



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Importancia de la adecuación de un laboratorio de neutrones retardados en Colombia para la exploración de uranio y protección radiológica en su manipulación y análisis

Andrés Felipe Porras Ríos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Química

Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía

Bogotá, Colombia

2016

Importancia de la adecuación de un laboratorio de neutrones retardados en Colombia para la exploración de uranio y protección radiológica en su manipulación y análisis

Andrés Felipe Porras Ríos

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias - Química

Director:

Ing. Qco., M. Sc., Dr. Ing. José de Jesús Díaz Velásquez

Línea de Investigación:

Materiales y Energía

Grupo de Investigación:

Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía - LICE

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Química

Bogotá, Colombia

2016

Dedicatoria

Al Dios de poder, por su infinito amor y
paciencia.

¿Dónde estabas tú cuando yo fundaba la tierra?
Házmelo saber, si tienes inteligencia.

Job 38; 4

A la escuela que forma en valores de la Dra.
Maria Luisa Piraquive.

Agradecimientos

Al profesor José de Jesús Díaz por su dirección y excelente orientación de este trabajo.

Al Servicio Geológico Colombiano, especialmente a la coordinadora del Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas Mary Peña, por sus comentarios y disposición que ayudaron profundamente en la realización de este trabajo.

A mis todos mis compañeros de la universidad y del SGC por su acompañamiento en los años de duración de mi maestría.

A mis compañeros de la carrera por todos los agradables momentos que hicieron todas las cosas académicas mucho mas llevaderas.

A David Alonso y Julián Orozco por su apoyo y discusiones que contribuyeron significativamente en la elaboración de este trabajo.

A Andrés Cáceres por su apoyo en la adquisición de material bibliográfico para éste trabajo.

A mi amada esposa Idaly Bojacá, por ser ese instrumento de Dios para guiar y corregir mi camino e ir de mi mano hasta el últimos de nuestros días.

A mi amado hijo Juan Felipe, por ser ese combustible de amor que me levanta todas las mañanas a seguir adelante y hacer las cosas correctamente.

A toda mi familia, en especial a mis padres Juan Antonio Porras y Margarita Rios, por su incondicional apoyo para mi y mi familia.

A mi hermano Juan Camilo, mi cuñada Leidy Zapata y mi querida sobrina Isabella, por ser ese ejemplo a seguir de matrimonio y familia de Dios.

Al departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia por mi formación profesional.

Y a todas aquellas personas que Dios ha puesto en mi camino.

Resumen

Se realiza un estudio del uranio como recurso energético y un comparativo con otros combustibles y biomasa, además de recopilar el estado del arte de la exploración de uranio en el país desde las primeras reseñas con Ricardo Lleras Codazzi a principios del siglo XX hasta el último estudio realizado por el grupo de exploración de uranio del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Se muestran las diferentes técnicas para realizar la cuantificación de uranio en matrices geológicas y se expresa una teoría general de los neutrones retardados y su conteo para el cálculo de uranio total; asimismo se analiza la protección radiológica de la instalación por medio de simulación de neutrones y radiación γ del sistema de conteo para los trabajadores de la instalación para finalmente establecer y evaluar la importancia del funcionamiento del laboratorio de neutrones retardados para estimación de reservas de éste mineral estratégico para el país.

Palabras clave: Uranio, recurso energético, caracterización de uranio, neutrones retardados, exploración de minerales, simulación.

Abstract

a study of uranium as an energy source and a comparison with other fuels and biomass is made, addition to compiling the state of the art of uranium exploration in the country since the first reviews with Ricardo Lleras Codazzi early twentieth century to the latest study by the group of uranium exploration to the Colombian Geological Survey (CGS). This final work shows different techniques for quantification of uranium in geological and a general theory of the delayed neutron and its count for calculating total uranium is expressed; also the radiation protection of the facility is analyzed by γ and neutron radiation simulation of counting system for installation workers to finally establish and evaluate the importance of the functioning of the laboratory of Delayed Neutron Counting for estimate reserves for this strategic mineral to the country.

Keywords: Uranium, energy resource, uranium characterization, delayed neutrons, mineral exploration, simulation

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	1
1. Introducción	2
2. El Uranio como Recurso Energético	8
2.1. El Uranio Frente a Otros Combustibles y Biomasa	8
2.2. Uranio como Combustible Nuclear	13
2.2.1. Distribución y Extracción de Uranio en el Mundo	15
2.2.2. El Ciclo del Combustible Nuclear	18
2.3. Conclusiones	20
3. El uranio en Colombia: más de 100 años de exploración	22
3.1. Época anterior al IAN (1914 - 1965)	22
3.2. Época del IAN: 1965 - 1997	26
3.2.1. Estudios Realizados	27
3.2.2. Infraestructura	36
3.3. Época posterior al IAN: 1997 - 2016 y explotación actual	42
3.3.1. Exploración entre 1997 y 2016	42
3.3.2. Actualidad minera del uranio en Colombia	45

3.4. Conclusiones y recomendaciones	47
3.4.1. Conclusiones	47
3.4.2. Recomendación	48
4. Determinación de contenidos de uranio en matrices geológicas	49
4.1. Espectrometría γ	49
4.2. Análisis por Activación Neutrónica Instrumental	53
4.3. Fluorescencia de rayos X	55
4.4. Fluorimetría	55
4.5. Espectrofotometría UV-Vis	55
4.6. Gravimetría y volumetría	56
4.7. Conteo de Neutrones Retardados	56
4.7.1. Interacción de los neutrones con la materia	58
4.7.2. Sección eficaz	58
4.7.3. La fisión inducida del ^{235}U	60
4.7.4. El contador proporcional BF_3	63
4.7.5. Cuantificación analítica y error en la medida	66
4.8. El laboratorio de neutrones retardados del SGC	70
4.9. Conclusiones	72
5. La protección radiológica asociada con el conteo de neutrones retardados	73
5.1. Cálculos para radiación γ incidente	73
5.2. Cálculos Monte-Carlo para dosis de neutrones	76
5.3. Conclusión	79
6. Conclusiones y recomendaciones	80
6.1. Conclusiones	80
6.2. Recomendaciones	80
A. Anexo: Actividades calculadas para la categorización de la práctica del CNR	82
A.1. IAEA-312	82

A.2. CLB-1	82
A.3. NIST 950a	84
B. Anexo: Inputs MCNP y Geant4 para la simulación	85
B.1. Input MCNP	85
B.2. Input en Geant4	87
Bibliografía	90

Lista de Figuras

2-1. Discriminación de los tipos de consumo de energía por décadas y años.	11
2-2. Variación de los precios del petróleo desde los años 50 hasta 2013.	12
2-3. Precio internacional de uranio desde la década de los 50.	13
2-4. Países con mayor porcentaje de extracción de uranio.	18
2-5. El ciclo del combustible nuclear (adaptado por el autor).	19
3-1. Áreas favorables para la búsqueda de uranio - 1967.	28
3-2. Zonas de contrato de Enusa.	31
3-3. Localización de áreas contratadas por compañías extranjeras y el IAN.	34
3-4. Localización de los prospectos de uranio.	35
3-5. Reactor Nuclear IAN-R1.	37
3-6. Fluorímetro Galvanek-Morrison	39
3-7. Sistema de Conteo de Neutrones Retardados	40
4-1. Cadenas de desintegración del ^{238}U y ^{235}U	51
4-2. Espectro gamma característico del estándar RGU-1	53
4-3. Espectro gamma de una muestra irradiada.	54
4-4. Complejo formado por el tributilfosfato con el U (IV)	56
4-5. Rendimiento de los productos de fisión del ^{235}U	61
4-6. Niveles energéticos y de decaimiento del $^{87}_{36}\text{Kr}$	62
4-7. Corte transversal esquemático del contador proporcional BF_3	65
4-8. Intervalo de operación típico de un detector BF_3	65
4-9. Espectro de neutrones típico del contador BF_3	66
4-10. Contribución del Be y Li en el CNR.	70

4-11. Organigrama de ubicación del laboratorio en la DAN	71
5-1. Esquema de la simulación de una secuencia de eventos neutrónicos.	76
5-2. Verificación de geometría en GAMOS.	78
5-3. Resultados de la simulación.	79

Lista de Tablas

2-1. Contenidos calóricos de varios combustibles.	9
2-2. Accidentes humanos severos de miembros de la OECD	10
2-3. Reactores nucleares en operación Vs. Reactores en construcción.	15
2-4. Principales minerales de uranio de uso industrial.	16
3-1. Trabajos de exploración de uranio realizados entre 1953 y 1965	25
3-2. Principales empresas que realizaron exploraciones de uranio en Colombia . .	33
3-3. Muestras analizadas en el sistema CNR	40
3-4. Informes anuales realizados por el SGC entre 2008 y 2015.	44
3-5. Valores de las zanjas de la parte norte del proyecto Berlín.	46
3-6. Títulos mineros vigentes de exploración de uranio.	47
4-1. Isótopo radiactivo y su par radiogénico para datación	50
4-2. Emisores gamma del estándar RGU-1	52
4-3. Clasificación de los neutrones por su energía.	57
4-4. Abundancias isotópicas del helio, litio y boro	59
4-5. Modelo de los 6 grupos precursores de neutrones retardados	63
4-6. Modelo de los 8 grupos precursores de neutrones retardados.	64
4-7. Variaciones de conteo de neutrones frente a diferentes elementos.	69
5-1. Límites de A/D para clasificar prácticas radiactivas.	75
5-2. Categorización de los estándares irradiados.	75

1. Introducción

Los minerales son sustancias sólidas, naturales, de composición química definida, generalmente de origen inorgánico, pueden generar formas geométricas características [1] y tienen gran importancia por sus múltiples aplicaciones en los diversos campos de la actividad humana [2]. La industria moderna depende directa o indirectamente de los minerales para fabricar múltiples productos de la civilización moderna [3]; así, por ejemplo, de distintos tipos de cuarzo y silicatos, se produce el vidrio [4]; los nitratos y fosfatos se emplean como abono para la agricultura; ciertos materiales, como el yeso, se utilizan en la construcción y prácticamente todos los productos fabricados industrialmente contienen algún componente obtenido de los minerales [5].

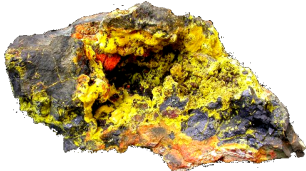
El uranio en sus formas minerales más importantes como la pechblenda, uranita y cofinita [6] que con las debidas transformaciones físicas como la trituración y molienda y químicas como la concentración y enriquecimiento se convierte en mineral de interés estratégico de orden mundial a mediano y largo plazo con una creciente demanda [7].

El uranio, del latín *Uranus*, es un mineral descubierto en 1770 por el químico alemán Martin Heinrich Klaproth [8] y nombrado así por el descubrimiento del planeta urano en 1761 por su amigo William Herschel [9]. Klaproth en su libro “Beiträge zur chemischen Kenntnis der Mineralkörper” [10] menciona:

“[Pechblenda] consiste en una sustancia peculiar, distinta, metálica. Por lo tanto sus ex - denominaciones, brea-blenda, mineral de brea-hierro, ya no son aplicables, y debe ser cambiado por otro nombre más apropiado. He elegido el de

urano, (uranio), como una especie de homenaje al descubrimiento astronómico del nuevo planeta Urano, cuyo descubrimiento sucedió en el mismo periodo del descubrimiento químico de este nuevo metal”.

Es un elemento de transición de número atómico 92, miembro de la serie de los actínidos, cuyo símbolo es U, su grupo es el 7 y período 7 de la tabla periódica y sus propiedades y características se muestran en el cuadro siguiente [11, 12].

Propiedades y características del uranio [11, 12]	
	Configuración electrónica: $[\text{Rn}]5f^4$
	masa atómica: 238,01 uma
	Densidad: $19,050 \text{ g m}^{-3}$
	Punto de fusión: $1405 \text{ }^\circ\text{C}$
Metal brillante, plateado, dúctil y ligeramente paramagnético.	
Isótopos naturales: ^{234}U (0,0054 %), ^{235}U (0,7254 %), ^{238}U (99,2742 %)	

El uranio se encuentra en la naturaleza como óxido con números de oxidación +4, +5 y +6, siendo el +4 y el +6 los más abundantes en la naturaleza [6], pero también se le puede encontrar como hidróxidos y sales.

A pesar que el uranio es un elemento escaso, su ocurrencia en la corteza terrestre es superior a la del bismuto, cadmio, mercurio y plata [13]; sin embargo, la relación entre la abundancia en la corteza terrestre y la probabilidad de descubrir yacimientos económicamente importantes para su explotación es menos ocurrente por la dispersión y baja concentración en que está presente [14].

En Colombia, las investigaciones de potencial de uranio empezaron en 1914 a través de la comisión científica nacional [15] a la cual se le encomendó las labores de cartografía geológica, exploración de recursos minerales y el estudio del subsuelo en el territorio nacional, apoyado por el laboratorio nacional de análisis e investigación, responsable de los análisis de

las propiedades de los recursos del subsuelo [16]. Los primeros indicios de presencia de uranio en el territorio colombiano los enuncia Ricardo Lleras Codazzi en su libro *Minerales de Colombia de 1927* [17]. A partir de ese año, las investigaciones se efectuaron apoyados por empresas extranjeras como Anaconda Cooper, que en 1945 realizó proyectos exploratorios de uranio para la industria militar y nuclear en el municipio de California en Santander [18, 19].

El antiguo Instituto de Asuntos Nucleares (IAN) con la participación de dos empresas privadas TOTAL-MINATOME (Francia) y ENUSA (España) en el informe “Posibilidades uraníferas en Colombia”, recopiló información de yacimientos de Uranio en el territorio colombiano [20] y a partir de ese informe, el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) presentó el documento técnico llamado “Manifestaciones uraníferas conocidas en Colombia” [21] que se convirtió en el primer compilado internacional de las manifestaciones uraníferas del país mostrando al mundo la posibilidad de realizar el aprovechamiento industrial de dicho mineral.

INGEOMINAS en 1967 realizó estudios radiométricos en más de setenta mil especímenes de rocas recolectados en Bogotá, Bucaramanga, Ibagué y Popayán [21], en los cuales se encontraron ciertas anomalías a partir de las consideraciones de geología regional colombiana y, atendiendo los conceptos internacionales que determinan las características más importantes en la exploración de uranio, seleccionó diferentes áreas basándose en fotogeología, accesibilidad topográfica o vial y trabajos de cartografía existentes [22].

Desde dicha época y hasta la actualidad [23] los trabajos de exploración uranífera del territorio nacional se basan únicamente en análisis mineralógico, radiológico en campo y de cuantificación con equipo portátil que sólo provee un aproximado (algunas veces alejado) de las concentraciones de radionúclidos identificados [24] en cuanto a posibilidad real de extracción. Este hecho hace necesario aplicar metodologías analíticas consistentes y de reconocimiento mundial, las cuales examinan con mayor detalle los contenidos elementales de un mineral, una de ellas es la técnica de Conteo de Neutrones Retardados que evalúa de manera

más efectiva los contenidos de uranio en cualquier matriz [25].

El Ministerio de Minas y Energía mediante la Resolución número 18-0102 del 30 de enero de 2012 [26] establece que el uranio y sus minerales asociados, derivados o concentrados son minerales estratégicos para realizar proyecciones de explotación custodiadas por la autoridad minera, razón por la cual es necesario conocer las reservas en cuanto a calidad y cantidad para integrar éstos minerales al crecimiento de la economía del país. De ésta manera, el grupo de recursos de minerales energéticos del Servicio Geológico Colombiano [27] se encarga de la exploración de Uranio para consolidar un mapa uranífero del territorio en colaboración con el grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas (GIANG) que cuenta con la técnica del conteo de neutrones retardados, para la cuantificación y determinación de estas reservas que el gobierno colombiano declaró como estratégicas [28].

Los estudios del potencial de uranio en una zona específica se basan en análisis geológicos de porcentajes comúnmente obtenidos de este elemento con relación a contenido total mineral [29] y las muestras naturales son heterogéneas en su composición inclusive en un mineral específico [30]. La metodología del Conteo de Neutrones Retardados y el adecuado manejo de las muestras irradiadas para su análisis e interpretación aumenta el grado de detalle del contenido de uranio de una muestra lo cual permite establecer con un margen menor de incertidumbre el potencial uranífero en una zona [31]. Esta metodología es una técnica de activación con neutrones térmicos provenientes de una fuente de alto flujo que generalmente es un reactor nuclear de investigación [32], en la que se producen neutrones emitidos por algunos productos de fisión del ^{235}U (llamados neutrones retardados) de la muestra [33]. Esta técnica no es destructiva, emplea para su análisis cantidades aproximadas a 1 gramo, el tiempo total de análisis es 2 minutos por muestra, tiene una sensibilidad de menos de 1 mg/kg y un rango de detección de 0,5 a 5000 mg/kg de ^{235}U , es independiente de los efectos de matriz y no requiere tratamiento químico previo al análisis [34].

