	2,990E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	3,195E-01
	1.332,501	-	-	-	3,103E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	2,429E+00

Tabla IX.48: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 43.

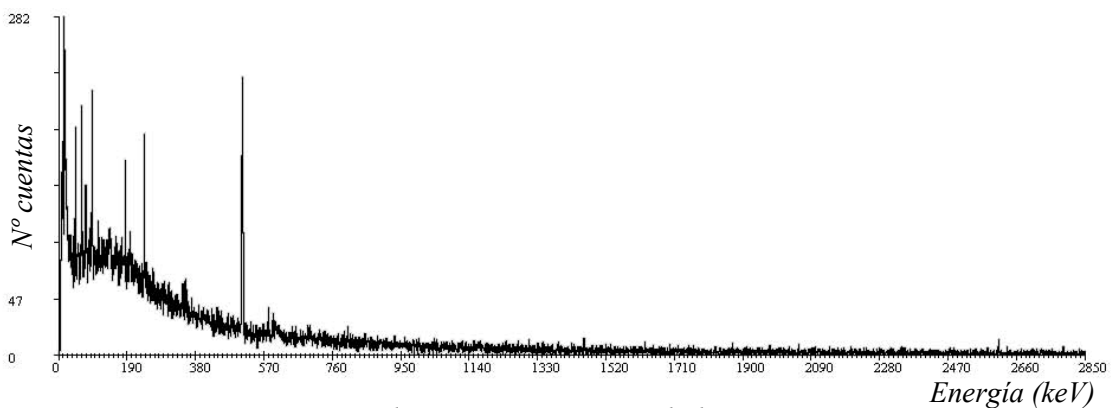


Figura IX.49: Espectro de emisiones gamma de la materia 43.

Materia 44: Q-17 Niquel en polvo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,698E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	2,724E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	5,443E-01
	351,932	-	-	-	2,720E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	2,666E-01
	1.764,49	-	-	-	9,716E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	2,227E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,315E-01
	860,37	-	-	-	9,378E-01
	2.614,5	-	-	-	1,510E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,779E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	4,575E-01
	968,971	-	-	-	7,525E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,735E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,348E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,320E-01
	1.332,501	-	-	-	1,273E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,225E+00

Tabla IX.49: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 44.

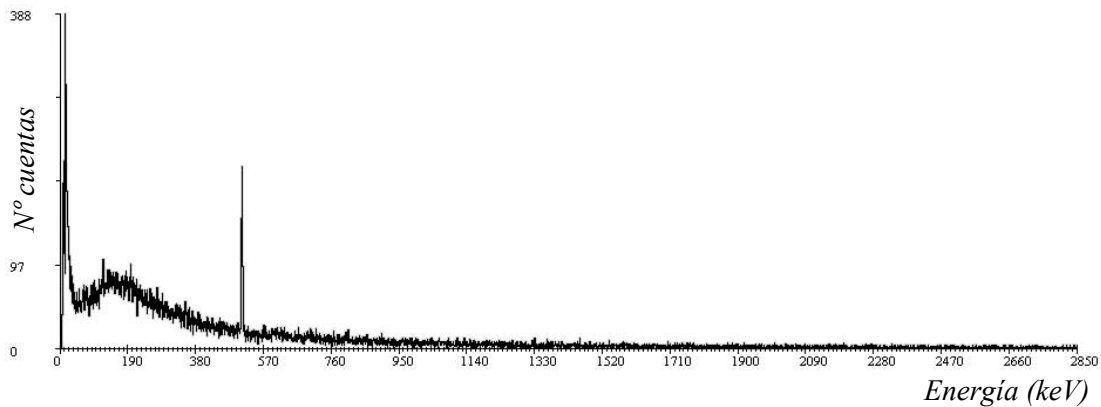


Figura IX.50: Espectro de emisiones gamma de la materia 44.

Materia 45: K-92 Oxido de níquel

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	2,547E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	1.067±126	3,089E+01	3,647E+00	2,327E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	159±70	1,177E+00	5,181E-01	4,534E-01
	351,932	249±74	1,105E+00	3,285E-01	2,559E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	141±51	8,302E-01	3,003E-01	2,360E-01
	1.764,49	45±26	2,035E+00	1,176E+00	6,801E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	490±95	1,339E+00	2,595E-01	1,932E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	195±55	6,025E-01	1,699E-01	1,174E-01
	860,37	-	-	-	1,243E+00
	2.614,5	57±30	5,636E-01	2,966E-01	1,637E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,896E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,873E-01
	968,971	46±31	1,192E+00	8,034E-01	6,551E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	2,767E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,768E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,666E-01
	1.332,501	-	-	-	1,517E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,256E+00

Tabla IX.50: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 45.

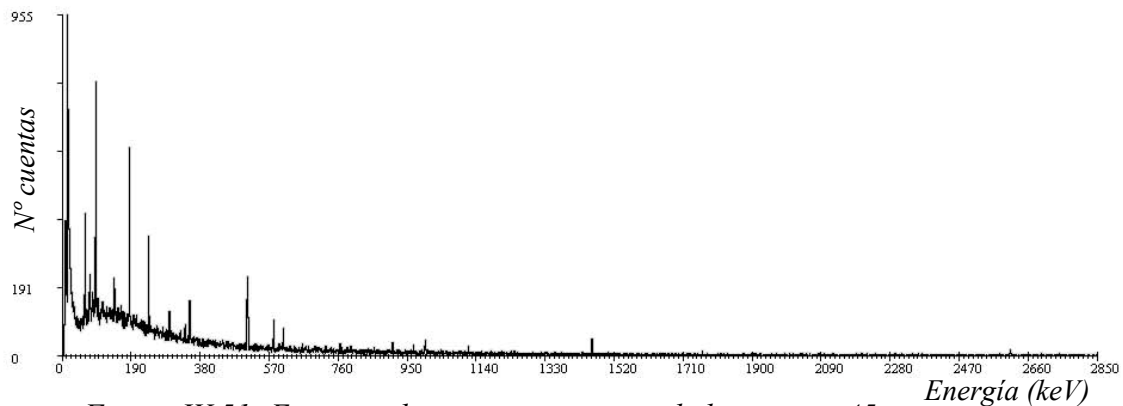


Figura IX.51: Espectro de emisiones gamma de la materia 45.

Materia 46: Q-36 Ferrocromo carburado

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	-	-	-	1,363E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	-	-	-	2,157E+00
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	-	-	-	4,598E-01
	351,932	-	-	-	1,385E-01
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	-	-	-	2,294E-01
	1.764,49	-	-	-	8,194E-01
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	-	-	-	1,885E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	-	-	-	1,105E-01
	860,37	-	-	-	7,500E-01
	2.614,5	-	-	-	1,479E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	1,477E+00
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	-	-	-	4,106E-01
	968,971	-	-	-	6,326E-01
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,487E-01
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	1,050E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	1,003E-01
	1.332,501	-	-	-	1,074E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	-	-	-	9,901E-01

Tabla IX.51: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 46.

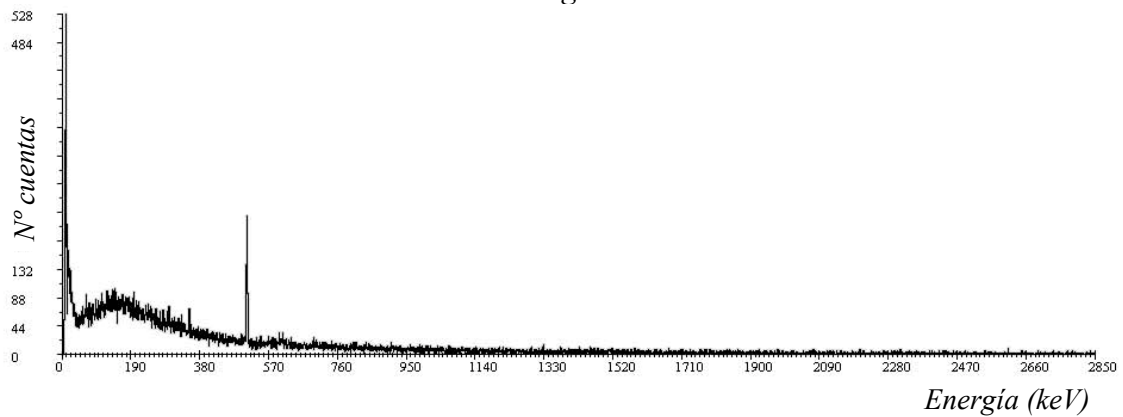


Figura IX.52: Espectro de emisiones gamma de la materia 46.

Materia 47: P-40 Ferrotitanio

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,787E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	2,711E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	5,470E-01
	351,932	142±61	5,250E-01	2,255E-01	1,937E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	71±41	3,482E-01	2,011E-01	1,721E-01
	1.764,49	-	-	-	9,002E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	253±76	5,757E-01	1,729E-01	1,469E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	92±47	2,368E-01	1,210E-01	9,926E-02
	860,37	-	-	-	9,737E-01
	2.614,5	-	-	-	1,262E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,861E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	4,697E-01
	968,971	-	-	-	8,382E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,786E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,319E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,197E-01
	1.332,501	-	-	-	1,257E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,384E+00

Tabla IX.52: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 47.

