REVISTA INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Caracterización mediante espectrometría gamma y fluorescencia de rayos X de colimadores radiactivos para reducción de volumen en la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos

X-ray Gamma ray spectrometric and X Ray fluorescence characterization for radioactive collimators to volume reduction in the Centralized Facility for Radioactive Waste Management

Paula Arboleda[1], Liseth Ospina[1], José María Portilla[1], Johnny Gómez[1], Yonatan Zuleta[1]*

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 6, 102-109, 2022
Recibido: 4 de marzo de 2022
Aceptado: 15 de junio de 2022
Publicado en línea: 29 de julio de 2022
DOI: https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.656

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: P. Arboleda, L. Ospina, J. M. Portilla, J. Gómez y Y. Zuleta, "Caracterización mediante espectrometría gamma y fluorescencia de rayos X de colimadores radiactivos para reducción de volumen en la instalación centralizada para la gestión de desechos radiactivos", *Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.° 6, pp. 102-109, 2022. https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.656

Resumen

El Servicio Geológico Colombiano cuenta con la única Instalación licenciada para gestionar desechos y fuentes radiactivas en desuso en el país: Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos (ICGDR). Entre las prácticas de procesamiento de desechos radiactivos se encuentra el tratamiento previo y el acondicionamiento como preparación para la disposición final; en ocasiones, se reciben unidades de desecho que deben someterse a reducción de volumen y segregación para facilitar que lo que vaya a permanecer en la zona controlada de almacenamiento transitorio de la ICGDR esté constituido exclusivamente por material radiactivo. En la actualidad, dentro de las unidades almacenadas a la espera de su acondicionamiento, se destacan varios colimadores que ocupan alrededor del 15 % de esta área y que contienen en su mayoría material no radiactivo. Con el objetivo de minimizar la ocupación de estos, y debido a la falta de un procedimiento para su procesamiento, se propone elaborar un protocolo para la reducción de volumen de unidades de desecho de este tipo, que incluye una guía para la segregación a través del desensamblaje y retiro de las piezas radiactivas. La identificación experimental de las partes de uranio empobrecido (U-238) fue posible a través de la implementación de técnicas *in situ* y portátiles: espectrometría de rayos gamma de alta resolución y fluorescencia de rayos X.

[1] Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Asuntos Nucleares, Bogotá, Colombia.
* q. e. p. d.
Autor de correspondencia: Paula Arboleda, parboleda@sgc.gov.co

Gracias a esta metodología, se determinaron las piezas y características del material radiactivo que conformaban el colimador, y representaban un 10 % del volumen de la unidad de desecho inicial, y así proceder a su acondicionamiento y almacenamiento temporal. Por su parte, el armazón restante fue dispuesto fuera de la ICGDR como material aprovechable o residuo peligroso, de acuerdo con las características de peligrosidad de cada parte segregada.
Palabras clave: fuentes radiactivas en desuso, uranio empobrecido, segregación de desechos, colimador.

Abstract

The Servicio Geológico Colombiano has the only facility licensed to manage waste and disused radioactive sources in the country: "Centralized Facility for Radioactive Waste Management (ICGDR, in Spanish)". Radioactive waste processing practices include pretreatment and conditioning in preparation for final disposal; sometimes received waste units must be subjected to volume reduction and segregation to ensure that what will remain in the controlled area of transient storage of the ICGDR is constituted exclusively by radioactive material. Currently, within the units stored waiting for their conditioning, there are several collimators that occupy approximately 15% of this area and contain mostly nonradioactive material. With the aim of minimizing the occupation of these waste units, and due to the lack of a procedure for their processing, it is proposed to develop a protocol for the reduction of volume of waste units of this type, which includes a guide for segregation through disassembly and removal of radioactive parts. The experimental identification of the depleted uranium parts (U-238) was possible through the implementation of in situ and portable techniques: high-resolution gamma-ray spectrometry and X-ray fluorescence. Thanks to this methodology, it was possible to determine the parts and characteristics of the radioactive material that made up the collimator. The radioactive material represented 10% of the volume of the initial waste unit, allowing it to proceed to its conditioning and temporary storage, while the remaining frame was arranged outside the ICGDR as usable material or hazardous waste according to the hazardous characteristics of each segregated part.
Keywords: disused radioactive sources, depleted uranium, waste segregation, collimator.