Como las muestras que se analizan poseen la característica de fisionarse para producir neu-

trones detectables en el sistema de BF_3 , también pueden salir del sistema de detección [35] y causar daños en el cuerpo humano. Por lo cual es necesario tener el blindaje adecuado para la manipulación de estas muestras irradiadas [36]. Los mejores blindajes para neutrones son materiales sólidos ligeros altamente hidrogenados, debido a que disminuyen la energía cinética de los neutrones [37]. Se puede realizar una comparación en protección radiológica de las medidas de tasa de dosis en el laboratorio con una simulación Monte Carlo que consiste en construir un modelo matemático de un problema físico en cuestión y tomar muestras modelo para obtener una respuesta aproximada del problema [38]. El conjunto de eventos probabilísticos individuales que conforman un proceso se simulan en secuencia [39]. La herramienta más comúnmente utilizada para simular comportamientos de transporte de neutrones es el código Monte Carlo N-Particle (MCNP) que es un código de simulación mediante métodos de Monte Carlo del transporte de radiación para neutrones, fotones y electrones en una geometría definida por el usuario.

Por lo anterior, en esta monografía se presenta la discusión del uranio como combustible nuclear, los estudios realizados en el Instituto de Asuntos Nucleares y el actual laboratorio de neutrones retardados del Servicio Geológico Colombiano y su protección radiológica asociada con la manipulación de muestras radiactivas, dividida en seis capítulos:

- El primer capítulo comprende la introducción.
- En el segundo capítulo se muestra la importancia y las ventajas de la energía nuclear y los avances tecnológicos en su manipulación para la conversión en energía eléctrica y se realiza un análisis frente a otros tipos de combustibles.
- En el tercer capítulo se señalan los antecedentes relativos a la exploración de uranio en el territorio colombiano haciendo una extensa reseña bibliográfica desde inicios del siglo XX hasta los estudios reportados en 2015, así como la infraestructura usada para la cuantificación ya sea de campo o de laboratorio.
- El cuarto capítulo contiene las diferentes técnicas analíticas comúnmente usadas para la cuantificación de minerales de uranio en el laboratorio así como una recopilación

literaria de la teoría asociada con su cuantificación por medio del Conteo de Neutrones Retardados emitidos durante la fisión de su núcleo.

- En el quinto capítulo se realiza una aproximación teórica a la protección radiológica del sistema de detección y conteo de neutrones retardados de los laboratorios de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas del Servicio Geológico Colombiano para la prestación de su servicio a la comunidad.
- El sexto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones que surgen de éste trabajo.

2. El Uranio como Recurso Energético

El interés del hombre por la adquisición de formas de energía y su transformación, desde que se inventó la primera máquina que convertía la energía térmica en mecánica por James Watt [40], ha llevado al desarrollo industrial; razón por la cual todas las fuentes que puedan producir dicho tipo de energía es una parte muy importante de diversas ramas de la ciencia y la ingeniería. Una de las formas de producción de energía con marcado uso actual es la de tipo nuclear donde alrededor del 11 % del consumo mundial de energía proviene de centrales nucleares [41]. Asimismo, las exigencias energéticas de los países desarrollados y en vías del desarrollo han hecho que la energía nuclear se convierta, cada vez más, en una solución a dichas demandas [42].

2.1. El Uranio Frente a Otros Combustibles y Biomasa

El desarrollo de la humanidad cada día requiere mayores esfuerzos para aprovechar de una forma sostenible las diferentes fuentes de energía para su uso industrial que suplan la proveniente de los combustibles fósiles. La Tabla **2-1** muestra valores de energía liberados en varios combustibles, en los cuales se observa que la energía proveniente de la fisión inducida del uranio (energía nuclear) oscila entre los 500 y los 28000 GJ / kg de material [43].

En la Tabla **2-1** se puede apreciar que la energía de tipo nuclear, con respecto a los hidrocarburos es limpia debido a que no emite CO₂ y la energía producida por kilogramo de sustancia es aproximadamente de 2 a 5 órdenes de magnitud mayor que la producida por combustibles

Combustible	Valor de Energía	% Carbono	CO ₂
Hidrógeno	121,0 MJ * kg ⁻¹	0	0
Petróleo	42,0 - 44,0 MJ * kg ⁻¹	89	72 g * MJ ⁻¹
GLP	49,0 MJ * kg ⁻¹	81	59 g * MJ ⁻¹
Metanol	20,0 MJ * kg ⁻¹	37	–
Gas Natural	38,0 - 39,0 MJ * m ⁻³	76	51 g * MJ ⁻¹
Carbón Antracítico	>23,9 MJ * kg ⁻¹	–	–
Carbón Sub-bituminoso	17,4 - 23,9 MJ * kg ⁻¹	–	–
Carbón Lignítico	<14,4 MJ * kg ⁻¹	–	–
Madera Seca	16,0 MJ * kg ⁻¹	42	94 g * MJ ⁻¹
Reactor Nuclear de Agua en Ebullición	500 GJ * kg ⁻¹	0	0
Reactor Nuclear de Neutrones Rápidos	28000 GJ * kg ⁻¹	0	0

Tabla 2-1.: Contenidos calóricos de varios combustibles [43].

de origen fósil. Además, en relación con el hidrógeno, que también es una energía limpia, se observa que su valor energético está muy por debajo; razón por la cual, con la tecnología actual, la energía nuclear es y será una protagonista en el mercado energético mundial [44]. Sin embargo, esta energía nuclear, como todos los demás tipos de energía, tiene algunas desventajas entre las cuales se cuentan:

1. El costo de producción de una barra de combustible para una central nuclear es de 1600 USD y produce aproximadamente 360000 kW*h⁻¹ y para obtener 1 kg de uranio enriquecido se necesitan 8 kg de material de la mina procesado (torta amarilla) [45].
2. El costo de la infraestructura para el enriquecimiento del ²³⁵U oscila entre 1500 y 4100 millones de dólares [46].
3. El personal de operación de dichas centrales y los mecanismos de protección radiológica asociada con los altos niveles de radiación ionizante por ésta manipulación requieren nivel de conocimiento superior.

4. Las experiencias de las bombas atómicas en 1945, Chernobyl en 1986 y el accidente de Fukushima en Japón han demostrado el alto riesgo de las exposiciones de altas dosis de materiales radiactivos en el ser humano bajo un accidente en las centrales nucleares [47].

No obstante, se encuentra que los accidentes y el número de muertos asociados con los diferentes tipos de energía es menor al 0,05 % en 40 años contando el accidente de Chernobyl en 1986 [48] como se muestra en la Tabla **2-2**. De hecho, las 31 muertes reales en total son las producidas en éste accidente nuclear indicando que las muertes reales producto de accidentes nucleares son muy bajas con respecto a los hidrocarburos e hidráulica y que, algunas veces, por desconocimiento, se tiende a estigmatizar éste tipo de energía como mala y peligrosa para el ser humano.

Tipo de Energía	OECD		No OECD	
	Accidentes	Muertes Fatales	Accidentes	Muertes Fatales
Carbón	75	2259	1044	18017
Petróleo	165	3713	232	16505
Gas Natural	90	1043	45	1000
GLP	59	1905	46	2016
Hídrica	1	14	10	29924
Nuclear	0	0	1	31
Total	390	8934	1480	72324

Tabla 2-2.: Accidentes humanos severos (> 5 muertes) de los diferentes tipos de energía entre 1969 - 2000 para países miembros y no miembros de la OECD [48].

A lo largo de los años, desde la década de los setenta, la energía nuclear tomó un papel importante en el consumo de energía del planeta y es clave en la toma de decisiones políticas y geopolíticas sobre la construcción o desmantelamiento de una central nuclear. La figura

2-1 muestra la evolución del consumo (en toneladas métricas de carbón equivalente) con respecto al tiempo desde 1970 hasta 2012 [49], en la cual se observan varios comportamientos. El primero de ellos es que, innegablemente el consumo de energía a nivel mundial está en aumento y la dependencia de los combustibles convencionales es muy alta; y como cada año las reservas de éste tipo de materiales disminuye, el porcentaje de las formas de energía como la nuclear, hídrica y otros debe aumentar para satisfacer las crecientes necesidades energéticas globales.

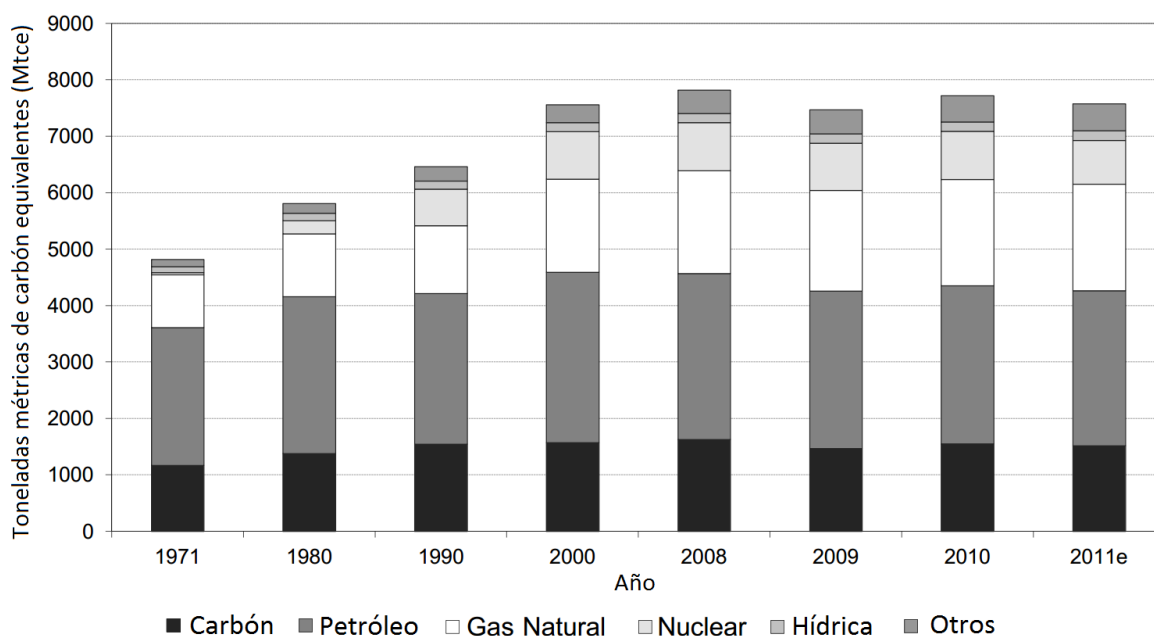


Figura 2-1.: Discriminación de los tipos de consumo de energía por décadas y años (modificada por el autor) [49].

La figura **2-2** muestra el comportamiento del precio del petróleo desde finales de los años cuarenta hasta el 2015 [50]. Puede apreciarse la dependencia del precio del crudo con respecto a varios acontecimiento de orden mundial como la guerra Irán / Iraq a finales de los setenta y la guerra del golfo a principios de la década de los noventa. En el pico de principio de los años setenta se observa un notable aumento en el precio debido a la guerra del Yom Kippur, de Israel contra Egipto y Siria [51], razón por la cual se aumenta el interés por la extracción de los minerales radiactivos para producción de energía nucleoelectrica y se tienen grandes

avances en la física e ingeniería asociadas con los reactores nucleares y las diferentes formas de energía para suplir el embargo de crudo producto de ésta guerra.

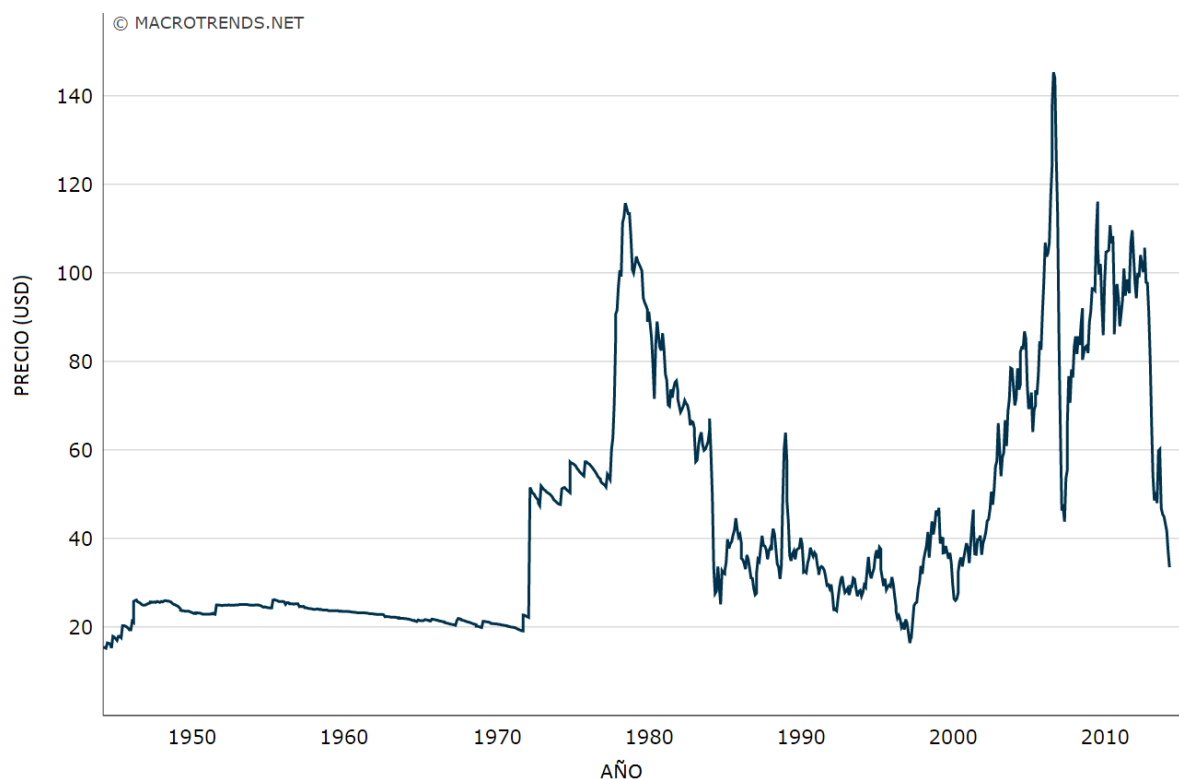


Figura 2-2.: Variación de los precios del petróleo desde los años 50 hasta 2015 [50].

La figura **2-3** muestra los precios de uranio en toda su historia [52, 53] desde 1950 hasta noviembre de 2015. Se observa un primer aumento, a casi 30 USD por libra, en los años sesenta debido a la aparición de la energía nuclear como forma de energía capaz de ser controlada por el hombre a nivel industrial. Al comienzo del siglo XXI, la preocupación por el calentamiento global aumenta y se plantea que la energía nuclear puede ser una alternativa de energía limpia para los retos del nuevo siglo y por esta razón en el 2004 se observa el aumento del valor de este mineral en el mundo que, sumado a la inundación de la mina Cigar Lake en Saskatchewan al oeste de Canadá [54] (la mayor fuente de uranio del mundo), y el aumento en recursos de los programas nucleares de china e india, crea consecuentemente una inestabilidad mundial por el suministro de este mineral, incrementando su precio hasta

alcanzar un máximo en junio de 2007 con un valor histórico de 133.22 USD [52] con lo cual se crean nuevas empresas y se aumenta la explotación en las regiones ya evaluadas [55]. Ésta nueva sobreproducción trae como consecuencia la caída rápida hasta un valor de 40 USD con algunos altibajos hasta 2015 dado que la industria nuclear tarda mucho tiempo en establecer una nueva instalación; además, muchas de las centrales nucleares disponen de contratos de suministro a largo plazo cubriendo sus necesidades de suministro [56]. Éste comportamiento económico se llamó “la burbuja de uranio del 2007” y es una de las burbujas más recordadas por su repentino auge y rápida caída [57].