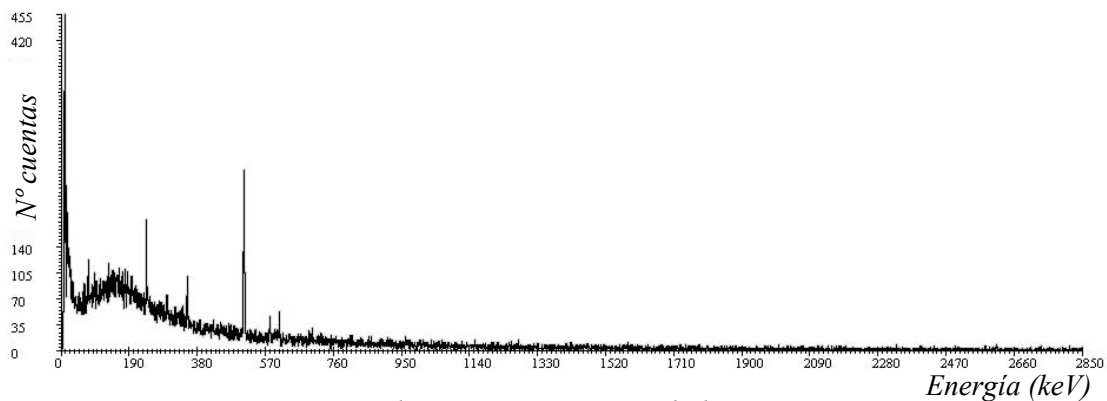


Figura IX.53: Espectro de emisiones gamma de la materia 47.

Materia 48: Q-38A Cromo carburado

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,583E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	93±71	2,085E+00	1,592E+00	1,663E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	4,876E-01
	351,932	-	-	-	2,543E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,538E-01
	1.764,49	-	-	-	1,004E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,978E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,192E-01
	860,37	-	-	-	8,196E-01
	2.614,5	-	-	-	1,298E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,642E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	4,232E-01
	968,971	-	-	-	7,000E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,661E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,217E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,279E-01
	1.332,501	-	-	-	1,309E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	66±32	2,738E+00	1,327E+00	7,550E-01

Tabla IX.53: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 48.

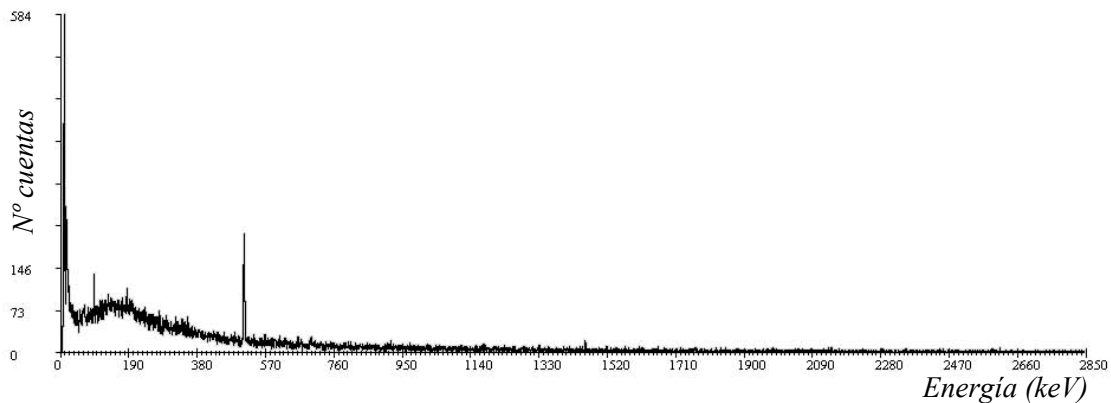


Figura IX.54: Espectro de emisiones gamma de la materia 48.

Materia 49: Q-30A Cromo

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	84±62	1,371E+00	1,012E+00	1,017E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	4,714E-01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	2,546E-01
	351,932	-	-	-	1,662E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	2,275E+00
	1.764,49	-	-	-	6,571E-01
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,959E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,074E-01
	860,37	-	-	-	7,767E-01
	2.614,5	-	-	-	1,074E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,413E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,869E-01
	968,971	-	-	-	6,892E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,575E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,171E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	1,051E-01
	1.332,501	-	-	-	1,117E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,127E+00

Tabla IX.54: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 49.

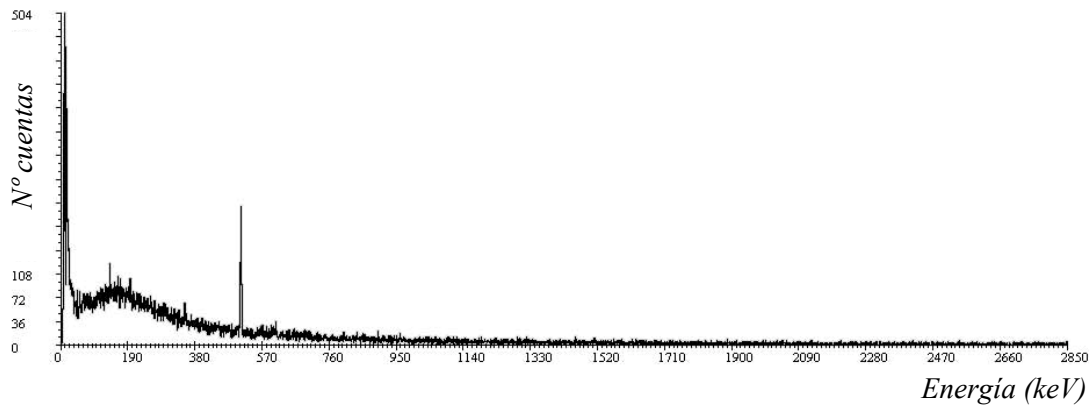


Figura IX.55: Espectro de emisiones gamma de la materia 49.

Materia 50: E-50 Titanato potásico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	5.693±392	2,969E+02	2,044E+01	1,724E+01
Ra^{226}	186,21	11.350±435	7,722E+02	2,959E+01	1,983E+01
Pb^{214}	295,224	22.041±501	3,834E+02	8,714E+00	3,642E+00
	351,932	37.378±617	3,899E+02	6,437E+00	2,026E+00
Bi^{214}	609,312	25.915±508	3,586E+02	7,030E+00	2,021E+00
	1.764,49	4.074±210	4,330E+02	2,232E+01	5,413E+00
Pb^{212}	238,632	10.914±422	7,007E+01	2,709E+00	1,986E+00
Tl^{208}	583,14	4.101±210	2,978E+01	1,772E+00	1,036E+00
	860,37	510±132	3,546E+01	9,179E+00	8,276E+00
	2.614,5	1.434±115	3,332E+01	2,672E+00	1,530E+00
Bi^{212}	727,33	881±151	9,992E+01	1,713E+01	1,373E+01
Ac^{228}	911,204	2.675±206	9,448E+01	7,276E+00	4,404E+00
	968,971	1.336±170	8,137E+01	1,035E+01	7,509E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	3,131E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	1,450E+00
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,875E+00
	1.332,501	-	-	-	1,480E+00
K^{40}	1.460,83	30.581±549	3,849E+03	6,910E+01	9,956E+00

Tabla IX.55: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 50.

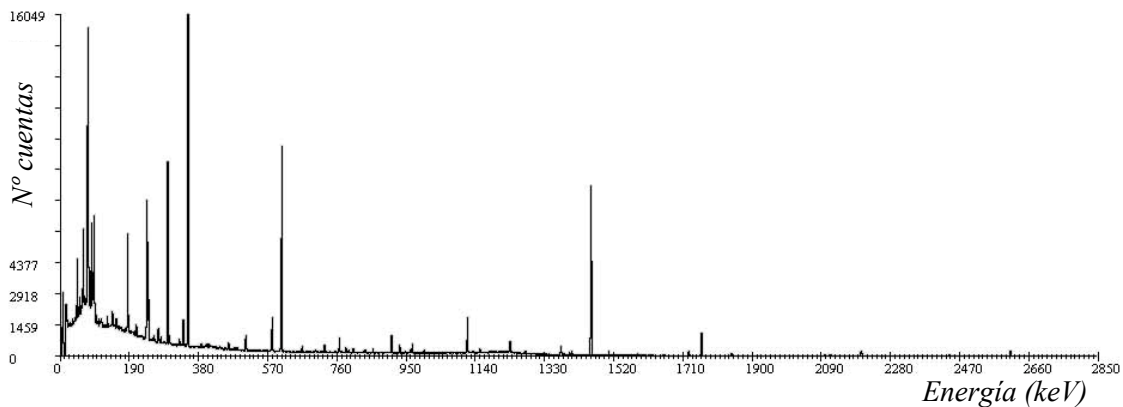


Figura IX.56: Espectro de emisiones gamma de la materia 50.

Materia 51: F-20 Magnesita cruda rey

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	6,560E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	9,620E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	1,926E+00
	351,932	-	-	-	6,081E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	9,475E-01
	1.764,49	-	-	-	2,879E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	8,120E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	3,420E-01
	860,37	-	-	-	3,456E+00
	2.614,5	-	-	-	6,271E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	6,270E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	1,558E+00
	968,971	-	-	-	2,833E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	6,582E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	4,563E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	4,291E-01
	1.332,501	-	-	-	4,217E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	4,519E+00

Tabla IX.56: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 51.

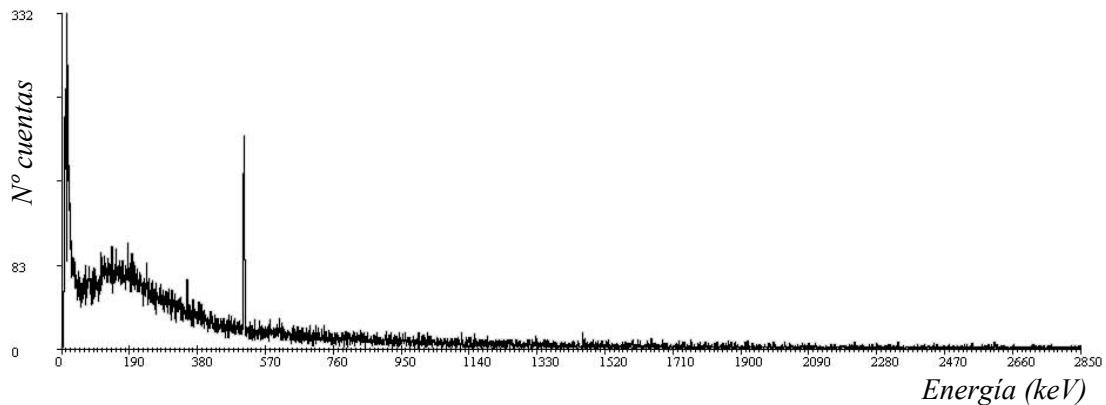


Figura IX.57: Espectro de emisiones gamma de la materia 51.