1. Introducción

Por mucho tiempo, una de las modalidades en la práctica médica de radioterapia empleaba unidades de tratamiento con un cabezal con fuentes radiactivas selladas de cobalto 60 (Co-60) de alta actividad. En la actualidad, al entrar estos equipos en desuso, las fuentes radiactivas y su blindaje con uranio empobrecido (U-238) deben gestionarse como desechos radiactivos de manera segura, ya que representan un riesgo para la salud y el medio ambiente.

En Colombia, mediante el proyecto de cooperación internacional "Plan de consolidación nacional de fuentes radiactivas en desuso de alta actividad en poder de usuarios externos" en su segunda fase, liderado por el Ministerio de Minas y Energía (MME), con contribución del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el Gobierno de Canadá, se logró el traslado, recepción y almacenamiento transitorio seguro de ocho cabezales con fuentes en desuso de Co-60 y sus colimadores de U-238 en la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos (ICGDR), provenientes de hospitales, institutos cancerológicos y clínicas del país.

La ICGDR operada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) desde 2010, con licencia de operación proporcionada por la autoridad reguladora (MME), cuenta con tres zonas controladas: almacenamiento transitorio, donde

se disponen los desechos radiactivos en espera de procesamiento; recepción y procesamiento, donde se manipulan, se aseguran y se acondicionan las unidades de desechos radiactivos; y almacenamiento temporal, donde se disponen los desechos por el tiempo estimado de operación de la ICGDR (70 años).

En la actualidad, los colimadores ocupan un volumen considerable en el área de almacenamiento transitorio de la ICGDR (15 %) y para su óptimo tratamiento como desecho radiactivo requieren segregación y reducción de volumen. Durante la recepción de estos elementos, se registraron tasas de dosis en un rango de 0,2 µSv/h a 44 µSv/h. Debido principalmente al contenido (entre 0,2 % y 0,4 %) remanente del isótopo fisionable y más radiactivo: U-235 [1-2].

Los colimadores generalmente tienen piezas electrónicas y aleaciones de material no radiactivo que deben gestionarse según sus características (aprovechable, no aprovechable, residuo peligroso, etc.).

Por otro lado, dentro de la gestión de desechos radiactivos, la caracterización del material es indispensable para encarar la estrategia óptima de tratamiento y acondicionamiento como preparación para la disposición final [3].

Con el fin de identificar y definir la composición de cada pieza del colimador, se llevó a cabo la caracterización radiológica y análisis elemental mediante métodos semicuantitativos: espectrometría de rayos gamma de alta resolución con dos espectrómetros marca CANBERRA y Baltic Instruments; fluorescencia por rayos X (FRX) portátil de marca Thermo Scientific, disponibles en la Dirección de Asuntos Nucleares del SGC. Estas son técnicas no destructivas que pueden aplicarse *in situ* en la ICGDR.

2. Metodología

2.1. Elección de muestra

En las referencias de fabricantes hay once modelos de cabezales de Co-60 y sus colimadores, los más empleados son los que manufactura Atomic Energy of Canada Limited (AECL) con los modelos Theratron. Para cada modelo se asocia una masa en kilogramos de uranio empobrecido en el cabezal y al colimador [4-5].

Para el desarrollo de esta investigación, se seleccionó el colimador con masa total: 92 kg; volumen inicial: 90 cm^3; masa nominal de uranio empobrecido: 22,5 kg, de un cabe-