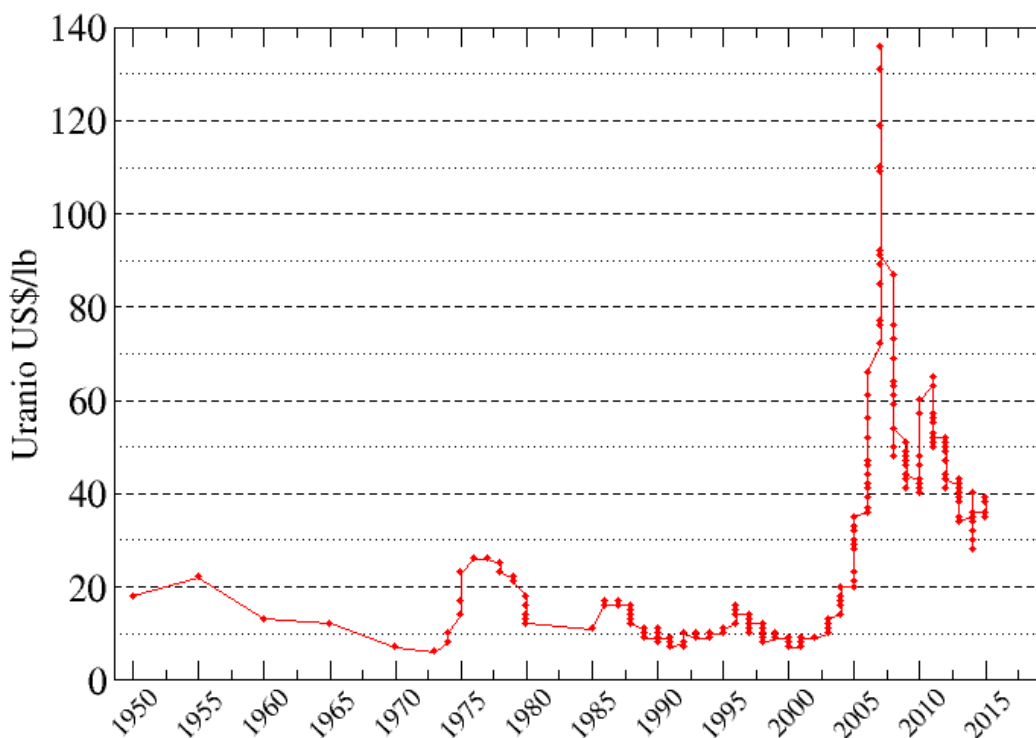


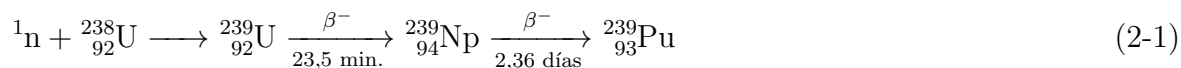
Figura 2-3.: Precio internacional de uranio desde la década de los 50 [52, 53]

2.2. Uranio como Combustible Nuclear

La energía nuclear es un componente esencial para cualquier estrategia de la humanidad en el orden de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles [58]. Si bien es cierto,

el ^{235}U es un recurso limitado debido a que por su relación isotópica en la naturaleza hace necesario realizar un enriquecimiento (aumento en la relación isotópica) con respecto al isótopo ^{238}U , previo de la concentración de los óxidos de uranio de un mineral extraído, existen tecnologías de mejoramiento y aprovechamiento energético para la conversión de ^{238}U que no es el combustible nuclear convencional, como las siguientes:

- Producción de ^{239}Pu : El ^{238}U es el isótopo del uranio más abundante que se encuentra en la naturaleza¹, no es físil (material que puede ser fisionado por neutrones de cualquier energía), ni tampoco fisionable. Sin embargo, es un elemento fértil que lo convierte en un elemento que después de absorber neutrones puede producir un material físil como lo podemos ver a continuación [13]:



Donde el ^{239}Pu es un material físil utilizado en muchas centrales nucleares.

- Producción de energía en reactores tipo CANDU: Los reactores tipo CANDU (CANa-da Deuterium Uranium) utilizan como combustible el uranio natural y son reactores denominados de agua pesada presurizada los cuales usan D_2O a altas presiones como refrigerante del sistema que actúa también como moderador (baja la energía cinética) de neutrones. La carga y descarga del combustible se realiza durante la operación de la central y los valores de potencia nominal neta promedio son de 600 megavatios [60].

La tabla **2-3** muestra el número de centrales nucleares en operación y las próximas a construirse (con corte a 29 de marzo de 2016). Se nota que las centrales en construcción corresponden a un 15 % de las centrales en operación indicando que la tendencia es hacia la energía nuclear; razón por la cual el interés por la adquisición de minerales con contenidos altos de uranio, forma de extracción y evaluación exacta de sus contenidos en lugares de fácil acceso es prioritario para las naciones que buscan disminuir la dependencia de combustibles fósiles [61, 62].

¹De hecho, el ^{238}U es el isótopo más pesado de la corteza terrestre [59]

Reactores Nucleares en operación	Centrales Nucleares en Construcción
442	66

Tabla 2-3.: Reactores nucleares en operación Vs. Reactores en construcción [62].

Las tecnologías de última generación para la conversión del ^{238}U a ^{239}Pu y del ^{232}Th a ^{233}U extienden el uso de la energía nuclear varios siglos más [63], que unido al mejoramiento de los sistemas de gestión de desechos del combustible gastado hacen de ésta energía la mejor alternativa ante las crisis económicas y ambientales generadas por el uso y comercialización de petróleo, gas y carbón [63].

2.2.1. Distribución y Extracción de Uranio en el Mundo

Las asociaciones minerales de uranio son muy variadas, tanto en composición principal (alto porcentaje) como a nivel de traza; razón por la cual existe gran variedad de minerales como se muestra en la Tabla 2-4 que son de interés industrial para la obtención de éste elemento, notándose que los minerales primarios son los de mayor interés debido al alto porcentaje de metal en el la matriz geológica.

Los métodos de extracción y concentración de los minerales de uranio en una mina dependen de su pureza y facilidad de acceso y se mencionan a continuación:

- Minería a cielo abierto: La minería a cielo abierto es una explotación que se realiza en superficie en la cual los equipos de explotación convencionales deben modificarse en su blindaje debido a que se está extrayendo mineral radiactivo. Para minerales con contenido mayor a 1 % de U_3O_8 debe tenerse mayor precaución por las altas dosis de radiación γ asociadas [68]. Durante el almacenamiento y conservación del producto extraído deben monitorearse las áreas mediante mediciones de radiación gamma y contenidos de radón.
- Minería subterránea: En éste tipo de minería deben realizarse los controles ocupacio-

Minerales	Descripción
Primarios	<p>Uraninita</p> <p>Es el más importante mineral de uranio. Se encuentra parcialmente oxidado y su composición real está entre UO_2 y U_3O_8. Posee impurezas de Th, Ra, Ce, Y, N, He, Ar. Se caracteriza por su brillo graso, gran peso específico y su forma cristalina [64].</p>
	<p>Pechblenda</p> <p>Es una variedad de la uraninita con una estructura maciza y botroidal, grisácea o negro aterciopelado, opaca con raya gris-negra y casi tan dura como un feldespatos [64].</p>
	<p>Euxenita</p> <p>Mineral oxidado de fórmula $(\text{Y,Ca,Ce,U,Th})(\text{Nb,Ti,Ta})_2\text{O}_6$. Minerales negros con raya parda oscura, frágil [65].</p>
Secundarios	<p>Carnotita</p> <p>$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Se caracteriza por su color amarillo, mate o terroso, estructura monoclinica, no fluoresce con la luz ultravioleta [66].</p>
	<p>Cofinita</p> <p>$\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$. Se encuentra en casi todos los tipos de yacimientos de uranio, forma complejos organometálicos con materia orgánica en el mineral [6].</p>
	<p>Autunita</p> <p>$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$. Estructura tetragonal, brillo vítreo perlado, varía de amarillo limón a verde pálido. Se encuentra principalmente en la zona de oxidación y meteorización de la uraninita u otros minerales de uranio [66].</p>
	<p>Torbernita y meta-torbernita</p> <p>$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8-12(\text{H}_2\text{O})$. Se forma como producto de la alteración de la uraninita así como de otros minerales, es de color verde manzana a esmeralda [67].</p>

Tabla 2-4.: Principales minerales de uranio de uso industrial.

nales de ingesta de uranio a través de determinaciones de uranio en la sangre, orina y cabello de los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE) [69]. Para evitar éstos problemas existen métodos modernos robóticos de minería subterránea que evitan la

entrada de los trabajadores [70].

- ISL: La Lixiviación *In - Situ* consiste en la extracción del uranio (solute) sobre un disolvente líquido formando una solución de lixiviación [70] en el depósito. Para éste caso la permeabilidad del solvente en el medio debe ser alta, limitando la metodología a areniscas y limos [71]. Se requiere alrededor del perímetro, por encima y por debajo del depósito, una extensa gama de pozos de monitoreo para identificar cualquier desviación de la solución de lixiviación.
- Lixiviación en pilas: La lixiviación en pilas o montones o de intercambio iónico es un nuevo proceso de extracción del mineral implementado en Estados Unidos [72] y utilizado para extraer uranio a partir de mineral proveniente de la minería a cielo abierto o subterránea en los molinos convencionales [72].

La figura 2-4 indica los países con mayor porcentaje de extracción de uranio, mostrando que el principal productor es Australia con el 31 % de la producción mundial que corresponde a 1673 mil toneladas de U_3O_8 , seguido de Kasajistán, Canadá, Federación Rusa y Nigeria. Cabe resaltar que Australia, concordante con la mayor producción, posee la mayor cantidad de reservas de uranio debido a que, en el período proterozoico, cuando se estaban formando los continentes, en ésta área se concentró la mayor parte de los minerales de uranio y que por diferentes procesos se redistribuyó por el mundo [73]. También puede notarse que Europa, con un gran número de centrales nucleares, no tiene producción significativa de uranio salvo Ucrania con el 2 %. En el lejano oriente, Corea y Japón, con buen uso de la energía nuclear, no cuenta con producción de uranio al igual que la India. África y América produce cada uno el 18 % del uranio mundial y en Colombia se cuenta con unas reservas interesantes de alrededor de 217 mil toneladas de U, asociados principalmente con roca fosfórica (Caldas, Santander, Norte de Santander y Cundinamarca) y 7655 toneladas de U en minerales que contienen un 0,11 % de U_3O_8 (0.09 % U) del Proyecto Berlín, el cual se explicará en el capítulo 3 [74].



Figura 2-4.: Países con mayor porcentaje de extracción de uranio [73].

2.2.2. El Ciclo del Combustible Nuclear

El ciclo del combustible nuclear es la forma de explicar la utilización de uranio para producción de energía y comprende la preparación del mineral desde la extracción en campo hasta su disposición final como se muestra esquemáticamente en la Figura 2-5. Las diferentes etapas que describen este ciclo se muestran a continuación:

1. **Minería y molienda.** Es la primera etapa del proceso. No se contempla como tal en el ciclo porque no se llega a ésta desde otro procedimiento, simplemente es un paso que provee la materia prima y comprende las diferentes formas de minería y extracción que se vieron anteriormente.
2. **Concentración.** Esta etapa incluye todos los pasos necesarios para la obtención del gas hexafluoruro de uranio (VI) para el caso de utilización de combustible enriquecido y dióxido de uranio para su uso en los reactores tipo CANDU [75]. Al mineral proveniente de la mina se le realiza una reducción de tamaño hasta conseguir partículas de 20 mm de dimensión principal, se filtra con agua, se hace digestión con ácido sulfúrico para

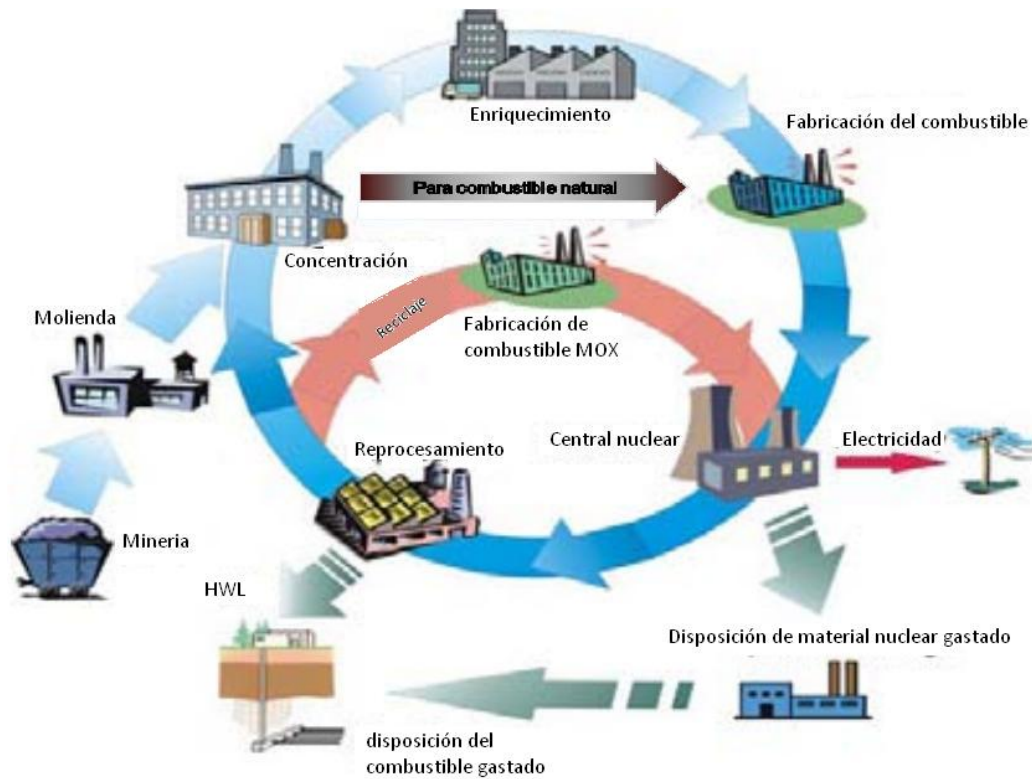


Figura 2-5.: El ciclo del combustible nuclear (adaptado por el autor) [75].

separar el óxido de uranio del mineral, se filtra y se extrae, se centrifuga y se calienta a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [76] obteniéndose el concentrado de color amarillo o “torta amarilla” con una concentración del 99 % de U_3O_8 . Este concentrado se purifica y se hace reaccionar formando el hexafluoruro de uranio que posee el 0,7 % de ^{235}U .

3. **Enriquecimiento.** Es la etapa de la concentración del isótopo ^{235}U con respecto al ^{238}U que está presente en el UF_6 . El gas se centrifuga a altas velocidades dentro de una cámara de enriquecimiento consiguiendo que se separe el isótopo ^{235}U del ^{238}U en el interior de la cámara [76]. El uranio empobrecido, ^{238}U , se usa para elaborar puntas de municiones capaces de atravesar blindajes de plomo debido a su alta densidad [77].
4. **Fabricación del combustible.** El gas enriquecido se transforma en óxido de uranio y se prensa en forma de pastillas. Cada pastilla, generalmente de 2 cm de alto por 1,5 cm de diámetro, genera una energía equivalente a 810 kg de carbón, 565 L de petróleo o 480 m^3 de gas [75]. Éstas pastillas se encapsulan en varillas de acero inoxidable llamadas

zircaloy y son las que producen energía en las centrales nucleares [78].

5. **Centrales nucleares y generación de energía eléctrica.** Una vez el combustible se carga en el reactor nuclear, se produce la fisión inducida del ^{235}U generando neutrones que calientan el agua que está en el medio, produciendo vapor a alta presión. La energía del vapor de agua se convierte en electricidad en una turbina de vapor conectada a un generador [79]. La descarga y reemplazo del combustible gastado se realiza una vez al año retirando aproximadamente del 3% al 25% [80].
6. **Reprocesamiento.** El reprocesamiento es la reutilización del uranio y plutonio no gastado del combustible de desecho [81]. El combustible gastado contiene, en promedio, uranio al 3%, plutonio al 1% y desechos radiactivos del 96%. El uranio recuperado puede devolverse a la planta de concentración para producción de UF_6 y, mezclado con el plutonio, puede utilizarse para fabricar combustible de óxido mixto (MOX) [82].
7. **Disposición final.** El combustible nuclear gastado puede eliminarse de manera segura bajo tierra en formaciones de granito. Los residuos se embalan en contenedores de plomo y se entierran a gran profundidad en formaciones geológicas especialmente escogidas por su geoquímica y estabilidad favorables sin fallas geológicas activas. Estos depósitos deben tener suficiente estabilidad por cientos de millones de años, tiempo suficiente para que el residuo deje de ser radiactivo eliminando el riesgo para la salud de las personas y el ambiente [83, 75].

2.3. Conclusiones

1. Los avances tecnológicos permiten el aprovechamiento de todo el uranio proveniente de ámbitos geológicos que poseen ésta ocurrencia incrementando la generación de energía por varios siglos más que si sólo se usara el combustible convencional.
2. El riesgo de incidente o accidente para el ser humano o el medio ambiente ha disminuido considerablemente a tal punto de que debe considerarse a la energía nuclear como segura y confiable para abastecer las necesidades energéticas del presente siglo

y venideros por lo aprendido de los accidentes nucleares pasados pasando de la fobia nuclear a la nucleofilia.