Materia 52: G-10 Silice

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	287±100	1,431E+01	4,985E+00	4,078E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	310±93	2,016E+01	6,047E+00	5,581E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	721±105	1,199E+01	1,745E+00	1,126E+00
	351,932	1.231±126	1,227E+01	1,256E+00	6,459E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	843±101	1,115E+01	1,336E+00	6,410E-01
	1.764,49	124±43	1,260E+01	4,368E+00	2,605E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	1.423±143	8,732E+00	8,775E-01	5,511E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	527±82	3,657E+00	5,691E-01	2,963E-01
	860,37	45±38	2,991E+00	2,525E+00	2,369E+00
	2.614,5	142±51	3,153E+00	1,133E+00	5,339E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	122±58	1,322E+01	6,287E+00	4,698E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	291±61	9,823E+00	2,059E+00	1,132E+00
	968,971	158±49	9,197E+00	2,852E+00	1,913E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	7,696E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	4,611E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	3,841E-01
	1.332,501	-	-	-	3,882E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	178±51	2,141E+01	6,135E+00	2,892E+00

Tabla IX.57: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 52.

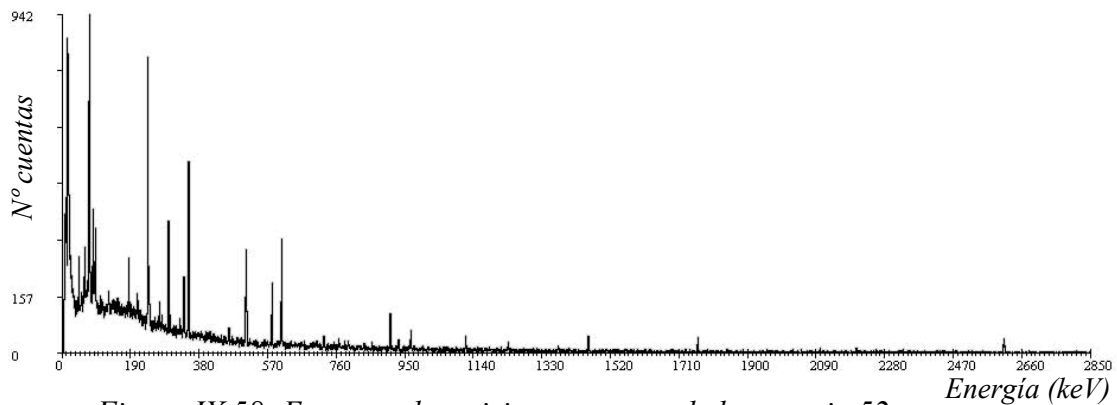


Figura IX.58: Espectro de emisiones gamma de la materia 52.

Materia 53: K-16 Oxido férrico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb</i> ²¹⁰	46,503	1.623±188	1,068E+02	1,237E+01	9,871E+00
<i>Ra</i> ²²⁶	186,21	3.534±235	3,032E+02	2,016E+01	1,295E+01
<i>Pb</i> ²¹⁴	295,224	7.015±277	1,539E+02	6,076E+00	2,359E+00
	351,932	11.605±339	1,527E+02	4,460E+00	1,309E+00
<i>Bi</i> ²¹⁴	609,312	7.829±280	1,366E+02	4,887E+00	1,371E+00
	1.764,49	1.196±117	1,603E+02	1,568E+01	1,174E+01
<i>Pb</i> ²¹²	238,632	-	-	-	5,511E-01
<i>Tl</i> ²⁰⁸	583,14	273±82	2,500E+00	7,509E-01	6,279E-01
	860,37	-	-	-	7,019E+00
	2.614,5	92±43	2,696E+00	1,260E+00	8,785E-01
<i>Bi</i> ²¹²	727,33	-	-	-	1,191E+01
<i>Ac</i> ²²⁸	911,204	190±72	8,464E+00	3,207E+00	2,685E+00
	968,971	130±67	9,985E+00	5,146E+00	4,502E+00
<i>Am</i> ²⁴¹	59,541	-	-	-	1,728E+00
<i>Cs</i> ¹³⁷	661,657	-	-	-	8,877E-01
<i>Co</i> ⁶⁰	1.173,237	-	-	-	9,302E-01
	1.332,501	-	-	-	8,729E-01
<i>K</i> ⁴⁰	1.460,83	1.243±149	1,973E+02	2,365E+01	8,648E+00

Tabla IX.58: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 53.

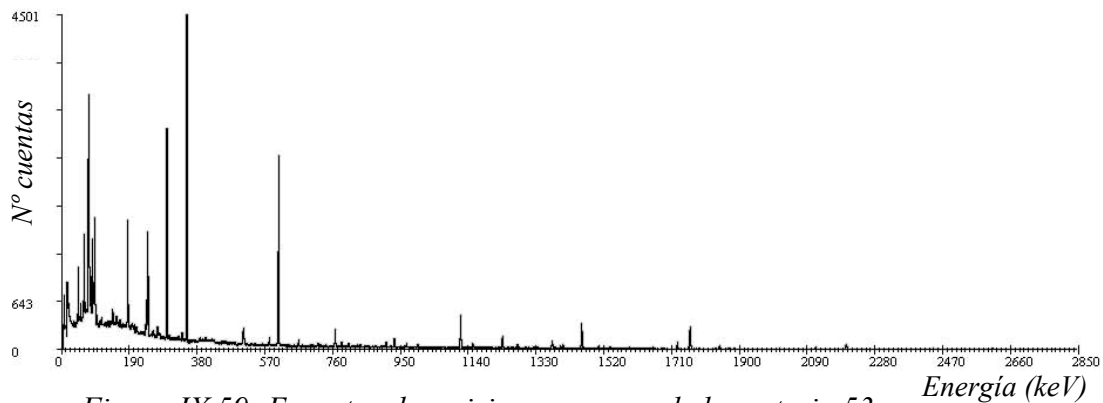


Figura IX.59: Espectro de emisiones gamma de la materia 53.

Materia 54: G-73 Alúmina calcinada

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	5,082E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	169±78	1,153E+01	5,321E+00	5,030E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	1,510E+00
	351,932	69±55	7,218E-01	5,753E-01	5,642E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	7,922E-01
	1.764,49	-	-	-	2,728E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	6,181E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	3,781E-01
	860,37	-	-	-	2,731E+00
	2.614,5	-	-	-	4,965E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	5,112E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	1,477E+00
	968,971	-	-	-	2,155E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	5,202E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	3,632E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	3,068E-01
	1.332,501	-	-	-	3,372E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	3,240E+00

Tabla IX.59: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 54.

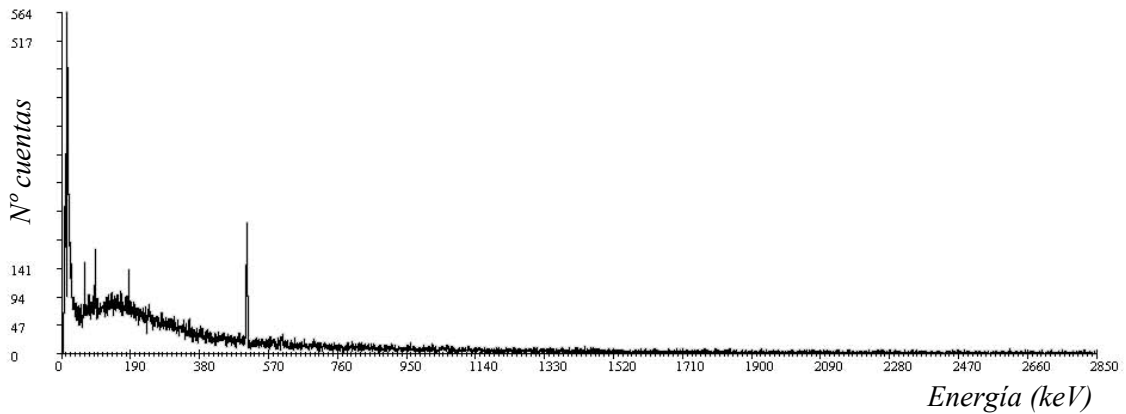


Figura IX.60: Espectro de emisiones gamma de la materia 54.

Materia 55: K-46 Hausmanita

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	1.105±120	5,747E+01	6,241E+00	3,435E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	7,363E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	1,454E+00
	351,932	63±52	6,554E-01	5,410E-01	5,487E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	79±49	1,090E+00	6,762E-01	5,861E-01
	1.764,49	-	-	-	2,250E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	109±77	6,979E-01	4,930E-01	4,878E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	3,624E-01
	860,37	-	-	-	2,684E+00
	2.614,5	-	-	-	3,432E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	4,961E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	1,271E+00
	968,971	-	-	-	2,082E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	5,432E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	3,642E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	3,181E-01
	1.332,501	-	-	-	3,369E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	4,269E+00

Tabla IX.60: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 55.