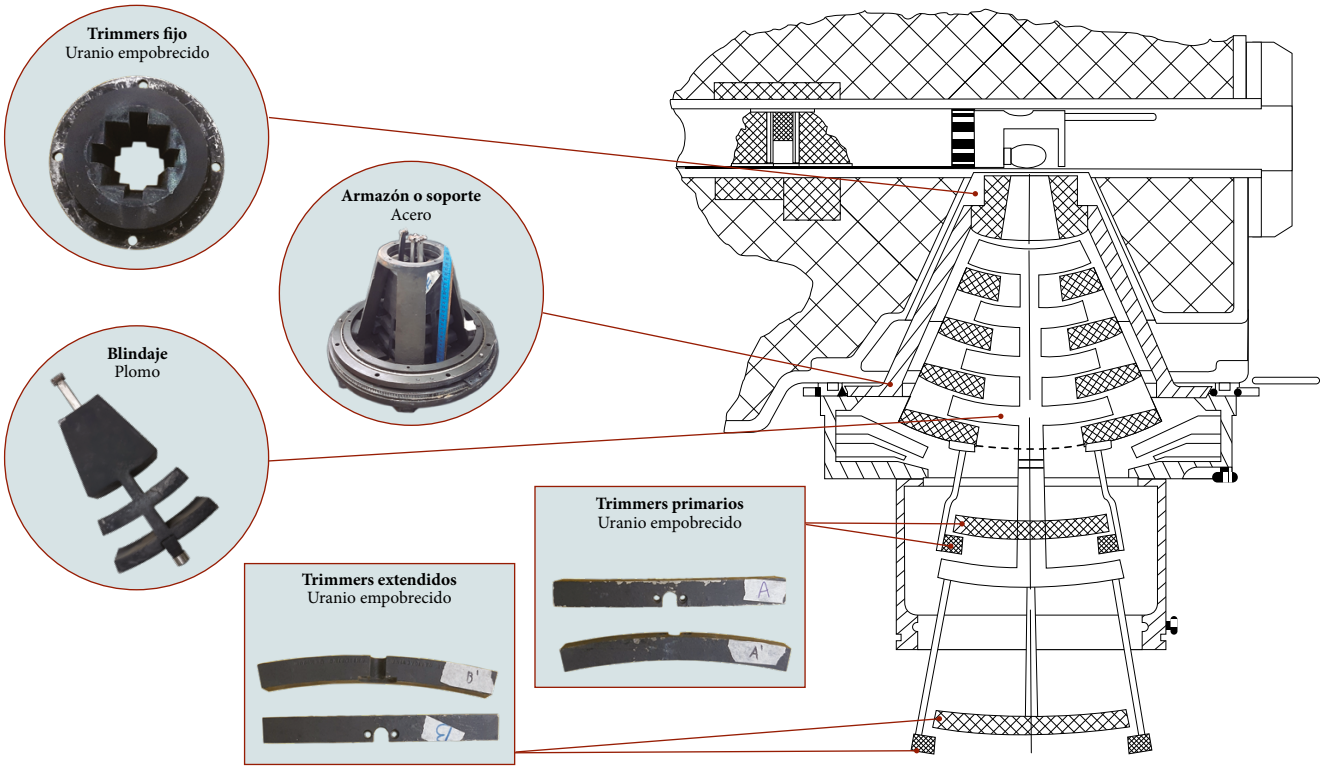


Figura 1. Partes del colimador

zal Theratron 780 serie 195; teniendo en cuenta los siguientes criterios: a) tasa de dosis más alta en contacto: 44,0 μSv/h; b) cantidad de este modelo en inventario en almacenamiento transitorio; c) facilidad de acceso a información de la unidad.

El contenido radiactivo, principalmente de uranio empobrecido, en este tipo de colimadores de acuerdo con el *Manual de operación Theratron 780* [4], se debe a cinco piezas: cuatro barras rectangulares (*trimmers*) (2 extendidos y 2 primarios) y una pieza con forma de cilindro hueco (*trimmer fijo*) [4]. Las partes se identificaron experimentalmente mediante análisis puntuales de FRX y espectrometría gamma (figura 5), en las zonas indicadas en la bibliografía (figura 1).

2.2 Procesamiento de desechos radiactivos

Se realizó una operación de segregación de piezas de forma controlada, con herramientas mecánicas como: destornilladores, pinzas metálicas, cortafríos, llaves Bristol, llaves de copa y pinzas de presión. Dicha operación se ejecutó sobre la superficie de una estiba plástica forrada en vinipel, con el fin de contener las piezas resultantes de las maniobras de segregación. Así mismo, se adoptaron todas las medidas de seguridad y protección radiológica establecidas en el *Manual de protección radiológica de la ICGDR*. Durante cada actividad de separación se realizó monitoreo antes y después para descartar contaminación superficial de personal, herramientas y superficies. Cada pieza separada fue monitoreada con medidores portátiles: uno de tasa de dosis marca Thermo modelo Minirad 1000, y uno de contaminación marca Thermo Scientific modelo Radeye B20.