3. El uranio en Colombia: más de 100 años de exploración

En Colombia se han hecho grandes esfuerzos por identificar las reservas de uranio en todo el territorio, y se menciona la existencia de dicho elemento desde hace más de 100 años [84]. Para enmarcar la historia de prospección de éste mineral en Colombia, el presente capítulo se divide en 3 partes estratégicas e importantes a lo largo del centenario: época pre IAN, época IAN, época post IAN, entendiendo a IAN como el extinto Instituto de Asuntos Nucleares y todos los nombres anteriores o posteriores que tuvo hasta su liquidación tales como ICAN (Instituto Colombiano de Asuntos Nucleares) e INEA (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas).

3.1. Época anterior al IAN (1914 - 1965)

Desde principios del siglo XX hasta la aparición de una entidad gubernamental en el país encargada de realizar la localización del uranio [85], las exploraciones en Colombia se caracterizaron por tener un interés más geológico que químico e industrial; por ésta razón los estudios se centraron en la escuela de geología de la Universidad Nacional de Colombia [86, 87, 88] y la Comisión Científica Nacional [89].

Ricardo Lleras Codazzi en su libro “Lecciones de petrografía” de 1914 [90] al mencionar la pegmatita de Arboledas del departamento de Norte de Santander enuncia lo siguiente:

“Pegmatita de Arboledas, Santander - Roca de grandes elementos compuesta

de ortoclasa con grandes cristales maclados conforme a las leyes de Braveno y Carlsbud; cuarzo de color violeta pálido en venas; láminas de mica diseminadas en el feldespato; como elementos accidentales figuran la turmalina, el granate y la pechblenda. Esta roca está en el contacto del granito con el gneiss.”

Éste párrafo se convierte en el primer indicio oficial de existencia de uranio en el territorio colombiano aunque existe un informe del OIEA [91] el cual indica que en 1909 Lleras Codazzi ya mostraba la presencia de uranio en Norte de Santander en su libro “Mineralizadores y minerales metálicos de Colombia” (cita del libro de 1909); sin embargo, al revisar este texto no se encuentra mención alguna al uranio, por lo cual, no puede considerarse como primera referencia oficial.

El mismo investigador en el libro “Notas Mineralógicas y petrográficas” [92] enuncia la existencia de uranio como carbonato cuando analizó la ocurrencia de algunos minerales pseudomorfos en un mismo estado genético de una formación cristalina de Arboledas - Norte de Santander y realiza una paragénesis de los minerales de Colombia en la cual localiza la pechblenda en las regiones de Cucutilla, Bochalema y Arboledas (Norte de Santander).

En 1926 en otro de sus libros titulado “Notas geológicas y geográficas” [93] enfatiza la posibilidad de existencia de uranio en el valle de Cucutilla, en la cual se acentúa una formación compuesta de granito, gneiss y pegmatita donde se encuentran masas dispersas de pechblenda. El autor enfatiza que la zona posee bastante poder radiactivo pero en muy poca cantidad apreciable para una explotación industrial.

Finalmente, en uno de sus últimos libros “Los minerales de Colombia” [94], Lleras Codazzi centra su atención en el uranio convirtiéndose en el primer compilado cualitativo del potencial minero en Colombia hasta 1927. En este libro se especifican los minerales presentes en determinadas zonas del país, como por ejemplo: sal gema, diamante, circón, ágata, ópalo, cromo, hierro, cobre, carbón, oro, platino, entre otros. Acerca del uranio se menciona:

“URANIO

Los principales minerales de uranio son:

PECBLENDA O URANITA, U_8O_4 . Cristaliza en el sistema monomérico pero se presenta con más frecuencia en masas compactas o en granos. Con el bórax da perla amarilla a llama oxidante; verde, a la llama reductora. Soluble en el ácido nítrico.

OCRE DE URANIO, U_2O_3 . Se encuentra en masas pulverulentas de color amarillo.

URANITA. Comprende dos especies a saber:

CALCOURANITA. $(Cu^{0+}2U_2C_3)Ph_2O_3 + 8H_2O$.

AUTUNITA. $Ca^{0+}3U_8O_3)Ph_3O_6 + 8H_2O$.

La primera de estas especies cristaliza en el sistema dimérico, y suele presentarse en láminas exfoliables, por lo cual se le ha dado nombre de *mica de uranio*; (...). Funde en una masa negra y colora la llama en verde.

La segunda especie, *autunita*, cristaliza en formas del sistema trimérico, pero muy parecidas a las de la calcouranita. (...). Sus reacciones son semejantes a las de la calcouranita pero no de las reacciones del cobre.

Estas especies se encuentran en el Norte de Santander (Provincia de Pamplona y región de Baja y Vetas). La pecblenda de la serranía que se extiende entre Cucutilla y Bochalema, frente a Arboledas, contiene una proporción apreciable de plomo y señales de bismuto. La roca donde se ha encontrado este mineral es una pegmatita de grandes elementos.

Al doctor Luis Eduardo Villar se le debe el hallazgo de estos minerales en las localidades mencionadas. ” [94]

A pesar de que Lleras Codazzi menciona a Luis Villar acerca del hallazgo de uranio en Bochalema, la Baja y Vetas, no se encuentra una referencia bibliográfica de Villar para mencionarla. Los cuatro libros mencionados de Lleras Codazzi conforman los primeros estudios e indicios de ubicación de uranio en Colombia ya sea para su exploración y estudio, como para la explotación de este elemento.

Después de los estudios de Lleras Codazzi no se encuentran referencias e investigaciones para el período comprendido entre 1928 y 1953, lo que indica que la investigación en la

búsqueda de uranio en el país estuvo estancada por 25 años y sólo se reanudó su interés en 1953 con el auge mundial de la energía nuclear en parte proporcionado por los desarrollos producidos como consecuencia de la bomba atómica utilizada en la segunda guerra mundial y la posibilidad de uso pacífico de la energía nuclear [89]. La tabla **3-1** muestra los estudios efectuados entre 1953 y 1965.

Nombre	Autor	Institución	Año
Reconocimiento de yacimientos de uranio en la región de La Baja, municipio de California, Santander	Jesús Antonio Bueno Ochoa	Instituto geológico Nacional	1953
Geología, petrografía y geoquímica para la prospección de uranio al suroeste del municipio de Páez, Cauca	Ana Elena Concha	Universidad Nacional de Colombia	1955
Uranio en la región de La Baja municipio de California (Santander) - mapa de localización de los yacimientos	Grupo de trabajo	Ingeominas	1955
Yacimientos de uranio y otros metales en la región de La Baja, municipio de California, departamento de Santander	Jesús Antonio Bueno Ochoa	Ingeominas	1955
Informe sobre plantas de beneficio de minerales de uranio y observaciones sobre el particular de los minerales de California Santander	Jesús Antonio Bueno Ochoa	Ingeominas	1956
Comparación de métodos de análisis de materiales de uranio y su aplicación a minerales de Colombia	Lilia Carrillo Pardo	Universidad Nacional de Colombia	1962

Tabla 3-1.: Trabajos de exploración de uranio realizados entre 1953 y 1965

El trabajo de Bueno [89] muestra una descripción de los yacimientos uraníferos en el filón

de San Celestino, las Ánimas, San Cristóbal y la región de San Antonio, y se deduce que son depósitos relacionados con rocas pegmatíticas en las cuales se encuentran la uraninita, fosfuranilita, bequerelita y autunita; además, encontró asociaciones de oro, plata cobre y zinc lo cual confirma en su informe “Yacimientos de uranio y otros metales en la región de La Baja, municipio de California, departamento de Santander” de 1955 [95]. Este mismo autor en 1956 en su trabajo “Informe sobre plantas de beneficio de minerales de uranio y observaciones sobre el particular de los minerales de California” [96] muestra una propuesta para la extracción de uranio en California, la cual se compone de trituración y molienda, lixiviación, separación de la solución uranífera, recuperación del uranio de la solución de lixiviación para producir torta amarilla.

En este período se marca un hecho importante en la localización de uranio en el territorio colombiano como lo menciona Ochoa [95] por cuanto aparecen nuevas zonas de presencia de este mineral como Páez - Cauca, La Baja y California - Santander además de las ya conocidas en Norte de Santander; así como las posibilidades de explotación del mineral en California. Las investigaciones e informes de ingeominas, como los trabajos realizados por la Universidad Nacional de Colombia, dan cuenta de la presencia de mineral de uranio con asociaciones de otros metales de interés industrial indicando que la explotación de éstos recursos podría ser rentable [97], específicamente en los municipios de California (Santander) y Bochalema (N. de Santander).

3.2. Época del IAN: 1965 - 1997

El Instituto de Asuntos Nucleares fue un establecimiento público de orden nacional creado mediante decreto legislativo No. 2345 del 29 de agosto de 1959 [98], con tres funciones específicas:

1. La elaboración y desarrollo de los programas encaminados al estudio de la energía atómica y nuclear.
2. El fomento y aplicación de dicha energía y su aprovechamiento para fines pacíficos y

3. El cumplimiento de los acuerdos internacionales sobre la materia.

El artículo 10 de este decreto establece [98]:

ART. 10°. Inicialmente el instituto integrará una comisión científica encargada de estudiar las posibilidades, las necesidades y los recursos del país en materia de energía atómica o nuclear, y de presentar a la Junta de Directores un programa de trabajos, en armonía con estos estudios y lo dispuesto en el artículo 1o. de este Decreto. De acuerdo con dicho programa se hará la organización técnica y se nombrará el personal correspondiente a ella.

Para el cumplimiento de lo lo aquí dispuesto, el instituto solicitará la ayuda internacional del caso, y además podrá contratar los servicios de expertos nacionales o extranjeros. Los contratos que al efecto celebre requieren, para su validez, del previo concepto favorable del Consejo Nacional de la Política económica y planeación.

Desde los inicios del IAN se crea el grupo de materias primas, el cual tiene a su cargo proveer la información para la comisión científica (indicada en el artículo 10) de todos los yacimientos de minerales de uranio para establecer las posibilidades de explotación [99].

3.2.1. Estudios Realizados

El grupo de materias primas del IAN en el año 1967 [99] realizó un mapa para establecer las zonas de interés de exploración de uranio como se muestra en la figura **3-1**. Teniendo en cuenta la geología nacional y los conceptos previos al IAN favorables a la existencia de uranio se seleccionan tres áreas estratégicas para la búsqueda del mineral basándose en accesibilidad vial y conflictos guerrilleros en la zona.

El grupo de materias primas del programa técnico científico del IAN obtuvo muy buenos resultados a pesar de las dificultades presupuestales y de personal; resultados que fueron confirmados por expertos del Organismo Internacional de Energía Atómica y del comisariato de Energía Atómica de Francia [99].

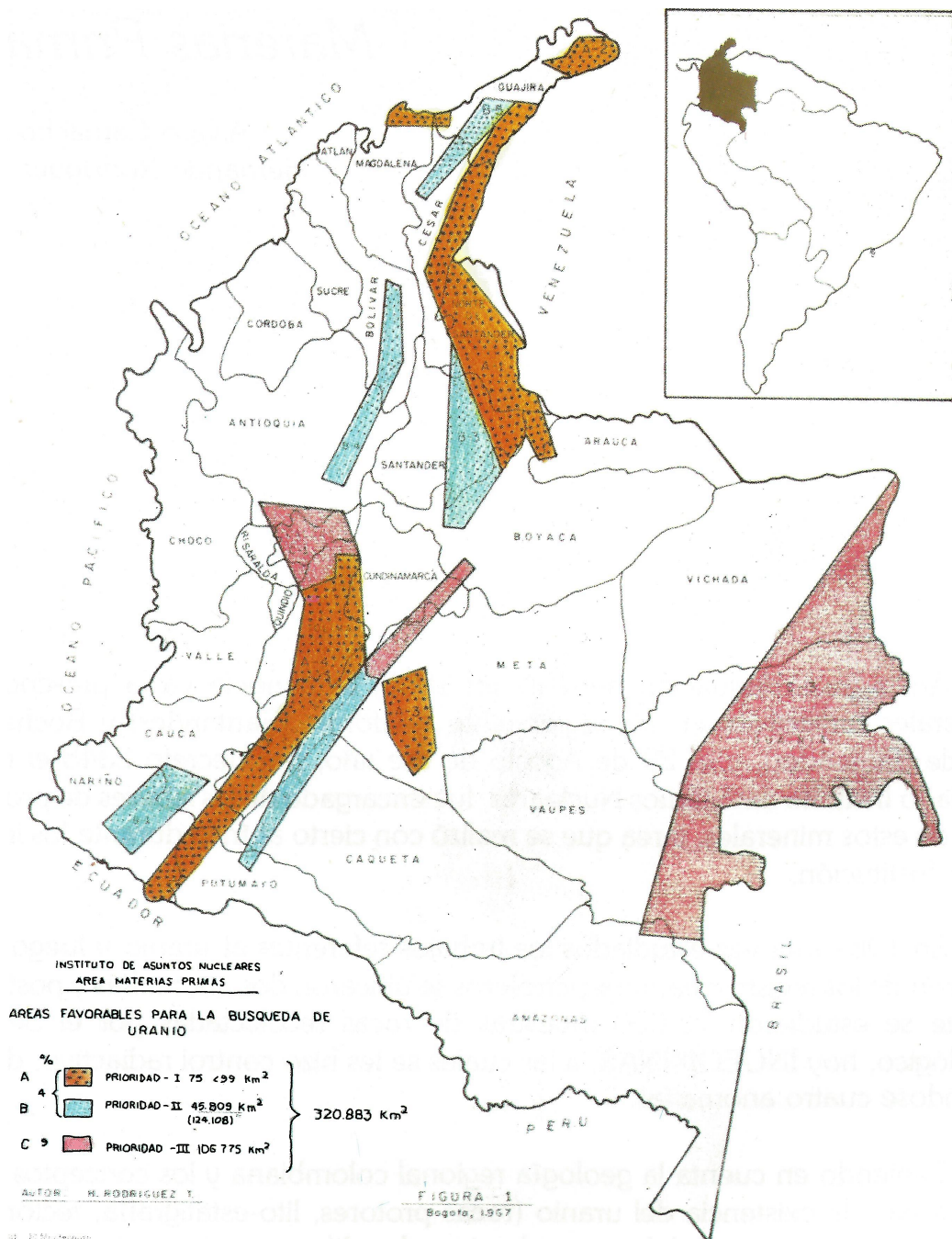


Figura 3-1.: Áreas favorables para la búsqueda de uranio - 1967 [99]

El IAN estableció convenios internacionales con diferentes empresas de orden nacional e internacional para realizar el mapa radiométrico del país [100] y contrató otros estudios, los

cuales fueron:

- **Urangesellschaft:** empresa de alemana que firmó convenio para la exploración de uranio entre 1974 y 1976 y seleccionó las siguientes áreas para estudios [84, 99, 101]: Zona La Guajira en la cual concluyó que las anomalías encontradas no hacen pertinente trabajos posteriores; en el macizo de Santa Marta no indicó algún potencial uranífero; en la zona de Santander se centraron en la Playa y Zapatoca, en ésta última, se comprobó la presencia de una mineralización uranífera en la parte superior de la formación Girón de areniscas de tipo gris - marrón; se sabe que realizó trabajos en la Serranía de San Lucas y parte de la cordillera oriental de Colombia, pero esos trabajos desaparecieron. Ésta empresa entregó un total de 6 informes de los cuales se recuperaron 5.
- **TOTAL-MINATOME - IAN-COLURANIO:** La empresa francesa Total empezó un programa de exploración en Colombia con un estudio bibliográfico a comienzos del año 1975 y a mitad de año ya estaba realizando trabajo en campo el cual duró un año, posterior a ello realizaron un contrato de asociación con el IAN que se firmó en Diciembre de 1976. El siguiente año Total cedió su contrato a Minatome Ltda. Finalmente el IAN en Noviembre de 1979 cede su parte de la asociación a la Compañía Colombiana del Uranio S.A. (Coluranio). La asociación [84, 99, 102] realizó trabajos en un área de 156.000 km² y trabajó principalmente en las siguientes regiones: Alta Guajira donde no encontraron anomalías radiométricas; Macizo de Santander y Sierra de los Cobardes trabajaron principalmente en la región de La Playa, en el Municipio de Ocaña (Nte. de Santander); Cordillera oriental en el Macizo Quetame y Garzón encontraron uranio en concentraciones de los 6000 mg/kg; en el valle alto del Magdalena encontraron concentraciones de uranio de los 4700 mg/kg en la formación Gualanday - La Cira y finalmente la zona del Macizo de Antioquia en la cual encontraron anomalías débiles y una mineralización importante de esquistos negros ubicada en la vereda Berlín del municipio de Samaná (Caldas). Éste convenio generó 256 informes de los cuales menos del 10 % fueron recuperados.
- **ENUSA:** ENUSA COLOMBIANA fué la sucursal en Colombia de la empresa nacional

de uranio S.A de España, dedicada a la exploración y explotación de minerales radiactivos. ENUSA firmó dos contratos de asociación con el Instituto de Asuntos Nucleares para la exploración y explotación de yacimientos minerales radiactivos en Colombia [99, 103, 104, 105]. El primer contrato se firmó en Julio de 1977 y trató la exploración en 3 áreas llamadas “Villavicencio”, “Guaduas” y “Bucaramanga”, las cuales totalizaban una superficie aproximada de 60000 km^2 . El segundo contrato se firmó en 1978, y tenía como objetivos la exploración y eventual **explotación** de yacimientos uraníferos en dos áreas de la amazonía, denominadas “Guainía” y “Vaupés”; pero decidieron suspender sus actividades en 1980. Enusa realizó exploración en 6 departamentos Guainía, Vaupés, Santander, Norte de Santander, Boyacá y Cundinamarca. La figura **3-2** muestra las zonas de exploración de la empresa.