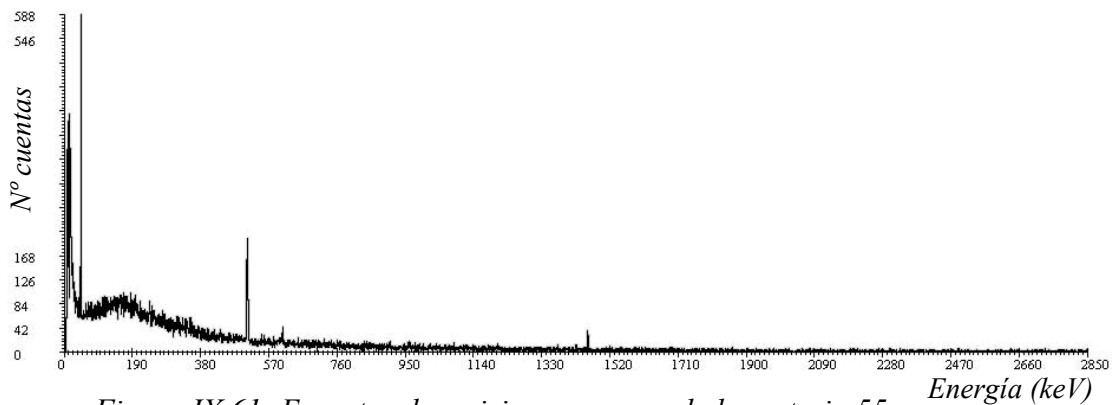


Figura IX.61: Espectro de emisiones gamma de la materia 55.

Materia 56: P-70 Carburo de silicio

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	3,696E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	150±92	6,513E+00	3,995E+00	3,898E+00
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	185±70	2,054E+00	7,771E-01	6,830E-01
	351,932	302±71	2,011E+00	4,727E-01	3,428E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	214±61	1,890E+00	5,388E-01	3,892E-01
	1.764,49	-	-	-	1,762E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	504±98	2,065E+00	4,016E-01	3,102E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	179±58	8,296E-01	2,688E-01	1,952E-01
	860,37	47±38	2,086E+00	1,687E+00	1,462E+00
	2.614,5	-	-	-	4,242E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	3,350E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	95±50	2,142E+00	1,127E+00	8,420E-01
	968,971	-	-	-	9,749E-01
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	3,970E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	2,546E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	2,292E-01
	1.332,501	-	-	-	2,538E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	2,457E+00

Tabla IX.61: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 56.

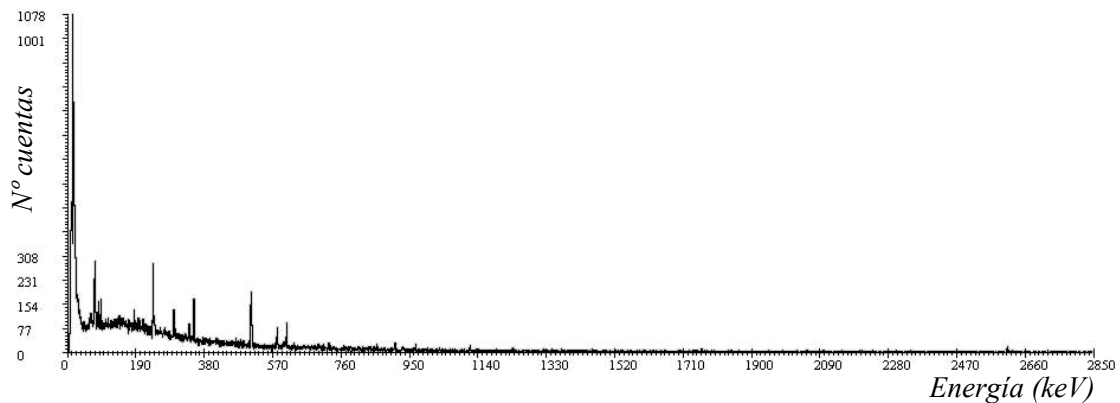


Figura IX.62: Espectro de emisiones gamma de la materia 56.

Materia 57: S-10 Carbonato sódico

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	8,944E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,307E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	2,559E+00
	351,932	-	-	-	1,418E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,307E+00
	1.764,49	-	-	-	3,693E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	6,593E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	4,614E-01
	860,37	-	-	-	4,619E+00
	2.614,5	-	-	-	9,104E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	8,403E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	2,236E+00
	968,971	-	-	-	3,848E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	9,570E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	6,913E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	5,518E-01
	1.332,501	-	-	-	6,421E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	7,065E+00

Tabla IX.62: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 57.

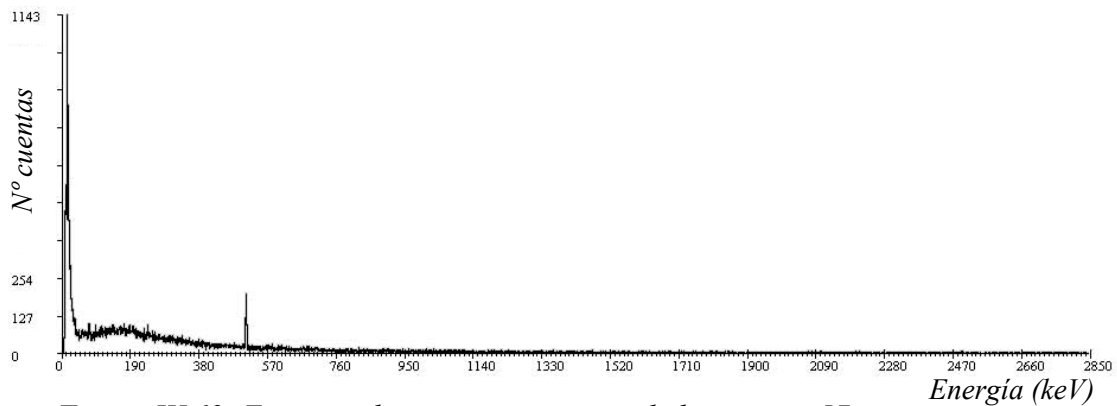


Figura IX.63: Espectro de emisiones gamma de la materia 57.

Materia 58: R-72 Pigmento azul

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	8,940E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	2,087E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	3,241E+00
	351,932	-	-	-	1,427E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,590E+00
	1.764,49	-	-	-	6,969E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,066E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	6,558E-01
	860,37	-	-	-	7,340E+00
	2.614,5	-	-	-	1,266E+00
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,310E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,624E+00
	968,971	-	-	-	5,704E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,411E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,109E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	8,738E-01
	1.332,501	-	-	-	9,642E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	9,580E+00

Tabla IX.63: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 58.

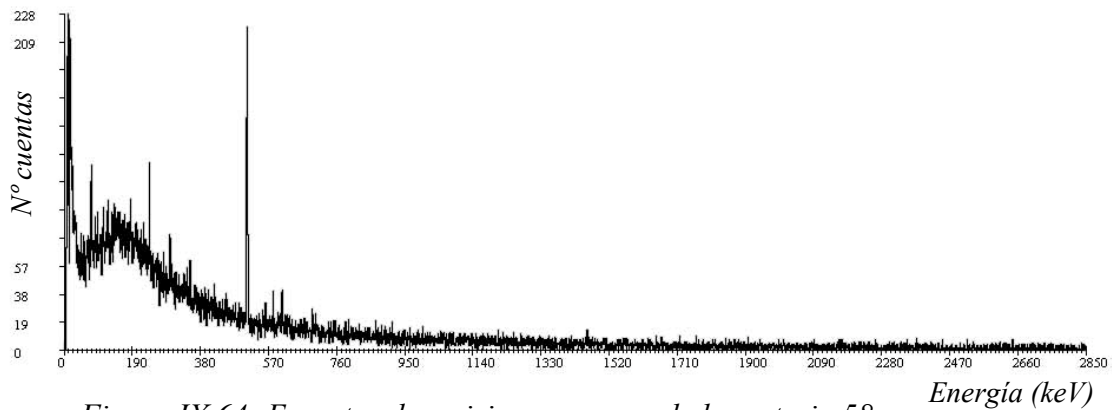


Figura IX.64: Espectro de emisiones gamma de la materia 58.

Materia 59: R-72/V Pigmento verde

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	1,253E+01
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,979E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	3,811E+00
	351,932	-	-	-	2,011E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	1,084E+00
	1.764,49	-	-	-	7,120E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	1,653E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	1,016E+00
	860,37	-	-	-	7,615E+00
	2.614,5	-	-	-	1,119E+00
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,356E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,611E+00
	968,971	-	-	-	5,720E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,369E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	9,380E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	9,986E-01
	1.332,501	-	-	-	9,372E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	1,034E+01

Tabla IX.64: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 59.

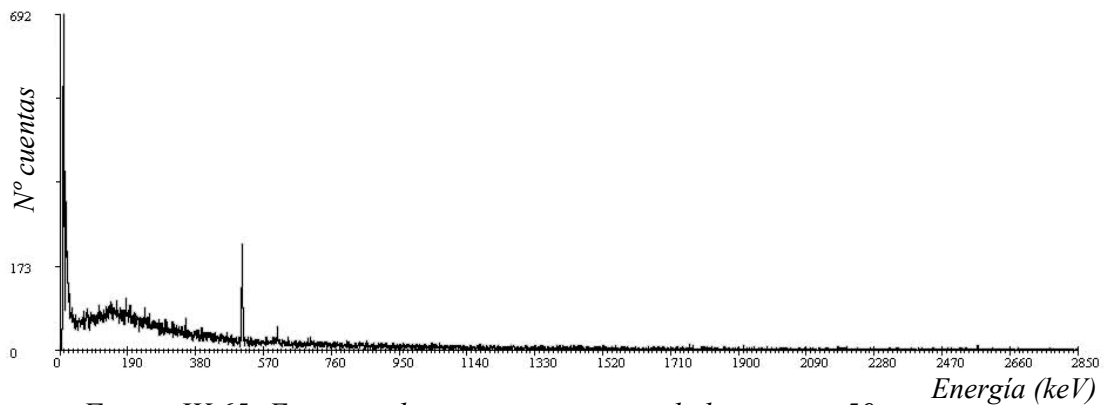


Figura IX.65: Espectro de emisiones gamma de la materia 59.