2.3 Caracterización por espectrometría de rayos gamma y fluorescencia de rayos X

La caracterización se realizó con los equipos relacionados en la tabla 1. Se tomaron frotis húmedos, que se analizaron mediante espectrometría gamma de alta resolución en el espectrómetro marca Canberra modelo GC-2018, con el fin de determinar la presencia de radionúclidos. Por otro lado, para las piezas radiactivas se elaboraron secuencias de análisis en los espectrómetros Canberra y Baltic, en aras de identificar y cuantificar la cantidad de U-235 y U-238.

La espectrometría de alta resolución permite generar espectros donde se pueden diferenciar los radionúclidos por su energía de emisión gamma. Se procede con una calibración de energía por medio de una fuente con múltiples radionúclidos gamma, en intervalos de energía entre 59 keV y 1400 keV; posteriormente, una calibración por eficiencia con curvas de calibración previamente cargadas. Todo lo anterior tiene el propósito de identificar y cuantificar la cantidad de U-238 y U-235 presente en las piezas a través de picos característicos de energía emitidos por cada uno de los radionúclidos.

El montaje inicia con la ubicación de los equipos para la caracterización; se estimó la distancia (en centímetros) con la medición de la tasa de dosis (en μSv/h), para lo cual se asumió una geometría de fuente puntual, para luego tomar el fondo natural de radiación durante 18 h sin blindaje en el área de procesamiento de la ICGDR, el cual se restó posteriormente de las mediciones a las piezas separadas del colimador.

Finalmente, las piezas segregadas se clasificaron según sus características: material aprovechable, residuo peligroso o desecho radiactivo.

2.4 Gestión de desechos

El material aprovechable (aleaciones metálicas) se gestionó de forma convencional; este se depositó en los contenedores dispuestos para tal fin (figura 2). Por su parte, los residuos considerados peligrosos no radiactivos de aparatos eléctricos y electrónicos, como cables, circuitos, etc., generalmente pesados, fueron llevados al centro de acopio para residuos peligrosos de la sede CAN del SGC, a la espera de ser entregados al gestor encargado. En el caso del blindaje de plomo, al ser un excelente material que reduce la exposición a rayos gamma, este se conservó en la ICGDR para ser usado como blindaje en futuras operaciones. Por último, el material radiactivo se recibió como una nueva unidad de desechos radiactivos en la ICGDR, donde se registraron las tasas de dosis en contacto y a un metro (tabla 1); luego, se tomaron

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los equipos empleados

Equipo	Especificaciones	Software
Espectrómetro CANBERRA	HPGe coaxial, tipo P, eficiencia 20 %, Resolución 1,8 a 1,3 MeV.	Genie 2000
Espectrómetro BALTIC	HPGe coaxial, tipo P, eficiencia 10 %, Resolución 1,75 a 1,33 MeV.	SpectraLine
Equipo portátil de fluorescencia de rayos X	Tubo de rayos X, con ánodo de argón. Detector de Si-PIN	Niton Data Transfer NDT



Figura 2. Contenedores para material aprovechable

frotis húmedos que permitieron descartar la contaminación superficial de manera indirecta.

Se efectuó el procedimiento para descontaminación de superficies de la instalación y se tomaron muestras de material presente en las superficies del montaje de análisis, que previamente habían sido cubiertas con vinipel. Estas muestras, que consistieron en cáscaras de color negro que recubren el material aparentemente cerámico, presentaron tasas de dosis alrededor de 10 µSv/h y se analizaron en el espectrómetro gamma Canberra GC-2018.

Para corroborar que la masa reportada en la literatura coincidía con la hallada experimentalmente, se pesaron los cuatro *trimmers* extendidos, los primarios y el *trimmer* fijo.