En Ocaña se planteó la existencia de asociaciones de uranio y torio en forma de diques básicos, neises precámbricos y diques pegmatíticos con 2 asociaciones minerales de Mo-Ni-Co y tierras raras del período jurásico. ENUSA entregó al IAN un total de 83 informes de exploración de los cuales solo se rescatan 8.

- PNUD - IAN - OIEA: El IAN a través del Departamento Nacional de Planeación solicitó en 1977 la asistencia técnica del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para un proyecto de “Exploración de minerales radiactivos en tres áreas de Colombia” que se llamó proyecto COL/76/031 [102] iniciando trabajos a finales de 1978 y terminando en diciembre de 1982. Éste contrato centró sus estudios en tres áreas: Serranía de Abibe y San Jerónimo que, según el Experto del OIEA Marcus Tauchid, el potencial del área es mínimo para depósitos uraníferos; Serranía de San Lucas, se reconoció escasez en anomalías radiométricas en la zona; y Zapatoaca en la formación Girón donde se reconoció la existencia de esquistos negros con altos contenidos de uranio pero recomienda realizar un informe más detallado acerca de la zona debido a que los resultados son generales y como conclusión general resalta que el país debe “concentrarse en un examen crítico y sistemático de toda la valiosa recolección de datos acumulados por las compañías extranjeras y seleccionar áreas de interés prioritario para exploración en detalle” [102].

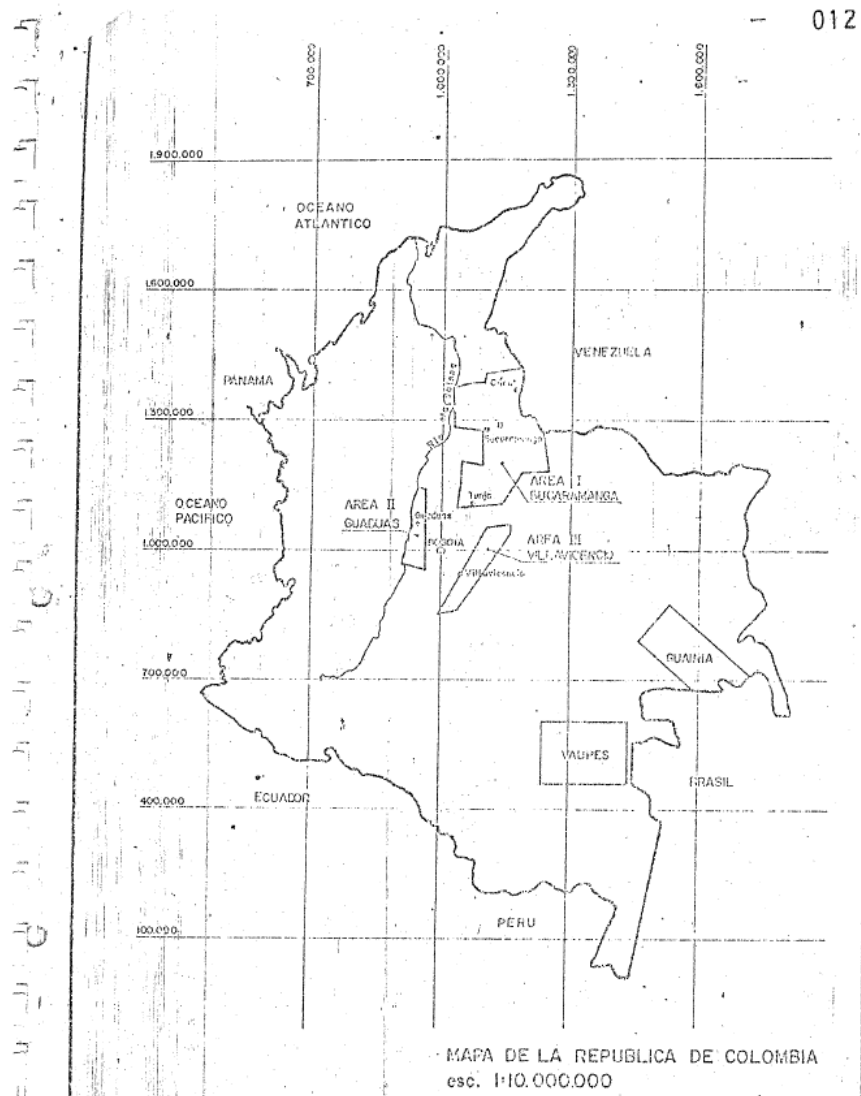


Figura 3-2.: Zonas de contrato de Enusa [104].

- PNMC: La empresa Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation de Japón entre 1977-1980 firmó un contrato [106] cuyos objetivos fueron: Estudiar y Observar yacimientos de uranio y áreas con radiactividades anormales; investigar las situaciones geológicas de las áreas donde hayan posibilidades de yacer los yacimientos radiactivos; estudiar acerca del estado actual de recursos uraníferos en Colombia. Como resultado de sus estudios en los departamentos de Valle del Cauca, Huila, Magdalena, Vichada y Nte. de Santander se tienen contenidos de uranio en granitos, areniscas, lutitas, calizas, carbones y aguas cercanas a éstas anomalías. Sin embargo, a pesar

de que se generaron 7 informes [99], sólo se tiene información de 5 de ellos donde no se muestra información de los contenidos cuantitativos de éste mineral o de otros en estas regiones. Cabe resaltar que la exploración realizada en la Sierra Nevada de Santa Marta en 1980 en un área de 3000 km^2 , desde helicóptero con equipos portátiles, no se superaron los 80 mg/kg de uranio por lo cual no se siguió la exploración en esa área [107].

- Cogema: Ésta empresa francesa realizó estudios de prospección de uranio en el sector de orinoquía - amazonas entre 1978 y 1982 [99, 103]. Cubrió un área de 500.000 km^2 a escala 1:400.000 y las siguientes zonas: Araracuara - Dos Ríos con una respuesta de actividad de areniscas baja; La Pedrera que no mostró anomalías radiométricas; zona Vichada - Guainía la cual mostró algunas anomalías radiométricas considerables y la zona Sierra de Naquen Oeste - Este que estudiaron algunos afloramientos y descubrieron oro en arenas cuarcíticas. Cogema generó 20 informes asociados al reporte de las anomalías encontradas en los sectores anteriormente descritos, pero solo se rescataron 5 informes.
- SUNKYONG: Empresa coreana que firmó convenio entre 1979 y 1981 realizando exploraciones en los Municipios de Ocaña (Santander), Paipa e Iza (Boyacá) [99] de cuyos resultados no se encontró información.
- Otros: Existieron otras compañías que realizaron estudios de exploración de uranio en Colombia, pero debido a que eran con gasto privado o fue muy rápido su tiempo de exploración, no se encuentran informes concretos acerca de estudios concluidos. Entre estas están [84, 108]: Apig (Compañía General Italiana del Petróleo) de Italia, Lucky MC Uranium y Wyoming de Estados Unidos, BNFL y CEGB de la Gran Bretaña, Veba Stinnes y Saarberg de Alemania, Korean Electric Company, Aquitaine, Westing-house.

Como resultado de estos estudios, en el país se han identificado al menos 13 prospectos asociados con rocas sedimentarias (marinas y continentales) y seis prospectos asociados con rocas de origen ígneo, distribuidos a lo largo de las cordilleras Oriental y Central, desde el departamento del Huila al sur hasta el departamento de Norte de Santander al norte [109]. El

Empresa	País	Periodo	Sitios Prospectados
Enusa	España	1977 - 1980	Guainía, Vaupés, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Nte. de Santander
Total - Minatome - IAN - Colurano	Francia - Colombia	1975 - 1980	Nte. Santander, Caldas, Meta, Huila
PNUD - IAN - OIEA	Colombia	1980 - 1982	Antioquia, Nte. de Santander
PNMC	Japón	1980 - 1985	Valle del Cauca, Huila, Magdalena, Vichada, Nte. de Santander
Cogema	Francia	1978 - 1982	Amazonas, Guainía,
Urangesellschaft	Alemania	1974 - 1976	La Guajira, Magdalena, Santander, Bolívar, Cindinamarca
SUNKYONG	Corea del Sur	1979 - 1981	Santander, Boyacá

Tabla 3-2.: Principales empresas que realizaron exploraciones de uranio en Colombia

grupo de materias primas del IAN escogió las zonas estratégicas en las cuales se encontraron sectores anómalos para continuar con la prospección de uranio en el territorio [99], como lo muestra la figura 3-4. Sin embargo, los resultados obtenidos de todas las investigaciones de empresas privadas y del estado colombiano para la mayoría de prospectos analizados no tan promisorios para uranio, sumado a la grave depreciación del valor de U_3O_8 entre 1979 y 1982 los cuales disminuyeron desde US 43,25 lb hasta US 22,50 lb, además del aumento en los costos de exploración obligó a suspender los trabajos de las compañías extranjeras con el gobierno colombiano [110] en la búsqueda y cuantificación de éstas reservas.

Como se nota en la investigación anterior, no existe una compilación del material recolectado

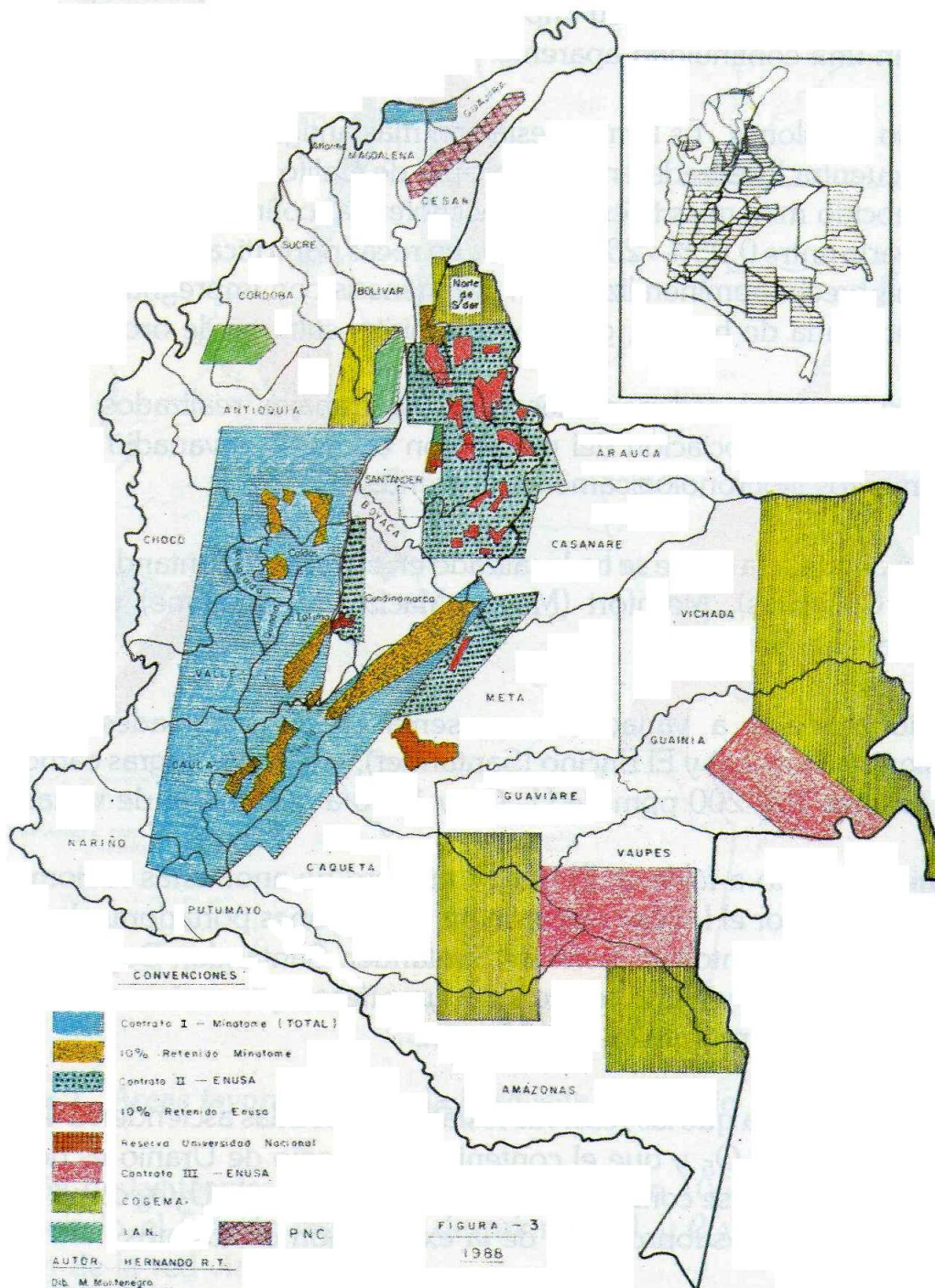


Figura 3-3.: Localización de áreas contratadas por compañías extranjeras y el IAN [99].

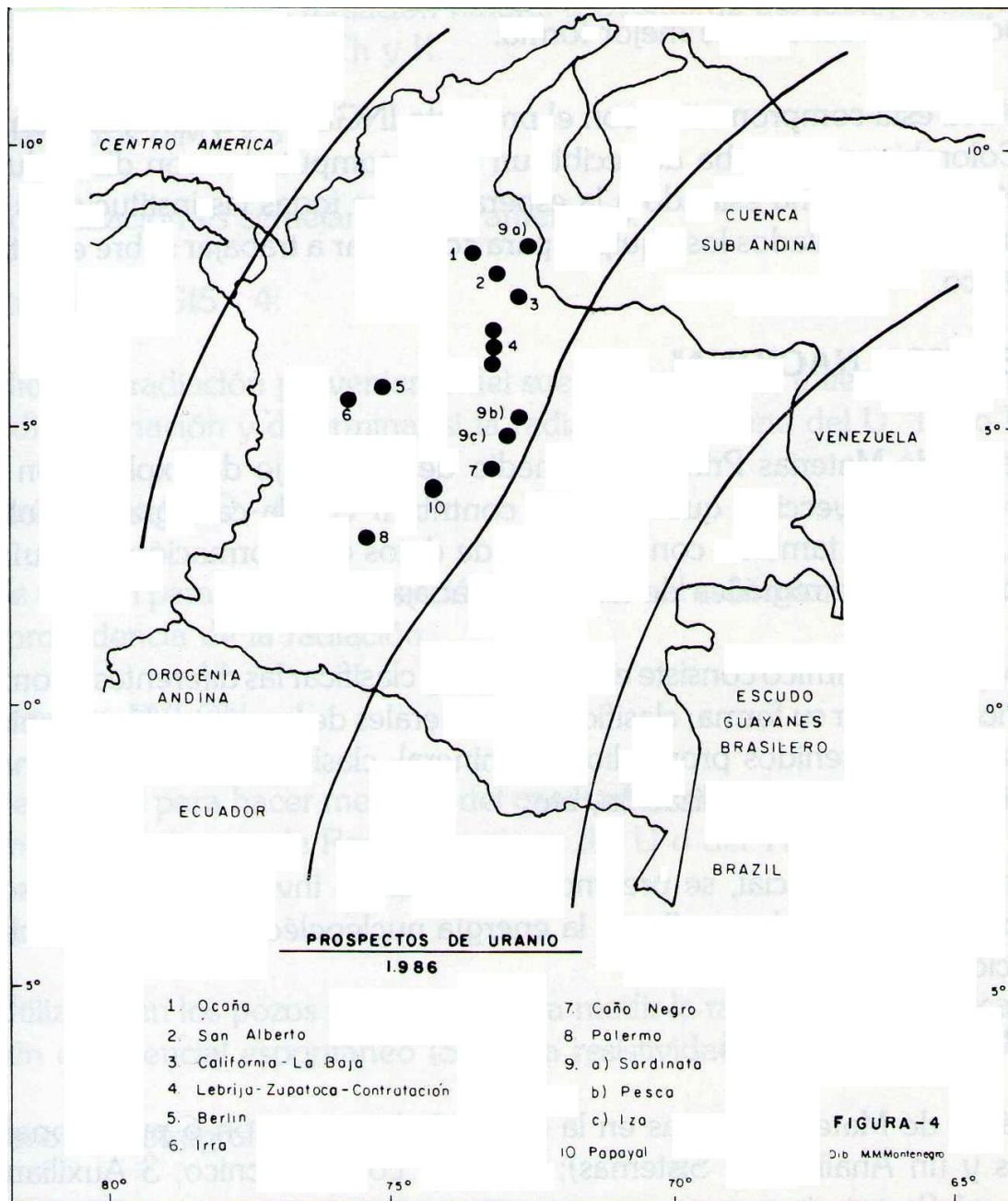


Figura 3-4.: Localización de los prospectos de uranio [99].