Materia 61: P-81 Grafito

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	112±68	1,606E+01	9,749E+00	9,371E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	129±84	2,413E+01	1,571E+01	1,609E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	4,322E+00
	351,932	203±65	5,822E+00	1,864E+00	1,432E+00
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	135±55	5,136E+00	2,092E+00	1,675E+00
	1.764,49	-	-	-	7,582E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	114±72	2,012E+00	1,271E+00	1,083E+00
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	68±37	1,357E+00	7,386E-01	6,072E-01
	860,37	-	-	-	7,331E+00
	2.614,5	-	-	-	1,272E+00
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	1,325E+01
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	3,691E+00
	968,971	-	-	-	6,379E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	1,437E+00
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	1,006E+00
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	9,505E-01
	1.332,501	-	-	-	9,740E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	53±39	1,834E+01	1,349E+01	8,692E+00

Tabla IX.66: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 61.

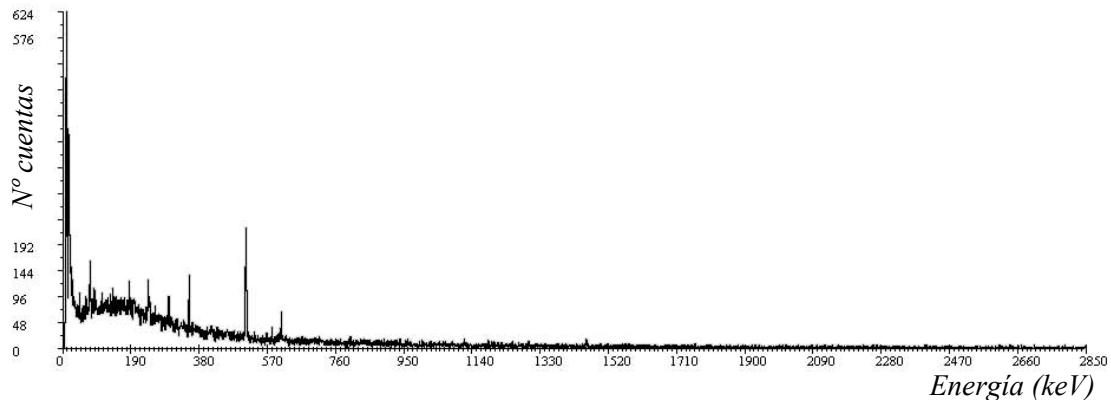


Figura IX.67: Espectro de emisiones gamma de la materia 61.

Materia 62: R-51 Napol

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
<i>Pb²¹⁰</i>	46,503	-	-	-	7,148E+00
<i>Ra²²⁶</i>	186,21	-	-	-	1,056E+01
<i>Pb²¹⁴</i>	295,224	-	-	-	1,452E+00
	351,932	-	-	-	8,433E-01
<i>Bi²¹⁴</i>	609,312	-	-	-	7,841E-01
	1.764,49	-	-	-	4,368E+00
<i>Pb²¹²</i>	238,632	-	-	-	9,223E-01
<i>Tl²⁰⁸</i>	583,14	-	-	-	5,129E-01
	860,37	-	-	-	4,090E+00
	2.614,5	-	-	-	5,523E-01
<i>Bi²¹²</i>	727,33	-	-	-	7,092E+00
<i>Ac²²⁸</i>	911,204	-	-	-	2,035E+00
	968,971	-	-	-	3,040E+00
<i>Am²⁴¹</i>	59,541	-	-	-	7,793E-01
<i>Cs¹³⁷</i>	661,657	-	-	-	5,786E-01
<i>Co⁶⁰</i>	1.173,237	-	-	-	5,181E-01
	1.332,501	-	-	-	5,459E-01
<i>K⁴⁰</i>	1.460,83	-	-	-	5,197E+00

Tabla IX.67: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 62.

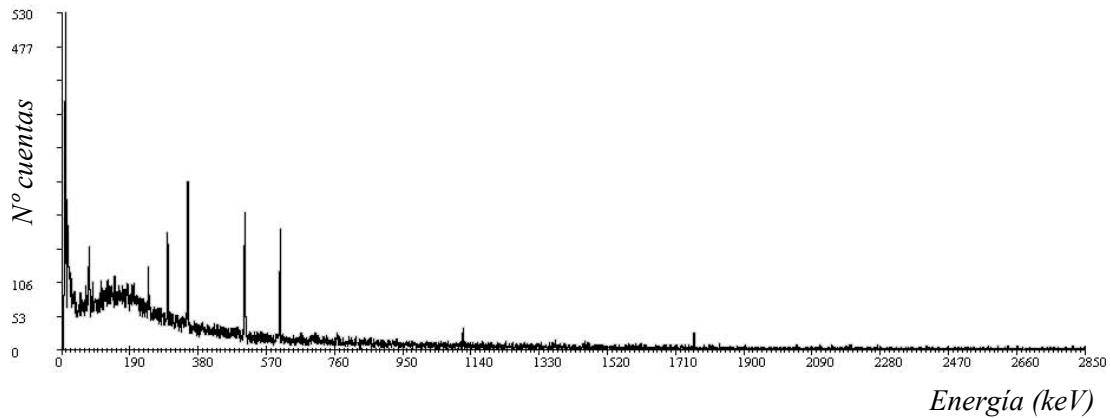


Figura IX.68: Espectro de emisiones gamma de la materia 62.

Materia 63: B-1 Silicato

ISOTOPO	ENERGIA	AREA ±Incert	ACTIVIDAD Bq/Kg	INCERT. Bq/Kg	AMD Bq/Kg
Pb^{210}	46,503	-	-	-	1,515E+01
Ra^{226}	186,21	-	-	-	1,211E+01
Pb^{214}	295,224	-	-	-	1,865E+00
	351,932	-	-	-	9,545E-01
Bi^{214}	609,312	-	-	-	1,006E+00
	1.764,49	-	-	-	2,669E+00
Pb^{212}	238,632	-	-	-	1,117E+00
Tl^{208}	583,14	-	-	-	7,393E-01
	860,37	-	-	-	6,476E+00
	2.614,5	-	-	-	3,462E-01
Bi^{212}	727,33	-	-	-	1,104E+01
Ac^{228}	911,204	-	-	-	3,375E+00
	968,971	-	-	-	6,221E+00
Am^{241}	59,541	-	-	-	1,493E+00
Cs^{137}	661,657	-	-	-	8,155E-01
Co^{60}	1.173,237	-	-	-	1,405E+00
	1.332,501	-	-	-	9,332E-01
K^{40}	1.460,83	-	-	-	3,220E+01

Tabla IX.68: Actividades, incertidumbres y actividad mínima detectable para los radionucleidos emisores gamma en la materia 63.

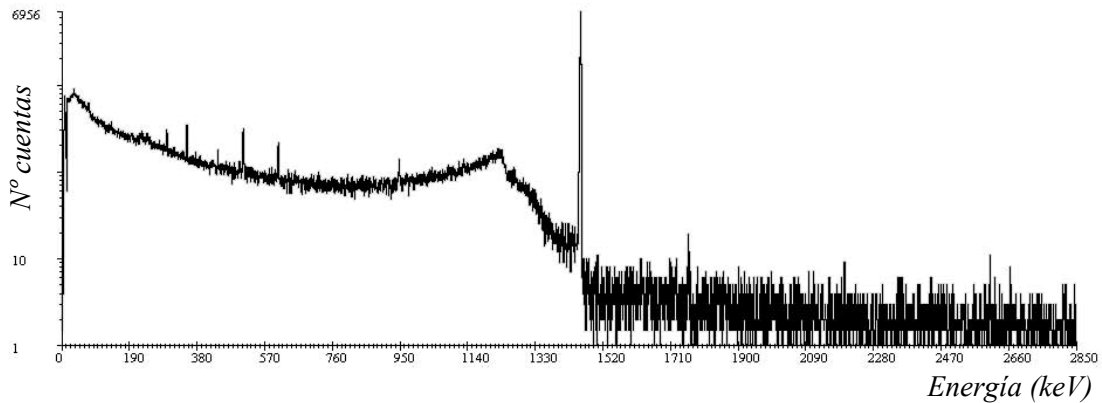


Figura IX.69: Espectro de emisiones gamma de la materia 63.

IX.4.4 Conclusiones del análisis gamma de las materias primas

Los resultados obtenidos mediante espectrometría gamma permiten elaborar una primera conclusión sobre los posibles componentes radiactivos de las materias primas que forman parte del recubrimiento de los electrodos utilizados para soldadura por arco eléctrico.

En la siguiente Tabla seleccionamos tres isótopos emisores gamma representativos de las cadenas de desintegración del U^{238} y del Th^{232} (ver Tablas IX.2 y IX.3); junto con las cantidades en términos de actividad para el isótopo K^{40} .