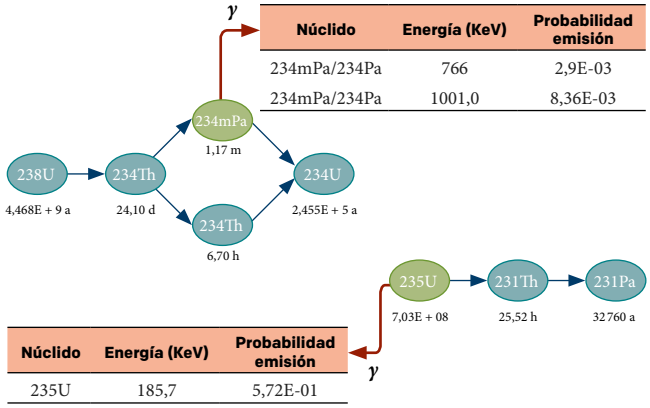
Una vez finalizada la caracterización física y radiológica, se realizó lectura con el equipo portátil de fluorescencia de rayos X (FRX, tipo pistola) por 90 segundos a cada pieza (figura 3) con lo que se obtuvo la composición en porcentaje del uranio y otros metales presentes en las piezas.

2.4.1 Caracterización de desechos radiactivos

Se analizan los espectros tomados en energías características de la línea de decaimiento del radionúclido uranio empobrecido, tomando el pico en la energía característica del protactinio 234 (Pa-234) en 1001 keV en el caso de del uranio 238 y el pico emitido en la energía de 185,7 keV para el uranio 235, como se muestra en la figura 4.



Figura 3. Caracterización por FRX



Núclido	Energía (KeV)	Probabilidad emisión
234mPa/234Pa	766	2,9E-03
234mPa/234Pa	1001,0	8,36E-03

Núclido	Energía (KeV)	Probabilidad emisión
235U	185,7	5,72E-01

Figura 4. Energías características de análisis para la determinación de U-238 y U-235

Tabla 2. Características físicas determinadas

Elemento	Tasa de dosis en contacto (μSv/h)	Dimensiones (cm)	masa (kg)
Trimmer primario A	20,0	25,5 × 2,5 × 2,8	10
Trimmer extendido A'	15,0	25,5 × 2,5 × 2,8	
Trimmer primario B	20,0	25,5 × 2,5 × 2,8	
Trimmer extendido B'	15,0	25,5 × 2,5 × 2,8	
Trimmer fijo	15,0	ext = 13,5, int = 4, h = 6,6	12

Con la información recolectada a través de la espectrometría gamma de alta resolución, se analizó la cantidad de U-235 y de U-238 presente en las piezas radiactivas identificadas, con el fin de determinar el porcentaje de enriquecimiento de estas piezas, que debido a su contenido fisionable son objeto de salvaguardia por la OIEA [5].

3. Resultados

Durante la segregación de piezas, se identificaron cuatro *trimmers* extendidos de 2,5 kg cada uno y un *trimmer* fijo de 12 kg, las cinco piezas son principalmente de óxidos de uranio empobrecido (principalmente U-238) que representan una actividad estimada de 160 MBq; las tasas de dosis en contacto, dimensiones y masas de los elementos con U-238 se resumen en la tabla 2.

El análisis de cada una de las piezas se llevó a cabo mediante espectrometría gamma de alta resolución, con el uso de los espectros generados en los equipos Canberra y Baltic Instruments, para los picos característicos mencionados anteriormente; así se corroboró la presencia de U-235 y de U-238. La figura 5 presenta el espectro ejemplo de análisis.

Siguiendo con el análisis espectrométrico, se estimó la proporción de actividad de cada pieza con respecto a la relación de U-238 y U-235, lo que arrojó como resultado, un rango de proporción de actividad entre 88,5 a 89,5 de U-238; es decir, un rango entre 11,5 y 10,5 en la aparición de U-235. La figura 6 presenta la gráfica de proporción respecto a cada pieza.

Paralelamente, se analiza el porcentaje de uranio presente en la estructura de las piezas mediante el equipo de FRX, donde se puede observar que el *trimmer* fijo es el que más porcentaje de uranio tiene con 41,49 %p/p, como lo muestra la tabla 3. Por otro lado, fue posible identificar elementos metálicos como plomo, cadmio, cromo.