ni de los informes de todas las empresas que realizaron exploración de uranio en Colombia, a pesar que, el Dr. Ernesto Villarreal, director del Instituto de Asuntos Nucleares desde diciembre de 1974 hasta finales de 1988, indicó en el informe de actividades de 1987 la importancia de agrupar y disponer todo el trabajo desarrollado en búsqueda de minerales

radiactivos señalando la necesidad de:

“La elaboración de un censo de todos los indicios, manifestaciones y depósitos minerales radiactivos mediante la preparación de las fichas descriptivas correspondientes a las anomalías halladas durante los trabajos de prospección realizados por el IAN y compañías extranjeras que exploraron el país durante los últimos 12 años” [111]

A pesar de esta falta de centralización de la información, en éste período y al cumplir los 30 años de existencia del IAN [99], puede decirse que fué la época de mayor productividad de la entidad en investigación y desarrollo donde la prospección de minerales radiactivos alcanzó un cubrimiento del 70 % del territorio a escala 1:100.000, identificándose algunos prospectos de interés y se avanzó en la mayor parte de las áreas del conocimiento nuclear, destacándose los trabajos e investigaciones en física nuclear, física de reactores, aplicaciones industriales, radioquímica, química agrícola, radiofarmacia, hidrogeología isotópica, radiofísica sanitaria e ingeniería de procesos donde se adelantaron trabajos en concentración de uranio.

3.2.2. Infraestructura

La creación del Instituto de Asuntos Nucleares obligó al establecimiento de una infraestructura para la búsqueda de uranio y el estudio de las aplicaciones nucleares de forma pacífica como se mencionó en el numeral anterior. Dentro de ésta infraestructura cabe resaltar la instalación y puesta a punto del Reactor Nuclear IAN-R1 y los equipos de campo y laboratorio asociados a la exploración del uranio de los cuales se tratará mas adelante y los equipos y laboratorios para aplicaciones de la energía nuclear.

Reactor nuclear IAN-R1

Como consecuencia de la guerra fría y la carrera nuclear desatada entre Estados Unidos y la Unión Soviética, los Estados Unidos con su programa “átomos para la paz” en 1955 firma tratados bilaterales de cooperación técnico-científica con diferentes países entre los cuales se

encuentran Argentina, Brasil, Colombia, Dinamarca, España, Israel, India, Líbano, Suiza y Turquía [100, 112]. Cabe señalar que estos países para la fecha de la firma de los tratados no disponían de tecnología y desarrollo nucleares pero con el avance de éstos tratados algunos de ellos desarrollaron la tecnología nuclear llegando inclusive, a que países como Israel e India sean potencias nucleares [113, 114] y en Sudamérica, Argentina y Brasil, cubran parte de sus necesidades energéticas con energía nuclear [115].

En el marco de éste programa “átomos para la paz”, el gobierno de Estados Unidos dona al estado colombiano el reactor nuclear IAN-R1 de 20 kW para investigación (figura 3-5), que el 20 de enero de 1965 fue puesto a crítico, esto es, que en dicha fecha en la ciudad de Bogotá se estabilizó la primera reacción controlada en cadena de neutrones producidos por la fisión inducida del ^{235}U del país [116].



Figura 3-5.: Reactor Nuclear IAN-R1 (foto tomada por José Alberto Gómez).

Los objetivos básicos de la instalación y puesta en funcionamiento del reactor nuclear IAN-R1 fueron, entre otros [116]:

1. Elaborar y desarrollar programas dirigidos al estudio y el empleo del reactor de investigación IAN-R1, que contribuyan al avance de las aplicaciones de la energía nuclear y a la optimización de las técnicas nucleares existentes.

2. Colaborar con las universidades en el desarrollo de proyectos o en la ejecución de convenios firmados por el IAN con entidades nacionales o internacionales en los cuales esté prevista la participación del personal del área y la utilización del reactor.
3. Llevar a cabo tareas de difusión sobre los usos del reactor y las aplicaciones de la energía nuclear y participar en congresos y seminarios sobre temas en éste campo, tanto a nivel nacional como internacional

Durante el tiempo de funcionamiento del IAN, el baluarte tecnológico sin lugar a dudas, era el reactor nuclear que a partir de la utilización de ésta instalación, se empezaron a implementar las diferentes técnicas y tecnologías nucleares así no usaran el reactor nuclear para su normal desarrollo. El reactor nuclear se convirtió en un epicentro de la investigación nuclear, radiactiva e isotópica del país [117] que permitió el intercambio académico y de entrenamiento con las agencias nucleares de otros países de sudamérica y el OIEA que veían en el IAN y sus profesionales un alto nivel. Sin embargo, ésta época de gloria empieza su decadencia a comienzos de la década de los noventa cuando se cambia el nombre de IAN por INEA y se le adiciona la investigación en las energías alternativas. Simultáneamente y atendiendo consideraciones de orden técnico y geopolítico [118] se hace el cambio del combustible de tipo enriquecido (HEU, 90% U_3O_8) por uno de tipo empobrecido (LEU, 20% U_3O_8) con lo cual la función técnica nuclear se ve reducida, es el principio del fin del Instituto de Asuntos Nucleares quedando atrás los esfuerzos de la Administración Marulanda y Villarreal, para lograr la inserción del país en la era de la energía nucleoelectrica. En 1997, el Gobierno Nacional ordena, por su baja productividad y mala ejecución presupuestal, la liquidación del INEA despidiendo a los investigadores poco a poco y/o disminuyendo sus salarios [119] perdiendo de esta manera un capital humano de alta excelencia y la oportunidad de estar a la vanguardia de las investigaciones y aplicaciones de la energía nuclear para su uso pacífico.

Equipos de campo y de laboratorio

Para comienzos de la década de los sesenta el IAN cuenta con la técnica de fluorimetría descubierta en 1956 por Centanni [120] para la medición cuantitativa de uranio en muestras

geológicas, equipo que se muestra en la figura **3-6**.

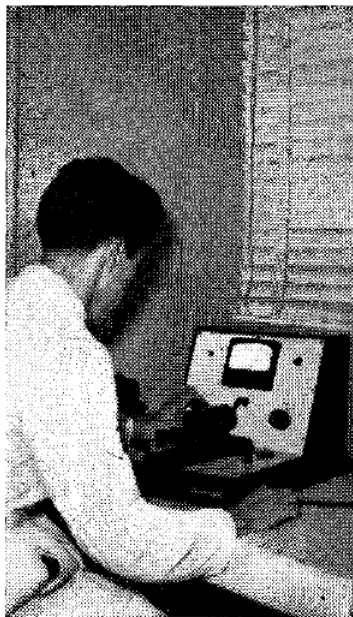


Figura 3-6.: Fluorímetro Galvanek-Morrison para análisis cuantitativo de uranio en minerales.

Entre los años 1972 y 1974, con la visión gerencial que se tenía en la época de futura demanda de cuantificación de uranio en matrices geológicas, se adquiere e instala el equipo de neutrones retardados (figura **3-7**) ya que ésta tecnología tiene la capacidad de analizar grandes lotes de muestras para la cuantificación de uranio y torio provenientes de los muestreos en campo del grupo de materias primas. En la tabla **3-3** se observa el número de muestras analizadas en el sistema de Conteo de Neutrones Retardados que para el año de 1981 llegó a más de 7000 muestras¹ todas provenientes de los proyectos de exploración de las compañías extranjeras y los proyectos nacionales [14, 24, 99, 121]. El últimos registro reportado de la utilización del sistema de Conteo de Neutrones Retardados es el trabajo de grado de la Lic. en Química Eliana Mesa Ramírez junto con el funcionario Rafael Espinoza que evaluaron la emisión radiactiva de cenizas volantes y escoria de las centrales térmicas de Guajira, Tasajero, Paipa y Zipa. El trabajo determinó contenidos de ^{235}U por neutrones retardados y ^{232}Th por

¹El documento de donde se extrajo ésta información solo tiene el número de muestras hasta 1981.

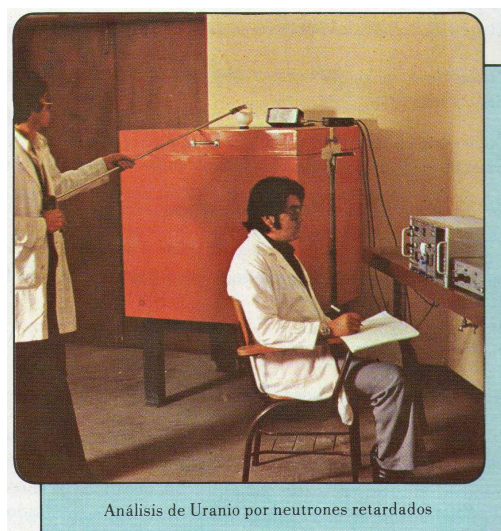


Figura 3-7.: Sistema de Conteo de Neutrones Retardados

activación neutrónica instrumental de más de 200 muestras de ceniza y escoria de éstas centrales térmicas encontrando que los enriquecimientos se dan principalmente en la ceniza volante de los precipitadores [122].

Año	No. de Muestras
1974	239
1975	1377
1976	565
1977	3265
1978	6069
1979	6758
1980	5797
1981	7410

Tabla 3-3.: Cantidad de muestras analizadas por el sistema de Conteo de Neutrones Retardados.

A través del proyecto PNUD-OIEA-IAN [102] se construyó un laboratorio de geoquímica

que comenzó a operar en 1981 y poseía la última tecnología de la época para la caracterización de trazadores y radiotrazadores, útiles en análisis geoquímico orgánico e inorgánico, e igualmente se monta el laboratorio de metalurgia de uranio cuyo objetivo fué la obtención de torta amarilla (yellow cake) a través de la investigación en lixiviación de minerales de uranio para la concentración de éste elemento [123].

Los recursos físicos que poseía el grupo de Materias Primas del IAN para la exploración de uranio eran los siguientes:

- Detectores de radiación de campo: Útiles para realizar prospecciones de minerales radiactivos *in-situ*, de estos se contaban con detectores de centelleo SPP2, gammámetros GMT - 3T, espectrómetros GIS - 4 y GAD - 6 (Integrated Gamma-Ray Spectrometer) [124].
- Detectores de radón: Enanómetro PYLON el cual se usa para realizar medidas de gas radón en suelo y aguas discriminando si la fuente es U o Th [99].
- Detector de perfilaje: Utilizado para medir la radiación de rocas en pozos perforados y mide resistividad de la roca [99]
- Microscopio petrográfico para la realización de análisis de secciones delgadas.
- Cuarteadores para la reducción de tamaño de las rocas [99].
- Analizador de uranio Scintrex UA - 3: Analizador de uranio en muestras acuosas el cual usa la espectroscopía de fluorescencia inducida por láser [125].
- Equipos de laboratorio en general.

3.3. Época posterior al IAN: 1997 - 2016 y explotación actual

Los proyectos de exploración recientes se han basado en las prospecciones de empresas privadas contratadas por el Instituto de Asuntos Nucleares y los estudios de INGEOMINAS (que cambió su nombre a Servicio Geológico Colombiano en 2011) que, desde el 2008, retomó la exploración a través del Grupo de Exploración de Minerales Energéticos del Área de Recursos del Subsuelo. Este grupo realiza anualmente un informe sobre sus resultados de exploración de minerales energéticos (potasio, uranio y torio) a partir de mediciones en campo de algunas zonas del país.

3.3.1. Exploración entre 1997 y 2016

Con la liquidación del INEA a través de los decretos 2740 de 1997, 1451 y 1452 de 1998, las funciones de éste instituto se asignaron a la Unidad de Planeación Minero - Energética - UPME, al Ministerio de Minas y Energía y a INGEOMINAS al cual le correspondió la operación del reactor nuclear, laboratorios de aplicaciones nucleares, planta de irradiación gamma y Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD). Esta repartición de funciones ocasionó que entre 1997 y 2007 se estancara la exploración de uranio y la investigación de éstos materiales en Colombia por parte de las entidades del estado mostrando el retroceso de más de 10 años en la exploración y producción científica nuclear en el país. Los esfuerzos por parte de INGEOMINAS para reactivar las labores se redujeron a licenciamiento y control, esterilización de materiales, calibración de equipos de irradiación, radiometría ambiental y caracterización de elementos en matrices geológicas que solo hasta el 2015 generaron datos cuantitativos de concentración para un ejercicio intercomparación que tuvo muy buenos resultados, comparables a nivel internacional [126].

En el marco del proyecto de exploración de recursos energéticos para la búsqueda de uranio y carbón, se crea el Grupo de Exploración de Uranio de INGEOMINAS en el 2008. El equipo dirigido por Leopoldo González *et al.* [127] basándose en los pocos informes de Enusa [128],

el trabajo de Claudia Alfaro *et al.* del sondeo preliminar del gas radón en el área geotérmica de Paipa (indicativo de la presencia de uranio y torio en la zona) [129] y algunos informes de cartografía y existencia de roca fosfórica en el sector [130] iniciaron la búsqueda del mineral radiactivo en Paipa, Iza, Pesca y Chivatá en Boyacá cubriendo un área de 460 km². González logró realizar un informe oficial después de 19 años² encontrando 3 puntos anómalos en la región de Paipa en las zona de Manzano, Batán y el Molino; e Iza con anomalías en El Crucero, San Miguel, Cuitiva - Iza, Erika y Tota - Pesca. La exploración de uranio en Floresta (Boyacá) mostró contenidos de uranio entre 4,8 y 6,4 ppm destacándose la localidad de Belén con 18,3 ppm [127]. En éstos años 2008 y 2009 las investigaciones incluyeron toma de muestras para análisis en laboratorio para confirmar o rechazar los valores iniciales tomados en campo para uranio, torio y potasio con el equipo SPP2. Cabe resaltar que, a partir de estos estudios, anualmente, el grupo de exploración de uranio realiza un informe de anomalías radiométricas que se muestra en la tabla **3-4**.

En el sector occidental y central del macizo de Santander no se encontraron valores anómalos importantes excepto en la región de Santa Rosa que mostró concentraciones altas de radiación gamma total (uranio, potasio y torio). Para el sector norte y sur del macizo de Quetame, se encontraron valores de uranio de 6,13 ppm, torio 20,9 ppm y porcentaje de potasio del 2,88 %. Estos valores son diferentes a los encontrados por el consorcio Total-Minatome - IAN-Colurano [102] que indicaban anomalías de uranio con una concentración de 6000 ppm; además que los resultados reportados muestran que el contenido de torio es 3 veces mayor que el contenido de uranio cuando generalmente los resultados son al contrario, salvo algún evento geológico específico que diera origen a ésta situación; igualmente los contenidos de potasio normales en rocas están por debajo del 1 %.

Los reportes de exploración de uranio desde 2010 dan poca información acerca de la cuantificación exacta de contenidos de los minerales radiactivos debido a las siguientes razones:

- Los equipos usados en campo son RS - 230 BGO Super Spec que proporcionan la

²El mismo se equivoca diciendo que son 26 años.