<i>Materia prima</i>	<i>Actividad Ra²²⁶ (Bq/Kg)</i>	<i>Actividad Th²³² (Bq/Kg)</i>	<i>Actividad Ac²²⁸ (Bq/Kg)</i>	<i>Actividad K⁴⁰ (Bq/Kg)</i>
1. Carbonato cálcico	11,94			7,92
2. Dolomita	22,17		2,21	
5. Carbonato ferroso	22,09	0,97	3,08	60,67
6. Ferrosilicio	7,57	1,54		
7. Rutilo	797,70	46,05	132,80	40,01
10. Feldespato potásico	11,90	1,94	6,89	2815
11. Carbonato potásico				15.920
12. Ferromanganeso		0,116		
13. Rutilo (africano)	482,70	35,54	105,05	
14. Rutilo (australiano)	884,70	8,57	24,39	
15. Polvo Hierro	3,30	1	3,85	
16. Oligisto	31,99	0,63	1,70	6,64
17. Ilmenita	116,20	46,61	140,10	
18. Mica	131,60	10,10	30,89	1.463
19. Silice	24,36	7,81	21,28	87,85
20. Espato Fluor	5,33	1,38	3,52	14,99
21. Alginato cálcico		1,06		
23. Goma arábica				79,15
25. Silicato zirconio	5.182	247,76	730,3	
26. Talco	112,30	9,66	26,78	
27. Caolín	65,22	12,12	27,80	211,60

<i>Materia prima</i>	<i>Actividad Ra²²⁶ (Bq/Kg)</i>	<i>Actividad Tl²⁰⁸ (Bq/Kg)</i>	<i>Actividad Ac²²⁸ (Bq/Kg)</i>	<i>Actividad K⁴⁰ (Bq/Kg)</i>
28. Carbonato bario	19,22	1,17	2,80	
29. Wollastonita	26,56	0,53		22,72
30. Mica	61,25	3,66	10,32	2.630
31. Carboximetilcel.				7,90
32. Mica	61,24	3,80	11,67	2.805
33. Bentonita	304,2	50,88	159,20	145,20
34. Fonolita	131,6	5,58	16,05	2.004
35. Nefelita Sienita		1,70	2,37	1.343
36. Feldespato potásico	79,15	4,90	14,05	1.180
37. Dióxido de titanio	12,39			81,36
38. Harina de madera		5,33		
39. Harina de coco.				51,02
41. Zink. Fritte	26,21	3,62	10,53	1.261
43. Aluminio	10,25	0,38		
45. Óxido níquel	30,89	0,58	1,2	
47. Ferrotitanio		0,26		
48. Cromo	2,08			2,74
50. Titanato potásico	772,20	32,85	87,92	3.849
52. Sílice	20,16	3,26	9,51	21,41
53. Óxido férrico	303,2	2,60	9,22	197,3
54. Alúmina	11,53			
56. Carburo silicio	6,51	1,45	2,14	
61. Grafito	24,13	1,35		18,34

Tabla IX.69: Concentración de actividad en Bq/Kg de Ra²²⁶, Tl²⁰⁸, Ac²²⁸ y K⁴⁰ en las materias primas analizadas por espectrometría gamma.

Como se observa en la Tabla anterior de las 63 materias analizadas, en 19 de ellas se detecta la presencia de los isótopos emisores gamma del uranio, torio y del potasio. Para comprobar la existencia de uranio, se ha analizado la actividad del Ra²²⁶, que varía desde 2,08 Bq/kg, en la materia 48 hasta cantidades más elevadas de 5.000 Bq/kg en la materia 25 del silicato de zirconio. Se encuentran niveles intermedios de actividad para

este isótopo en diversas sustancias y mayor presencia en el rutilo; que contiene mayoritariamente óxido de titanio. Este elemento se extrae siempre acompañado de uranio y torio en el mineral de partida.

Para detectar la presencia del Th^{232} , se han medido las actividades de los isótopos de la cadena de desintegración Tl^{208} y Ac^{228} . Se ha detectado torio en 35 de las materias.

También conviene destacar la presencia de Cs^{137} en la harina de madera que se usa como sustancia aglutinante de la mezcla en el recubrimiento de los electrodos.

Se ha detectado el isótopo natural del potasio, K^{40} , en 27 de las materias primas y en cantidades que oscilan entre 6,64 Bq/kg en el oligisto hasta 15.920 Bq/kg en el carbonato potásico.

Se puede afirmar que el uranio y el torio se encuentran presentes también en los electrodos recubiertos en mayor o menor proporción según la cantidad de materia prima que se utilice en cada revestimiento. Se considera conveniente estudiar la exposición de los operarios que realizan soldadura por arco eléctrico. La cubierta de algunos electrodos, que se volatiliza en el proceso de soldadura, puede contener isótopos radiactivos naturales presentes en las materias primas que se utilizan para su fabricación. Lo mismo sucede con ciertos tipos de cable para soldadura en continuo con un alma de composición análoga a la cubierta de los electrodos.

Si se tiene en cuenta que en España existen varias fábricas de electrodos y que la producción de una de ellas, ubicada en las cercanías de Zaragoza, es de un millón de electrodos al día, a lo que hay que sumar una importante producción de cable para soldadura en continuo, y que usualmente los operarios no llevan ninguna protección por lo que respecta a la inhalación de humos, consideramos que el tema merecería un estudio más detallado.

CAPITULO X

CONCLUSIONES

En esta memoria se presenta el estudio realizado sobre el torio en los electrodos de soldadura, determinando la radiactividad presente en los electrodos toriados para soldadura TIG, mediante espectrometría gamma y alfa. Se ha estimado la dosimetría que puede recibir el trabajador en los procesos de soldadura, tanto en soldeo como en afilado. Finalmente se ha realizado un estudio de la composición radiactiva de las materias primas utilizadas como recubrimiento de los electrodos ordinarios de soldadura. A continuación se resumen las principales conclusiones obtenidas en este trabajo:

1. Se ha realizado la puesta a punto del sistema de espectrometría gamma. Se detallan las etapas llevadas a cabo para minimizar los efectos de la radiactividad ambiental, que han servido para mejorar la mínima radiactividad que el sistema puede detectar. La reducción del fondo del detector se llevó a cabo mediante blindaje de plomo, cobre y la disminución de la presencia de radón por medio de una ventilación inicial con nitrógeno gas seguido de un flujo forzado por la evaporación de nitrógeno desde el dewar. Se completa el sistema de espectrometría gamma con un detector plástico de centelleo que suprime en gran medida los fotones que se producen como consecuencia de la interacción de la radiación cósmica con el detector y el blindaje. Con estas medidas se ha conseguido una reducción del 99% en el número de cuentas sobre el espectro del fondo.

2. La determinación de la eficiencia del detector es fundamental en cualquier sistema de espectrometría. Es conveniente realizar la calibración para el cálculo de eficiencia en una geometría lo más parecida a la muestra que se analiza. En esta memoria se ha realizado el análisis gamma de electrodos de wolframio toriado de 1, 2,4 y 4 mm. de diámetro. Para ello se han preparado tres patrones de calibración utilizando como recipientes tres tubos de vidrio de los diámetros referidos anteriormente y según las

recomendaciones del procedimiento 1.4 del CSN. Estas calibraciones nos han permitido realizar el análisis gamma directo de los electrodos de wolframio aleados con óxido de torio y comparar las actividades de los emisores gamma de la cadena de desintegración del Th^{232} con las actividades determinadas por espectrometría alfa de los emisores alfa. De esta forma se ha analizado el estado de la cadena de desintegración y se ha comparado con el valor teórico calculado si la cadena hubiese permanecido en equilibrio.

3. Se ha realizado la puesta a punto también del sistema de espectrometría alfa, se ha estudiado la variación de la eficiencia en función de la distancia de la muestra al detector, se han realizado las correspondientes rectas de calibración en energía. Debido a la alta actividad de las muestras analizadas en algunos casos y a los posibles núcleos de retroceso se ha mantenido una distancia entre la fuente y el detector superior a 9 mm.

4. En relación con los procedimientos radioquímicos desarrollados, se han adecuado tres procedimientos según la distinta naturaleza de la matriz que contenía el isótopo de interés. Se ha optimizado el método de coprecipitación con hidróxido férrico para ello, tras la digestión ácida de las muestras de electrodos toriados, se ha incluido la etapa de preconcentración de torio por coprecipitación. Se ha evitado así la filtración del óxido de wolframio muy insoluble en medio ácido y se ha mejorado el rendimiento del proceso.

La cantidad de varilla ha sido determinante y ha sido de 0,1 gr., para valores superiores se complica el proceso de digestión por la aparición de precipitados de wolframio muy insolubles.

Para el análisis de uranio contenido en los electrodos se ha utilizado el procedimiento de separación secuencial con extracción orgánica con tributilfosfato, los rendimientos han disminuido debido a la necesaria eliminación del wolframio antes de la extracción que se ha realizado con la muestra disuelta en medio ácido.

Para las muestras depositadas sobre papel de filtro o etiquetas adhesivas durante los ensayos de soldadura el procedimiento que ofreció mejores rendimientos para separar el torio fue la cromatografía de intercambio iónico.

5. Los valores de actividad de los isótopos emisores gamma Tl^{208} y el Ac^{228} de la cadena de desintegración del Th^{232} , analizados por espectrometría gamma, y los valores de actividad calculados por espectrometría alfa para el Th^{232} , se han utilizado para valorar el estado de equilibrio de la cadena. Las relaciones entre el número de átomos $N_{Tl^{208}}/N_{Th^{232}}$ y $N_{Tl^{208}}/N_{Ac^{208}}$ han sido distintas a los valores teóricos calculados en equilibrio. No se han mantenido las actividades de ambos isótopos constantes puesto que la relación de núcleos es menor que el valor esperado en ambos casos. El equilibrio se ha roto por eliminación del radón, lo que lleva a pensar que el óxido de torio se encuentra repartido uniformemente a lo largo de toda la varilla. Estos resultados de la comparación de las actividades de los isótopos al inicio y al final de la cadena radiactiva resultan confirmados por el estudio por microscopía electrónica de barrido de la superficie de los electrodos. Estos presentan numerosas imperfecciones por donde se han podido producir la eliminación del radón. Además se puede concluir, a través de las imágenes de las secciones longitudinal y transversal de los electrodos, que el óxido de torio se encuentra uniformemente distribuido. El proceso de fabricación de los electrodos toriados se inicia con la mezcla y sinterización de las materias primas que se someten posteriormente a las operaciones de trefilado según el diámetro requerido.