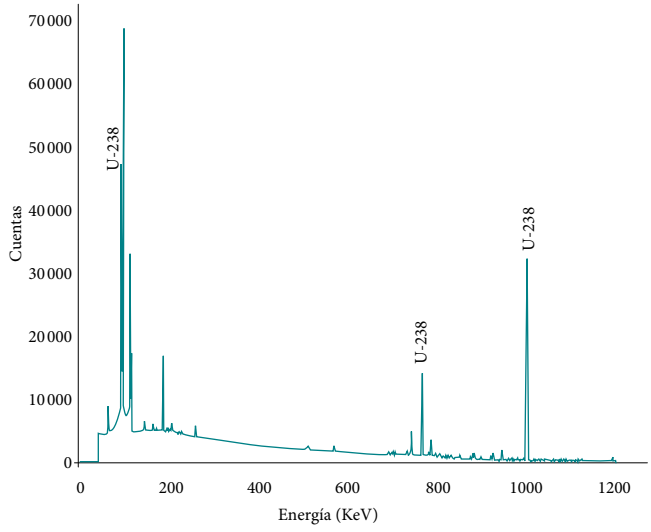


Figura 5. Espectro tomado al trimmer fijo

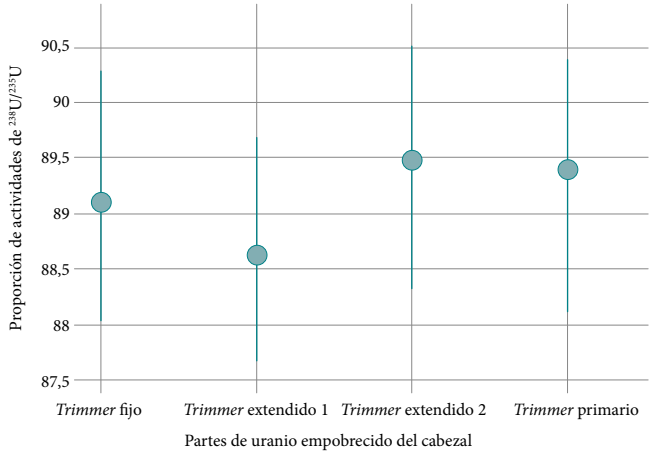


Figura 6. Proporción de actividad de U238/U235 en las piezas

Tabla 3. Porcentaje de uranio en las piezas por FRX

Pieza	Uranio %p/p
Trimmer fijo	41,49
Trimmers primarios	26,48
Trimmers extendidos	31,49