Año	Nombre del informe	Autor Principal
2008	Exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivatá (Boyacá) [127]	Leopoldo González Oviedo
2009	Exploración de uranio en Floresta (Boyacá) [131]	Leopoldo González Oviedo
2010	Exploración de uranio en el sector occidental del macizo de Santander [132]	Adrián Perez
2011	Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector central del macizo de Santander, Colombia [133]	Giovanni Moreno Sanchez
2012	Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector norte del macizo de Quetame, Colombia [134]	Giovanni Moreno Sanchez
2013	Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector sur del macizo de Quetame, Colombia [135]	Juan Fernando Diaz Tamayo
2014	Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector central del departamento de Boyacá y sur de Santander, Colombia	Giovanni Moreno Sanchez
2015	Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio entre los municipios de Arcabuco (Boyacá) y Chima (Santander)	Giovanni Moreno Sanchez

Tabla 3-4.: Informes anuales realizados por el Servicio Geológico Colombiano desde el 2008 hasta el 2015.

concentración semicuantitativa de potasio, uranio y torio en campo. Estos equipos no han sido calibrados desde que se adquirieron, razón por la cual algunos han perdido la garantía y es necesario la calibración en el LSCD tanto por energía (ubicar los

radionúclidos en la energía que corresponde) como por eficiencia (que la proporción de intensidad de la señal con la del radionúclido sea conocida para hallar el factor de calibración del equipo).

- Por el tipo de detector de los equipos y las características nucleares del uranio y torio que en sus cadenas de desintegración llegan a ^{214}Bi y ^{210}Tl respectivamente y que por decaimiento se convierten en radón (gas noble que puede salir del sistema antes de convertirse al polonio), puede generarse un error inherente en la medida *in situ*.

Por lo anterior es importante que en los estudios futuros de exploración se acompañe la cuantificación *In Situ* por toma de muestras representativas de las diferentes anomalías para analizarlas en el laboratorio y de esta manera conocer el verdadero valor de la concentración de éstos minerales como lo determinó el gobierno nacional a través del ministerio de Minas con la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012 “por el cual se determinan unos minerales de interés estratégico para el país” [26] estableciendo que el uranio, sus minerales asociados, derivados o concentrados son declarados como minerales estratégicos para realizar proyecciones de explotación las cuales serán custodiadas por la autoridad minera, que en este caso son la Unidad de Planeación Minero Energética bajo la directriz del Ministerio de Minas y Energía. Con las técnicas nucleares ya establecidas en el SGC, sobre muestras recolectadas en campo, pueden cuantificarse otros metales de interés industrial tales como cobalto, samario, neodimio, molibdeno, estroncio y americio que hay indicios, se encuentran en una buena concentración en las zonas exploradas para minerales energéticos estratégicos y que pueden valorizar mucho más éstos recursos.

3.3.2. Actualidad minera del uranio en Colombia

La única explotación comercial de uranio en Colombia corresponde al proyecto Berlín ubicado en el municipio de Samaná (Caldas), explorado previamente por la compañía francesa Minatome entre 1978 y 1981 (hoy Areva). Este proyecto está actualmente gerenciado por Gaia Energy Ltd subsidiaria de U3O8 Corp que es una compañía de exploración con sede en Ontario (Canadá) con intereses en recursos de uranio y productos asociados en sudamérica

entre ellos, la estratégica región del Roraima entre Venezuela y Brasil con derechos exclusivos en un área de aproximadamente 1,3 millones de hectáreas.

Los reportes de concentración radiométrica, metalúrgica y química sobre muestras del proyecto Berlín e incluso datos de duplicados enviados a la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO) para verificación imparcial de la información indican que el proyecto Berlín [136] ofrece una mezcla de productos de alto valor agregado principalmente uranio, vanadio y fosfatos pero también están presentes otros metales como itrio, molibdeno y plata como se muestra en la Tabla 3-5 en varias zonas de la parte norte de la anomalía, razón por la cual se considera que las posibilidades de éxito de este proyecto son muy altas dado que la comercialización de los minerales asociados al uranio deja a éste como ganancia neta.

Intercepto de Zanja		Uranio		Vanadio	Fósforo	Molibdeno	Plata	Itrio
Zanja	Ancho (m)	U ₃ O ₈		V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Mo	Ag	Y ₂ O ₃
		%	lbs / ton	%	%	mg / kg	mg / kg	mg / kg
TB31	0,9	0,050	156	0,63	10,1	102	1,1	448
TB32	1,4	0,057	179	0,54	5,6	58	5,0	436
TB33	2,5	0,129	408	0,74	18,1	35	1,1	1110
TB34	1,2	0,135	425	0,67	2,1	92	3,7	904
TB37	2,1	0,130	450	1,12	11,2	317	0,6	2317

Tabla 3-5.: Valores de las zanjas de la parte norte del proyecto Berlín (adaptado por el autor) [137].

Actualmente en éste proyecto existen 5 títulos vigentes de exploración, explotación de minerales y concentrados de uranio y torio, todos de la empresa Gaia Energy Ltd discriminados en la tabla 3-6 sobre un área de 12665 hectáreas y con unos recursos inferidos de 8100 ton e indicados de 600 ton con una concentración de 0,11 % de U₃O₈ [136]. El valor de las regalías por ésta explotación que corresponden a la última columna de la tabla son 350000 USD al

año aproximadamente que solo equivale a la explotación de uranio dejando fuera los otros metales.

Código del Título	Fecha Inicial de exploración	Duración del Título (años)	Área del Título (Ha)	Cuota anual (USD)
755-17	9 Nov. 2007	30	2122,6	43000
756-17	9 Nov. 2007	30	459	4700
664-17	7 Nov 2007	30	7304,9	223600
IFM08221X	21 Dic. 2007	30	74.5	760
736-17	9 Nov. 2007	30	2704	55000

Tabla 3-6.: Títulos mineros vigentes de exploración de uranio [136].

3.4. Conclusiones y recomendaciones

3.4.1. Conclusiones

1. La liquidación del Instituto de Asuntos Nucleares en 1997 atrasó la investigación en ciencia nuclear en el país la cual, para mediados de los años ochenta, era comparable con México e Irán, que son potencias nucleares a nivel regional y mundial y por encima de Argentina y Brasil, ocasionando pérdida de información valiosa sobre los estudios de metales estratégicos en el país y el rezago del uso pacífico de la energía atómica.
2. A partir de la recopilación bibliográfica de exploración de uranio en Colombia se encontró que los estudios muestran los contenidos de uranio y sus asociados de tierras raras en puntos donde se encontraron anomalías radiométricas. Sin embargo, no se realizó la evaluación cuantitativa de dichos contenidos de tierras raras para las muestras que no poseen anomalías radiométricas indicando que su evaluación se realizó de forma incompleta.
3. El grupo de Exploración de uranio sólo se limita a realizar el informe interno de tra-

bajo, el cual irá directamente a la biblioteca del SGC; debe realizarse publicaciones en revistas científicas para que sea de fácil consulta y acceso internacional.

4. La toma de muestras en campo y su análisis en laboratorios especializados es necesaria en los futuros estudios de exploración para determinar estudios geoquímicos de existencia de trazadores o elementos mayores o menores en la roca.

3.4.2. Recomendación

1. Debe realizarse nueva prospección de las zonas potencialmente ricas en minerales radiactivos para toma de muestras con el fin de cuantificar de manera exacta la presencia de uranio por técnicas como el conteo de neutrones retardados y efectuar determinación de la presencia de otros elementos valiosos por medio de Análisis por Activación Neutrónica Instrumental.

4. Determinación de contenidos de uranio en matrices geológicas

La búsqueda y prospección de uranio para su comercialización en un área específica debe tener buenas metodologías para su correcta identificación teniendo en cuenta que éste tipo de material posee alto grado de heterogeneidad por estar contenido en una matriz geológica. La tabla 4-1 muestra los pares radiogénicos utilizados en datación geoquímica para caracterización de algunos minerales que permiten reconstruir la historia térmica de la roca [138]. Existen muchos métodos instrumentales para realizar la medida de los isótopos con fines de datación, donde la técnica más usada es la Espectrometría de Masas de Plasma de Acoplamiento Inductivo con Láser de Ablación (LA-ICP-MS, por sus siglas en inglés) que es capaz de realizar análisis de contenidos elementales e isotópicos a muestras en estado sólido. Sin embargo, al ser una técnica de datación no permite cuantificar el potencial uranífero de una región específica por lo cual deben considerarse otras técnicas que permitan la descripción geológica y química de los contenidos de uranio y materiales radiactivos de rocas, suelos y sedimentos. Entre estas técnicas se tiene espectrometría γ , análisis por activación neutrónica instrumental, fluorescencia de rayos X, fluorimetría, espectrofotometría UV-Vis, gravimetría y volumetría y conteo de neutrones retardados que se describen a continuación:

4.1. Espectrometría γ

Una serie radiactiva de elementos o cadena proviene de un mismo núcleo que decayó por emisiones α o β en otro, que a su vez decae en un siguiente elemento y así sucesivamente hasta llegar a un isótopo estable emitiendo, en algunos casos, radiación gamma [139]. En la

Isótopo Padre - Hijo	Tipo de Decaimiento	Vida media (ma)*	Constante de Decaimiento $\lambda = 10^{-11} \text{ años}^{-1}$
${}_{92}^{235}\text{U} \longrightarrow {}_{82}^{207}\text{Pb}$	7α	704	98,4850
${}_{19}^{40}\text{K} \longrightarrow {}_{20}^{40}\text{Ar}$	Captura Electrónica	1250	55,4300
${}_{92}^{238}\text{U} \longrightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb}$	8α	4468	155,1250
${}_{90}^{232}\text{Th} \longrightarrow {}_{82}^{208}\text{Pb}$	6α	14010	4,9475
${}_{71}^{176}\text{Lu} \longrightarrow {}_{72}^{176}\text{Hf}$	β^{-}	35700	1,9400
${}_{75}^{187}\text{Re} \longrightarrow {}_{76}^{187}\text{Os}$	β^{-}	45600	1,4200
${}_{37}^{87}\text{Rb} \longrightarrow {}_{38}^{87}\text{Sr}$	β^{-}	48800	1,4200
${}_{62}^{147}\text{Sm} \longrightarrow {}_{60}^{143}\text{Nd}$	α	106300	0,6540

* (ma): millones de años

Tabla 4-1.: Isótopo radiactivo y su par radiogénico, tipo de decaimiento, vida media y constante de decaimiento para datación geológica [73].

naturaleza pueden encontrarse tres cadenas ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$ y ${}^{235}\text{U}$. Las cadenas del ${}^{238}\text{U}$ y ${}^{232}\text{Th}$ son las más comunes en la tierra ya que sus tiempos de vida media son del orden de la edad del planeta y el ${}^{235}\text{U}$ por tener una vida más corta es menos abundante y su contribución y la de sus hijos es menor. En las cadenas radiactivas se producen los gases nobles ${}^{222}\text{Rn}$ y ${}^{219}\text{Rn}$ para las cadenas de desintegración ${}^{238}\text{U}$ y ${}^{235}\text{U}$ respectivamente, los cuales, por su estado físico son más peligrosos debido a la facilidad de inhalación para la persona que manipula dicha sustancia. La figura 4-1 muestra las cadenas de desintegración de los dos radionúclidos mas importantes en donde se observan los elementos que son emisores gamma y la tabla 4-2 muestra sus energías de emisión para las series del ${}^{235}\text{U}$ y ${}^{238}\text{U}$ con la probabilidad de emisión γ que es un porcentaje que indica la relación del número de átomos que decaen con respecto a los modos de descomposición total [13].

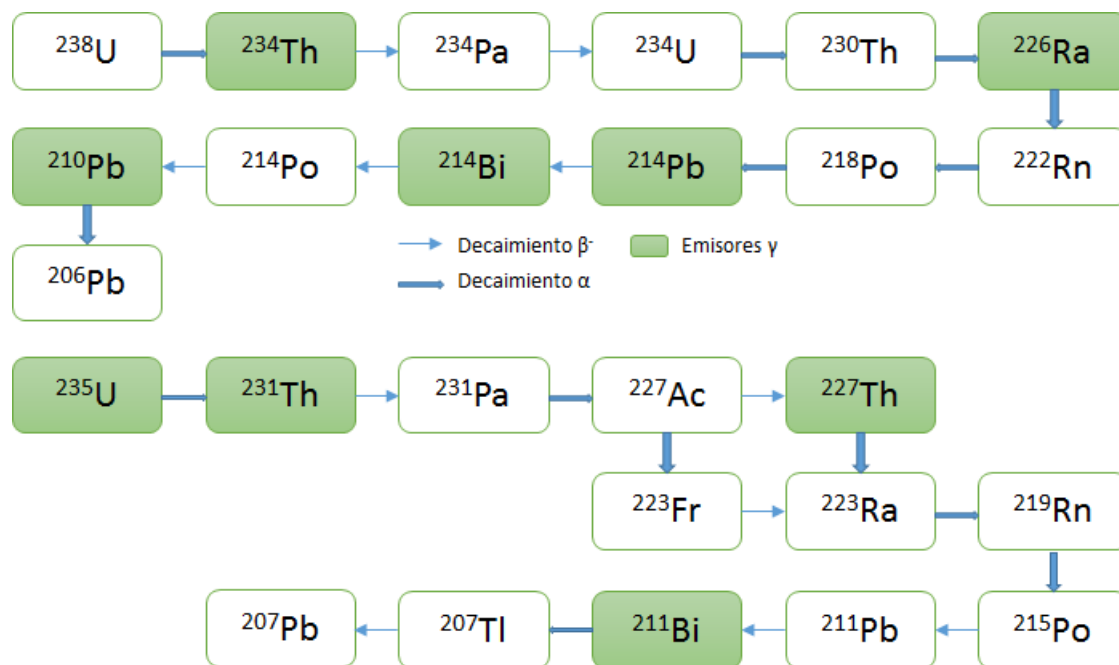


Figura 4-1.: Cadenas de desintegración del ^{238}U y ^{235}U

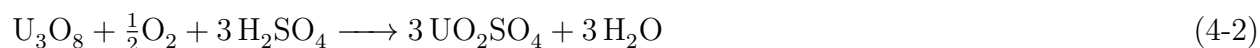
La propiedad más importante del uranio y sus productos de decaimiento es su radiactividad natural la cual es útil para realizar prospecciones de uranio *in-situ* por medio de detectores de centelleo portátiles [140] y para medidas en el laboratorio el equipo más utilizado es el detector de germanio hiper puro (HPGe) y su cadena electrónica asociada [141]. Para la cuantificación de uranio por éste último método, la medida se realiza con respecto a un patrón de referencia usando el estándar del Organismo Internacional de Energía Atómica IAEA RGU-1 que es una dilución en sólido de una mena de uranio BL-5 con 7,09% y una mena de torio OKA-2 de 2.89% [142]. La figura 4-2 indica el espectro gamma característico de la radiación natural del estándar de uranio que, para la misma geometría y posición de la muestra con respecto al detector, puede medirse la cantidad de uranio con buena exactitud desde 50 ppm [140].

Para realizar éste tipo de medidas debe tenerse en cuenta el *equilibrio secular* de la muestra, esto es, que un radionúclido A de la cadena de desintegración del uranio forma otro elemento B, que se desintegra para formar C a la misma velocidad. Dicho planteamiento implica la

Radionúclido	Energía (keV)	Serie	Probabilidad emisión gamma (%)
^{234}Th	63,30		4,800
	92,38	^{238}U	2,800
	92,80		2,800
^{226}Ra	186,21	^{238}U	3,590
^{214}Pb	53,20		1,200
	242,00	^{238}U	7,430
	295,20		19,300
	351,90		37,600
^{214}Bi	609,30	^{238}U	44,800
^{210}Pb	46,50	^{238}U	4,250
^{235}U	185,70	^{235}U	57,200
^{231}Th	63,90	^{235}U	0,023
^{227}Th	93,93	^{235}U	2,370
^{211}Bi	351,06	^{235}U	12,900

Tabla 4-2.: Emisores gamma del estándar RGU-1

generación de radón, principal fuente de desequilibrio ya que es el único miembro de la cadena que se encuentra en estado gaseoso. El equilibrio secular del sistema puede también alterarse por lixiviación del uranio en una región específica [143] quedando dispersa su concentración a lo largo del recorrido del fluido de lixiviación. Éste hecho se da principalmente en presencia de minerales piríticos, según las siguientes reacciones:



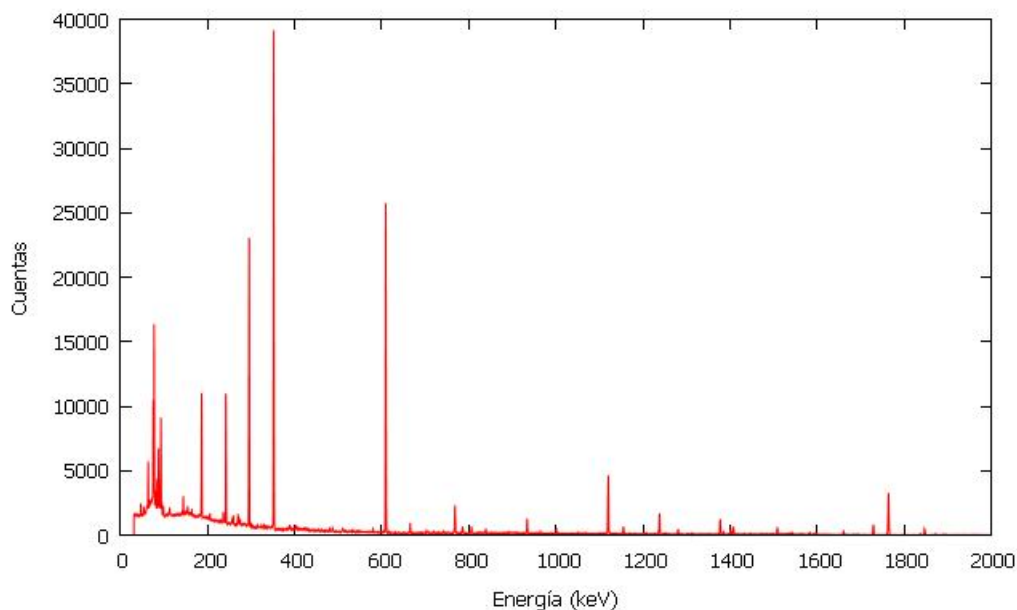


Figura 4-2.: Espectro gamma característico del estándar RGU-1

Siendo el sulfato de uranio (IV) mucho más soluble que el óxido de uranio [24].