6. Los electrodos son importados y las informaciones sobre su fabricación son difíciles de obtener, pero se ha dispuesto de las técnicas necesarias para poder determinar el número de etapas de separación del torio desde su materia inicial, la monacita. Para ello se ha realizado el análisis de la parte inicial de la cadena de desintegración del Th^{232} . Se ha determinado la variación del cociente de las actividades de los isótopos de torio Th^{228}/Th^{232} en función del tiempo que nos puede indicar el número de procesos de purificación llevados a cabo desde la separación del torio del mineral original hasta llegar al producto final, el electrodo toriado. En los electrodos de la primera marca la relación de actividades varía entre 0,64 y 0,75, que correspondería a dos separaciones de

torio y en la segunda marca los resultados, más cercanos al mínimo, serían compatibles con una única separación.

7. Los electrodos toriados, con un 2% de óxido de torio presentan actividades expresadas en Bq/gr para el isótopo Th^{232} que son compatibles con los valores teóricos para este porcentaje de torio. La presencia de Th^{230} en los electrodos hace necesaria la determinación del posible uranio que frecuentemente acompaña al torio en los minerales naturales. Se ha concluido que los electrodos analizados no contienen cantidades apreciables de uranio y que el isótopo de Th^{230} es aislado en la primera extracción de torio de la monacita. Del análisis por espectrometría alfa de los electrodos aleados con óxido de cerio u óxido de lantano, que son usados en sustitución de los toriados, se ha comprobado que aunque el torio acompaña a estos dos elementos en el mineral de partida, no se aprecia en estos electrodos en cantidades significativas.

8. Se ha estudiado el campo de radiación y la contaminación que se puede producir en el usuario de este tipo de soldadura mediante tres ensayos: soldadura automática, manual y ensayo de afilado. El análisis por espectrometría gamma ha confirmado la presencia de torio en los filtros recogidos y se ha procedido a la cuantificación de los distintos isótopos de torio mediante espectrometría alfa. Las concentraciones de actividad para el Th^{232} son semejantes a las referidas por otros autores, los valores obtenidos han sido utilizados para hacer una estimación del posible riesgo radiológico.

La estimación de dosis efectiva comprometida anualmente para un operador que trabaje [84] 1.700 horas al año soldando con electrodos con un 2% en óxido de torio, 160 horas de afilado y teniendo en cuenta un caudal de respiración de $1,5 \text{ m}^3/\text{hora}$ resulta ser de $275,85 \mu\text{Sv/año}$. Se ha considerado que el radionucleido, que se encuentra en forma de óxido, seguiría una lenta eliminación.

Atendiendo a los límites permitidos de 50 mSv/año para trabajadores expuestos, se puede concluir que la soldadura TIG con electrodos toriados con un contenido del 2% en óxido de torio y según las condiciones descritas, no supone riesgo radiológico para el trabajador expuesto.

9. Se ha preparado un patrón de calibración en el Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) específico para el posterior análisis por espectrometría gamma de las distintas materias primas que componen los recubrimientos de los electrodos revestidos utilizados fundamentalmente en soldadura por arco eléctrico.

10. En el análisis de las materias primas se ha detectado uranio por la presencia del isótopo Ra^{226} en concentraciones variables desde 2 Bq/kg hasta 5.000 Bq/kg en el silicato de zirconio. Se ha detectado torio en 35 de las 63 materias analizadas en diversas concentraciones. El isótopo de potasio, K^{40} se ha encontrado en 27 de ellas, en cantidades que han ido desde 6,64 Bq/kg en el oligisto hasta 15.920 Bq/kg en el carbonato potásico. Debido a que se produce la volatilización del recubrimiento de los electrodos durante el proceso de soldadura y que los operarios no llevan protección, se considera necesaria la realización de un estudio más completo de este tipo de electrodos cuyo uso es generalizado.

11. Este trabajo es el primer estudio realizado en España sobre radiactividad en los electrodos toriados y dosimetría en los procesos de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas).

12. Este trabajo es el primer estudio que se realiza sobre radiactividad en los recubrimientos de los electrodos revestidos utilizados en soldadura por arco eléctrico.

CAPITULO XI**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] M. Herranz, F. Legarda, R. Núñez-Lagos, C. Pérez, M. Savirón. Thorium applications in Spain. *5th International Symposium on Natural Occurring Material (NORM). Sevilla (2007)*
- [2] M. Herranz, F. Legarda, R. Núñez-Lagos, C. Pérez, M. Savirón. Dosis por almacenamiento de electrodos toriados. XI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Protección Radiológica. *Sociedad Española de Protección Radiológica. Nº53 Vol XIV. (2007).*
- [3] F. Burriel, F. Lucena Conde, S. Arribas Jimeno, J. Hernández Méndez. *Química Analítica Cualitativa. Editorial Paraninfo (1994)*
- [4] *Handbook of Chemistry and Physics. CRC. Press. 66th Edition. (1986)*
- [5] *The Radiochemistry of Thorium. National Academy of Sciences. National Research Council, Nuclear Science Series. NAS-NS 3004. US Atomic Energy Commission (1960)*
- [6] J.B. Hedrick. Thorium. US Geological Survey Minerals Yearbook. *US Geological Survey Publications. <http://minerals.er.usg.gov/mineral/pubs/mcs/thorium>*
- [7] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Isotopes Project-Lunds University. Table of Radioactive Isotopes. <http://ie.lbl.gov/toi>
- [8] Toxicological Profile for Thorium. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Services. Agency for Toxic Substance and Disease Registry. Atlanta. ATSDR. (1990a)

- [9] *NUREG 1717*. Systematic radiological assessment of exemptions for source and by-product materials..U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2001)
- [10] *Radiation Protection 95*. Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides. European Commission Luxembourg. (1999)
- [11] G. Longworth. *The Radiochemical Manual*. AEA Technology plc. Harwell, Oxfordshire, OX110RA. (1998)
- [12] G. Hernández Riesco. *Manual del Soldador*. Asociación Española de Soldadura y Tecnología de Unión. 12ª Edición. Cesol. (2004)
- [13] M. F. L'Annunziata. *Handbook of Radioactivity Analysis*. Second Edition. Academic Press. (2004)
- [14] G. Friedlander, J. W. Kennedy, E. S. Macías, J. M. Miller. *Nuclear and Radiochemistry*. A Wiley-Interscience Publication. (1981)
- [15] C. Pérez Marín, R. Nuñez-Lagos, A. Carrión, A. Virto. Fondo y blindaje en detectores de germanio. *IV Jornadas sobre Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental*. Universidad de Sevilla. Vol. II, pp 127-132 (2005)
- [16] Canberra Industries Inc. *Germanium Detectors. User's Manual*. 800 Research Parkway, Meriden CT06450. (2003) <http://www.canberra.com>
- [17] R. Nuñez-Lagos, A. Virto. Shielding and Background reduction. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol 47, N° 9710, pp 1011-1021 (1996)

- [18] L. Pujol, J.A. Suárez Navarro. Prácticas de Laboratorio de Radiactividad Ambiental. Cuadernos de Investigación. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)*. Ministerio de Fomento. Ministerio de Medio Ambiente. (2003)
- [19] *Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)* (2004) Selección, preparación y uso de patrones para espectrometría gamma. *Colección de Informes Técnicos 11. Serie Vigilancia Radiológica Ambiental. Procedimiento 1.4.*
- [20] G. Gilmore, J. Kellingway. Practical Gamma Ray Spectrometry. *Ed. J. Wiley*. London (1995)
- [21] *Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)* (2003) Procedimiento para la evaluación de incertidumbres en la determinación de la radiactividad ambiental. *Colección de Informes Técnicos 11. Serie Vigilancia Radiológica Ambiental. Procedimiento 1.3.*
- [22] Centro Español de Metrología (CEM) Madrid (2000) Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Metrología. Ministerio de Fomento.
- [23] IAEA-TECDOC-1401 Viena (2004) Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements. International Atomic Energy Agency.
- [24] Evaluating the Measurement Uncertainty. Fundamentals and practical guidance. I. Lira. Series in Measurement Science and Technology. *Institute of Physics*, London. (2002)
- [25] The International Organization for Standardization (ISO) *ISO 11929*. Parte 7. Revision (2005)
- [26] L.A. Currie. On the interpretation of errors in counting experiments. *Analytical Letters*. 4 (12) pp. 873-882 (1971)

- [27] L. A. Currie. Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination. *Application to Radiochemistry*. Vol 40, N°3, pp. 586-593 (1968)
- [28] B. Pastenak. Detection limits for Radionuclides in the análisis of multicomponent gamma ray spectrometer data. *Nuclear Instruments and Methods*. Vol. 91, pp. 533-540 (1971)
- [29] L.A. Currie. Lower limit of detection: Definition and Elaboration of a Proposed Position for Radiological Effluent and Environmental Measurements. *NUREG/CR-4007*. Washington, DC. *Nuclear Regulatory Comisión*. (1984)
- [30] Libro homenaje al profesor M. Quintanilla. Los límites de decisión en medidas de radiactividad. Algunas cuestiones de Ciencia. *Prensas Universitarias de Zaragoza*. (2007)
- [31] E. García-Toraño, J.L.Gascón, T. Crespo y col. Curso espectrometría alfa y sus aplicaciones. Introducción a la espectrometría alfa. Instituto de Estudios de la Energía. Formación en Protección Radiológica. *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*. (CIEMAT) Madrid (2001)
- [32] G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. *Ed. John Wiley and Sons*, Nueva York (1979)
- [33] N. Tsoulfanidis. Measurements and Detection of Radiation. *Mac Graw Hill Series in Nuclear Engineering*. Hemisphere Publishing Corporation. Washington (1993)
- [34] J.L. Gascón, A. Muñoz. Optimization of the parameters affecting the solid state detector efficiency in alpha-spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol.257, N° 2 pp. 371-374 (2003)