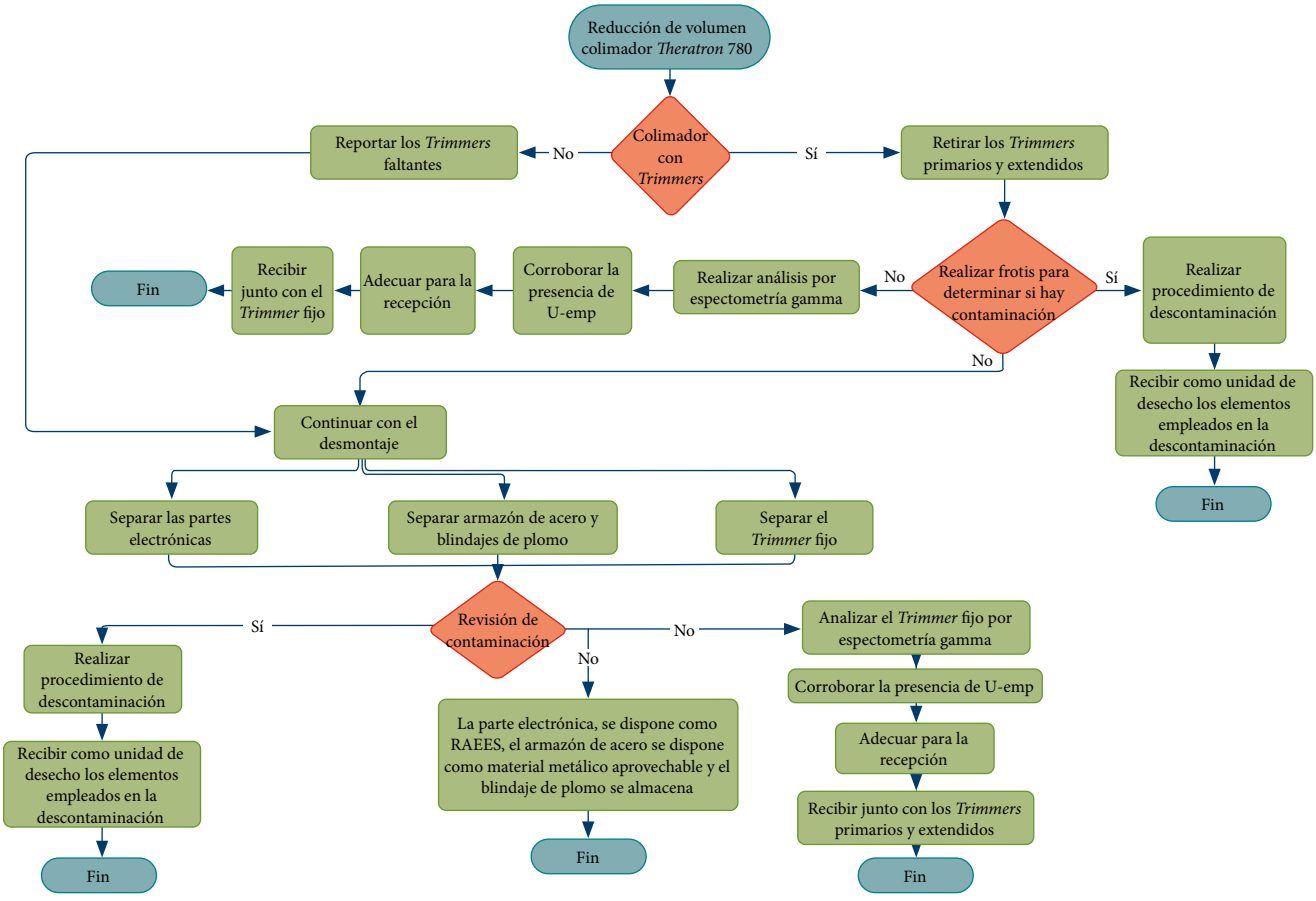


Figura 7. Protocolo de reducción de volumen

Por último, se compiló lo anteriormente descrito y las actividades realizadas con el propósito de establecer el protocolo de reducción de volumen para el colimador del cabezal Theratron 780 con serie 195. El diagrama del procedimiento resultante se muestra en la figura 7.

4. Conclusiones

Se consiguió la identificación de 5 piezas de uranio empobrecido (22 kg) presentes en el aparato colimador, mediante espectrometría gamma de alta resolución.

Con la segregación, se obtuvo una reducción de volumen aproximada de un 90 %.

Fue posible estimar la proporción de actividad entre el U-238 y el U-235 presente en las piezas donde se identificaron en un rango de 88,5 a 89,5.

Se confirmó que las piezas que contienen óxidos de uranio son el *trimmer* fijo, los *trimmers* primarios y los *trimmers* extendidos.

Lo presentado en este trabajo corresponde a resultados preliminares del proyecto de investigación de caracterización y acondicionamiento de los colimadores de los cabezales de teleterapia asociados al proyecto de cooperación internacional "Plan de consolidación de fuentes radiactivas de alta actividad".

En varios casos, se evidenció arrastre de material particulado; es preciso determinar los riesgos radiológicos asociados a la dispersión de material radiactivo.

5. Recomendaciones

Para un estudio composicional más detallado, deben efectuarse análisis a través de otras técnicas de caracterización. Se recomienda ampliar los análisis de los *trimmers* con técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) con el fin de revisar las aleaciones presentes en las piezas.

Se requiere una extensión de esta investigación para la reducción de volumen del resto de modelos de colimadores almacenados en el área de transitorio de la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos (ICGDR).

Referencias

[1] International Atomic Energy Agency, *Safeguards implementation guide for states with small quantities protocols services,* Series 22, Viena, 2013.

[2] D. Reilly, N. Ensslin, H. Smith *et al.*, *Passive nondestructive assay of nuclear materials,* Washington: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1991.

[3] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA*, Viena, 2007. [En línea]. Disponible en https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEASafetyGlossary2007/Glossary/SafetyGlossary_2007s.pdf

[4] AECL MEDICAL, *Operator's Manual THERATRON 780 Cobalt 60 teletherapy unit*, Springfield, 1983.

[5] OECD Nuclear Energy Agency e International Atomic Energy Agency, *Management of depleted Uranium*, París, 2001. [En línea]. Disponible en https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/3035-management-depleted-uranium.pdf