- [35] Canberra Industries Inc. Alpha Spectrometer. Model 7401/7401UR. User's Manual. Meriden (1999)
- [36] Canberra Industries Inc. Multiport II. Multichannel Analyzer. User's Manual. Meriden (2003)
- [37] Canberra Industries Inc. Genie 2000. Spectroscopy System Operations. Meriden (2002)
- [38] Canberra Industries Inc. Genie 2000. Customization. Tools Manual. Meriden (2002)
- [39] F.Vera Tomé, A. Martín Sánchez. Study of the energy resolution and yield of several methods for preparing uranium samples for alpha spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 41. pp. 449-452 (1990)
- [40] M. Herraiz, A. Abelairas, F. Legarda. Uranium contents in raw waters from Biscay (Spain). *Applied Radiation and Isotopes*. Vol 51, pp. 203-208 (1999)
- [41] M. Herraiz, A. Abelairas, F. Legarda. Uranium contents and associated effective doses in drinking water from Biscay (Spain). *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 48, pp857-861 (1997)
- [42] T. Gäfvert, J. Pagels and E. Holm. Thorium exposure during Tungsten Inert Gas Welding with Thoriated Tungsten Electrodes. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol 103, Nº 4, pp. 349-357 (2003)
- [43] P. Blanco Rodriguez, F. Vera Tomé, J. C. Lozano. Concerning the low uranium and thorium yields in the electrodeposition process of soil and sediment analyses. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 54, pp 29-33 (2001)

- [44] E. Holm, R. Fukai. Method for multi-element alpha-spectrometry of actinides and its application to environmental radioactivity studies. *Talanta*. Vol. 24, pp. 659-664 (1977)
- [45] R.N. dos Santos, L.S. Marques, S.H. A. Nicolai, F.B. Ribeiro. Determination of thorium concentrations and activity ratios in silicate rocks by alpha spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 60 pp. 89-97 (2004)
- [46] J.C. Lozano, F. Fernandez, J.M. Gomez. Preparation of alpha-spectrometric sources by coprecipitation with $\text{Fe}(\text{OH})_3$: Application to Actinides. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 48, N° 3, pp. 383-389 (1997)
- [47] J.C. Lozano, F. Fernandez, J. M. Gomez. Preparation of alpha-spectrometric sources by coprecipitation with $\text{Fe}(\text{OH})_3$: Application to uranium. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 50 pp. 475-477 (1999)
- [48] F. V. Tomé, M.P. Blanco Rodriguez, J.C. Lozano. Study of the representativity of uranium and thorium assays in soil and sediment samples by alpha spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 56 pp. 393-398 (2002)
- [49] J. P. Bolivar. Aplicaciones de la espectrometría gamma y alfa al estudio del impacto radiactivo producido por industrias no nucleares. Tesis doctoral. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad de Sevilla (1995)
- [50] R.N. dos Santos, L.S. Marques, S.H.A. Nicolai, F.B. Ribeiro. Determination of thorium concentrations and activity ratios in silicate rocks by alpha spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 60, pp. 89-97 (2004)
- [51] J.P. Bolivar, R. García-Tenorio, M. García-León. Determinación de isótopos de torio en aguas y sedimentos por espectrometría alfa. *Anales de Física*. Vol 92, N°2, pp. 101-109 (1996)

- [52] E. Julve. Electrodeposición de metales. Fundamentos, Operaciones e Instalaciones. EJS (2000)
- [53] L. Hallstadius. A method for the electrodeposition of actinides. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* Vol. 223, pp. 266-267 (1984)
- [54] N.A. Talvitie. Electrodeposition of Actinides for Alpha Spectrometric Determination. *Analytical Chemistry*, Vol 44, N° 2, pp. 280-283 (1972)
- [55] Hasl 300. Environmental Measurements Laboratory. Procedures Manual. 27th Edition. US Department of Energy (1992)
- [56] R. García- Tenorio, M. García-León, G. Madurga, C. Piazza. Preparación de muestras de actínidos y Ra para espectrometría alfa por el método de electrodeposición. *Anales de Física Serie B*, Vol. 82, pp.238-244 (1986)
- [57] F.Vera Tomé, A. Martín Sánchez. Optimizing the parameters affecting the yield and energy resolution in the electrodeposition of uranium. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 42. pp. 135-140 (1991)
- [58] F. Vera Tomé, M. Jurado Vargas y A. Martín Sánchez. Yields and losses at each step in preparing uranium and thorium samples for alpha spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 45, N° 4, pp.449-452 (1994)
- [59] F.Vera Tomé, M. Jurado Vargas and A. Martín Sánchez. Simplex method for optimization of experiments application to electrodeposition in alpha spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. Vol. 348, N° 1. pp. 183-187 (1994)

- [60] R. Nuñez-Lagos, F. Legarda, C. Pérez, M. Savirón, M. Herranz. El torio en los electrodos de soldadura. *Sociedad Nuclear Española* N° 266 Bis. pp.122 (2006)
- [61] William D. Ehmann. Diane E. Vance. Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis. Vol.116. A Wiley-Interscience Publication. (1991)
- [62] K. Mayer, H. Ottmar, G. Tamborini, I. Ray, H. Thiele. Analytical methods for thorium determination: a journey from conventional methods to novel applications. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 97, N° 2, pp. 193-198 (2001)
- [63] J. Orloff. Handbook of Charged Particle Optics. Optical Engineering. CRC Press. New York. (1997)
- [64] D.A. Skoog, F.J. Holler, T.A. Nieman. Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. Mc Graw-Hill. (2001)
- [65] O.C. Wells. Scanning Electron Microscopy. Mc Graw-Hill. (1974)
- [66] D.E. Newbury y col. Compositional mapping with the Electron Probe Microanalyzer: Part I. *Analytical Chemistry*, Vol. 62 N° 22 (1990)
- [67] D.E. Newbury y col. Compositional Mapping with electron Probe Microanalyzer: Part II. *Analytical Chemistry*. Vol. 62 N° 24 (1990)
- [68] X-Ray Data Booklet. X-Ray Emission Energies de Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) <http://xdb.lbl.gov>
- [69] E. Browne, J.M. Dairiki, R.E. Doebler. Ed. C.M. Lederer, V.S. Shirley. Table of Isotopes. 7th Edition. A Wiley-Interscience Publication. (1978)

- [70] C. Pérez-Marín. Radiactividad y Dosimetría en los procesos de soldadura con electrodos toriados. V Jornadas sobre Calidad en el Control de la Radiactividad Ambiental. Jaca. Pendiente de publicación por el Consejo de Seguridad Nuclear. (2008)
- [71] E. M. Crim, T.D. Bradley. Measurements of air concentrations of thorium during grinding and welding operations using thoriated tungsten electrodes. *Health Physics* . Vol. 68, N° 5 (1995)
- [72] T. Ludwig, D. Schawb, G. Seitz, H. Siekmann. Intakes of thorium while using thoriated tungsten electrodes for TIG welding. *Health Physics*. Vol. 77. N° 4, pp. 462-469 (1999)
- [73] P. Vinzents, O.M. Polsen, R. Ligaard, H. Simonsen, E.B. Hansen, J. Hviid, y O. Svane. Cancer risk and thoriated welding electrodes. *Occupational Hygiene*. Vol. 1, pp. 27-33 (1994)
- [74] L.M. Mc Dowell-Boye. Estimated radiation doses from thorium and daughters contained in thoriated welding electrodes. (Oak Ridge, T.N.. Oak Ridge National Laboratory) NRC Office of Standards Development, NUREG/CR-1039 (1979)
- [75] A.J. Breslin, y W.B Harris. Use of thoriated tungsten electrodes in inert gas shielded arc welding. *American Industrial Hygiene Association Quaterly*. Vol 13, N° 4, pp.191-195 (1952)
- [76] J. T. Jankovic, W.S. Underwood, G.M. Goodwin. Exposures from thorium contained in thoriated tungsten welding electrodes. *American Industrial Hygiene Association* Vol. 60 pp.384-389 (1999)
- [77] A. Reichelt, K.H. Lehmann, A. Reineking, y E. Eder. The measurement of released radionuclides during TIG-welding and grinding. In. Proc. 10th Congress of the International radiation Protection Association. Hiroshima. Japan (2000)

- [78] H. Saito, N. Hisanaga, Y. Okada., S. Hirai, H. Arito. Thorium-232 Exposure during Tungsten Inert Gas Arc Welding and Electrode Sharpening. *Industrial Health*. Vol. 41. pp. 273-278 (2003)
- [79] Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio. BOE núm. 178, de 26 de julio (2001)
- [80] James E. Turner. Atoms, Radiation and Radiation Protection. Editorial Wiley-Interscience. (1995)
- [81] Jacob Shapiro. Radiation Protection. A Guide for Scientists and Physicians. Third Edition. Editorial Harvard. (1990)
- [82] ICRP 60. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press ED, Oxford (1990)
- [83] ICRP 68. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. Pergamon Press ED, Oxford. (1994)
- [84] ICRP 89. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection. Reference Values. Pergamon Press ED, Oxford. (2003)
- [85] J.S.S. Pendfold, S.F. Mobbs, J.P. Degrange, T. Scheneider. Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides. *Radiation Protection 107*. European Commission. Luxembourg, (1999)
- [86] H. Gil Martinez. Soldadura: Principios, Técnica y Equipos. Editorial CEAC. (2005)