La espectrometría gamma también se puede usar para determinar la relación isotópica del ^{235}U con respecto al ^{238}U y al ^{234}U mediante la relación de las medidas de intensidad de radiación γ de cada uno de los emisores de las cadenas de isótopos del uranio [140]. A través de la relación isotópica se cuantifica el uranio total y también se usa para el sistema de Conteo de Neutrones Retardados.

4.2. Análisis por Activación Neutrónica Instrumental

El Análisis por Activación Neutrónica Instrumental es un tipo de análisis elemental o isotópico basado en la medición de la radiación característica de núclidos formados directamente o indirectamente por la activación de una muestra añadiendo una especificación del tipo de radiación incidente (p. ej. neutrones) y su energía (p. ej. rápidos, térmicos) [144]. La radiación incidente (o absorbida) en el cristal de germanio se transforma en pulsos nucleares por medio de un preamplificador sensible a la carga que se encuentra integrado al detector. El pulso

nuclear se amplifica y modula por un amplificador nuclear linear y entra a un convertidor análogo digital “ADC” externo. Finalmente la señal entra a la tarjeta analizadora multicanal para posteriormente convertir la señal en lenguaje de máquina que interpreta un ordenador [145]. Ésta técnica puede llevarse a cabo con una fuente de neutrones térmicos; sin embargo, las condiciones de flujo neutrónico la limitan a irradiaciones en un reactor nuclear de investigación [146]. El ^{238}U captura un neutrón que se convierte en ^{239}U y decae por emisión β^- a ^{239}Np siguiendo el siguiente esquema:



El ^{239}Np puede cuantificarse por su energía de emisión γ a 277,5 keV en un detector tipo HPGe [147]. La figura 4-3 muestra el espectro de un estándar irradiado en un reactor nuclear con varios elementos certificados, tiempo de decaimiento de 7 días y una lectura de 4 horas mientras que en el espectro de la figura 4-2 se midió la radiación natural de la muestra.

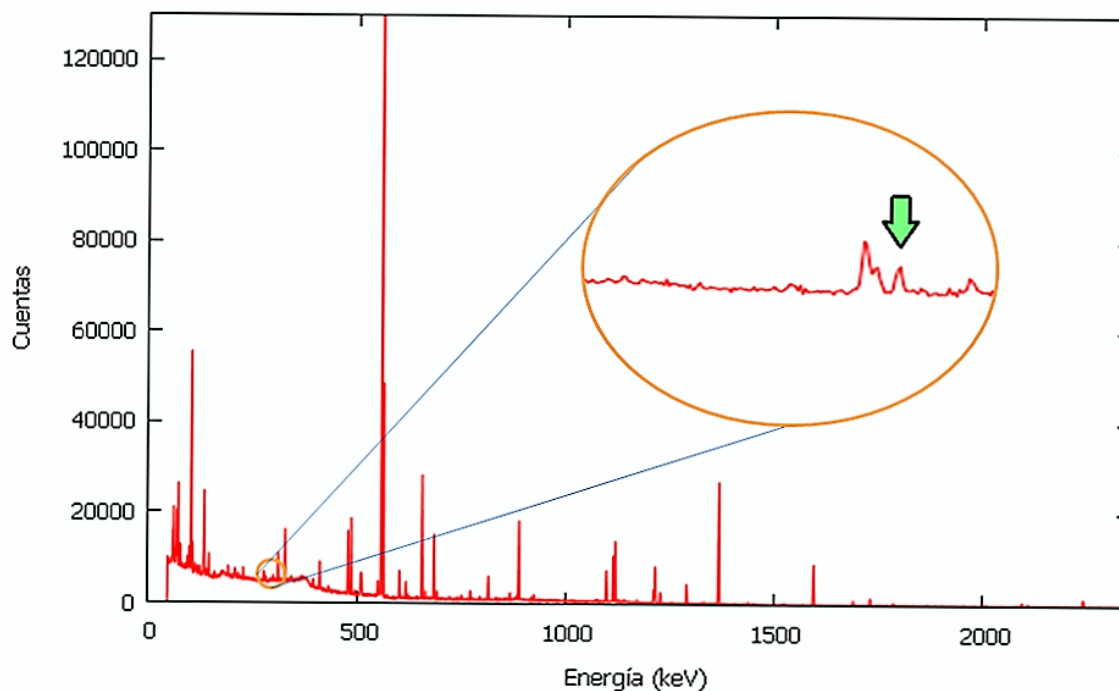


Figura 4-3.: Espectro gamma de una muestra irradiada.

4.3. Fluorescencia de rayos X

Es un tipo de análisis basado en la medición de energía e intensidad característica de la radiación X, emitida por una muestra durante la irradiación de tipo electromagnética [144]. Las ventajas de la técnica incluyen el corto tiempo de medición (pocos minutos) y su versatilidad para identificar otros elementos diferentes al uranio. La dificultad más grande de la técnica, aparte de su costo, es su sensibilidad a la composición de la matriz [146], ya que, sólo con ligeros cambios de contenido de humedad, la medida cambia apreciablemente. La determinación de uranio en matrices geológicas por esta técnica no requiere tratamiento químico previo, únicamente la reducción de tamaño; sin embargo, los límites de detección son de alrededor de 60 mg / kg hasta 200 mg / kg lo cual no es apto para la medida de anomalías radiométricas con altos contenidos de uranio [148].

4.4. Fluorimetría

La técnica de fluorimetría, inicialmente realizada en el Row Materials Development Laboratory de Estados Unidos [120], aprovecha la coloración de un complejo de uranilo formado por la adición de un reactivo durante el análisis. Éste complejo emite una coloración verde que se puede cuantificar a $\lambda = 337$ nm, para lo cual es necesario la separación de interferencias que se realiza con una extracción en acetato de etilo y posterior digestión ácida liberando entre el 10 y el 100 % de uranio por éste tratamiento [146].

4.5. Espectrofotometría UV-Vis

La técnica espectrofotométrica UV-Vis usa el complejo de uranio (IV) con el tributil fosfato (figura 4-4) para realizar la medida. Éste complejo necesita tratamiento previo y control de pH con nitrato de sodio 6 M y ácido nítrico separando el uranio de los otros iones que pueden causar interferencias. La región de absorción se encuentra de 210 a 350 nm. Bernice *et. al.* [149] alcanzó una cuantificación de $0,05 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ de solución con configuraciones de camino óptico (b) de 5 cm.

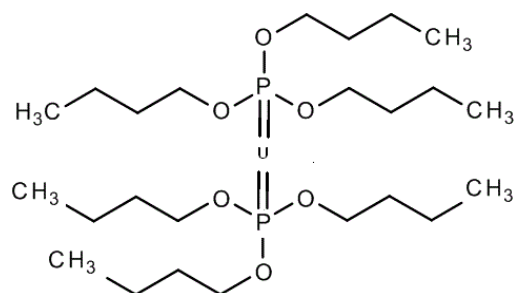


Figura 4-4.: Complejo formado por el tributilfosfato con el U (IV)

4.6. Gravimetría y volumetría

La determinación gravimétrica y volumétrica se basa en la medida de la masa de un producto, mediante el cual se calcula la cantidad de analito que hay en una muestra [150]. Éste tipo de determinación gravimétrica para uranio en una muestra de tipo geológica requiere la transformación del mineral en óxido de uranio (U_3O_8), lo cual implica varios pasos como la lixiviación [123] para obtener el nitrato de uranilo hexahidratado $UO_2(NO_2) \cdot 6H_2O$ que es soluble en agua [151] y torna a una solución triboluminiscente¹ fácilmente determinable por el analista. Como la muestra proveniente de campo tiene dificultades para la extracción y purificación del U_3O_8 , ésta técnica no es recomendable en su determinación.

4.7. Conteo de Neutrones Retardados

Los neutrones retardados son producto del decaimiento de los productos de fisión provenientes de un evento de fisión nuclear del ^{235}U . James Chadwick [152] en 1932 realizando la interpretación de la reacción nuclear de partículas alfa en boro y berilio probó experimentalmente la existencia del neutrón, de carga nula y peso atómico muy cercano a la unidad de masa atómica. Estos neutrones provienen del decaimiento β^- de sus emisores y pueden dividirse en 6 grupos precursores (DNP) como se muestra en la ecuación 4-4, sus períodos de emisión van desde algunas décimas de segundo hasta algunos minutos [153]. Su velocidad de decaimiento determina el tiempo de retardo del grupo particular de neutrones que se emite

¹hace referencia a la luminiscencia resultante del roce entre sí de la superficie de algunos compuestos por vía térmica

inmediatamente y sirve para realizar la detección de manera más confiable [36].

$$DNP(t) = \sum_{j=1}^6 A_j e^{-\sigma_j t} \quad (4-4)$$

Donde:

- σ_j : Constante de decaimiento media del grupo precursor
- A_j : Variable de la ecuación que determina velocidad de fisión del grupo, densidad atómica y la probabilidad de que un grupo precursor tenga una reacción de fisión.
- t : tiempo de irradiación de la muestra

Para efectos de utilización en el sistema de Conteo de Neutrones Retardados (CNR), se recomiendan los neutrones de tipo térmico, que interactúan con el núcleo del ^{235}U produciendo el evento de fisión; los rápidos e intermedios, debido a su velocidad, no interactúan con la materia, simplemente atraviesan el material y salen del sistema sin ser detectados. En la tabla 4-3 se muestra la clasificación de los neutrones por su energía.

Tipo de Neutrón	Energía
Rápido	Entre 200 y 10 MeV
Intermedio	Entre 200 keV y 0.4 eV
Térmicos o lentos	Asociados con la agitación térmica de un sistema $E \approx kT$ (Generalmente a 0,025 eV, pero depende de la temperatura)
Fríos	Del orden de los meV
Ultra fríos	Del orden de los μeV

Tabla 4-3.: Clasificación de los neutrones por su energía [154].

4.7.1. Interacción de los neutrones con la materia

Los neutrones son partículas de una gran eficacia para la producción de reacciones nucleares, pues como carecen de carga eléctrica, no están sujetos a efectos de repulsión electrostática, atraviesan los electrones y penetran en el núcleo sin dificultad [154]. La interacción entre neutrones y núcleo puede darse por dispersión y absorción. En la dispersión la característica es el intercambio de energía entre las partículas que colisionan, permaneciendo libre el neutrón dentro del proceso. Por el contrario, la absorción es una interacción en la cual el neutrón se retiene en el núcleo formándose una nueva partícula compuesta.

Si en el proceso de absorción se mantiene el principio de la conservación de la energía cinética, éste se llama **dispersión elástica** y se representa esquemáticamente como (n,n) donde el núcleo resultante es el mismo blanco original y no hay ningún tipo de activación análogamente a las colisiones de las bolas de billar [155]. Por otra parte, se considera **dispersión inelástica** si el neutrón que colisiona con el núcleo y es absorbido, se excita y luego emite un neutrón con una energía cinética menor, quedando el blanco en un estado excitado emitiendo radiación γ [155]. Las reacciones son del tipo (n, γ) en la cual un núcleo blanco captura un neutrón formando un núcleo compuesto que queda excitado, estable y emite radiación γ de la siguiente forma:



4.7.2. Sección eficaz

La sección eficaz σ es la constante de proporcionalidad para la ecuación 4-6 de densidad de colisiones ψ que representa el número de “eventos” por segundo y cm^3 de corriente colimada de neutrones J (donde J es el número de neutrones que cruza en $1 cm^2$ de superficie perpendicular a la dirección del rayo por segundo) que pega en un material que contiene N núcleos atómicos idénticos por cm^3 [156].

$$\psi = JN\sigma \quad (4-6)$$

La ecuación 4-6 asume que las corrientes de penetración entran al material sin atenuación. La sección eficaz σ tiene unidades de cm^2 definiéndose en términos del barn, como:

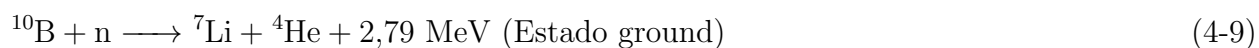
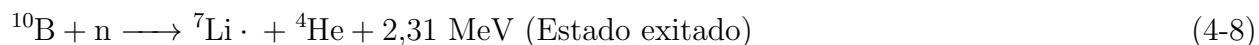
$$1barn = 10^{-24}cm^2 \quad (4-7)$$

La tabla 4-4 muestra los isótopos que poseen una sección eficaz alta para la detección de neutrones, donde los radionúclidos ^{10}B , 3He y 6Li exhiben comportamiento diferente del resto de los isotopos ligeros.

Isótopo	Abundancia (%)	Sección Eficaz neutrónica (barns)
3He	0,037	5327
4He	99,963	–
6Li	7,500	936
7Li	92,500	–
^{10}B	19,800	3840
^{11}B	80,200	–

Tabla 4-4.: Abundancia relativa del helio, litio y boro y secciones eficaces de los isotopos detectores de neutrones

El ^{10}B puede capturar un neutrón liberando energía en una reacción tipo (n, α) como se representa a continuación:



La sección eficaz para las reacciones 4-8 y 4-9 es de 3840 ± 11 barns a una velocidad neutrónica v_0 de $2200 \text{ m} \cdot \text{seg}^{-1}$. En el intervalo de 0 a 10^4 eV el ^{10}B posee un alta sección eficaz neutrónica, indicando que éste isotopo posee un buen comportamiento con respecto a la detección de neutrones. Para neutrones de tipo térmico, el 63 % del proceso se da a través del estado ground con energías de 10 keV y aumenta ligeramente entre 10 y 100 keV [154].

Por su parte, el ^6Li posee una interacción con los neutrones de tipo (n,α) siguiendo la ecuación 4-10. Ésta reacción posee una sección eficaz de 936 ± 6 barn. Su valor alto de energía es ventajoso para la cuantificación de neutrones térmicos de varios cientos de keV.



La interacción del neutrón con el isotopo ^3He ocurre como una reacción tipo (n,p) :



Como en el caso del boro, las interferencias de scattering de la reacción 4-11 son muy bajas; sin embargo, la sección eficaz del ^3He es de 5327 barn, lo cual lo hace más sensible a los neutrones de tipo térmico [157].

4.7.3. La fisión inducida del ^{235}U

Para realizar la cuantificación del contenido de uranio de una muestra por medio del conteo de neutrones retardados es necesario efectuar la fisión del núcleo del isótopo ^{235}U obteniendo productos de fisión que a su vez decaen produciendo radiación β^- y neutrones retardados. En éste proceso, un neutrón proveniente de una fuente de neutrones choca con un átomo de ^{235}U de la muestra, se forma el ^{236}U e inmediatamente se fisiona en 2 fragmentos llamados los productos de fisión produciendo 2 o 3 neutrones, aunque no siempre se producen los mismos productos de fisión y la misma cantidad de neutrones [157]. La fisión nuclear da lugar a un número muy amplio de productos de fisión, apareciendo inicialmente unos 80 productos de fisión elementales que dan origen a cerca de 200 isótopos radiactivos [158]. La probabilidad de encontrar un producto de fisión determinado en éste tipo de reacciones depende de la partícula incidente y el núcleo a fisionar. La figura 4-5 muestra la representación del porcentaje de elementos que aparecen en la fisión en función del número másico de sus productos.

Esta figura indica que los fragmentos de fisión no son de igual masa molecular, sino que es más probable que se produzca un radionúclido ligero y uno pesado dando origen a la asimetría en la distribución de masas de los productos de fisión [156]. Asimismo la figura 4-5 muestra las probabilidades para la fisión rápida y térmica.

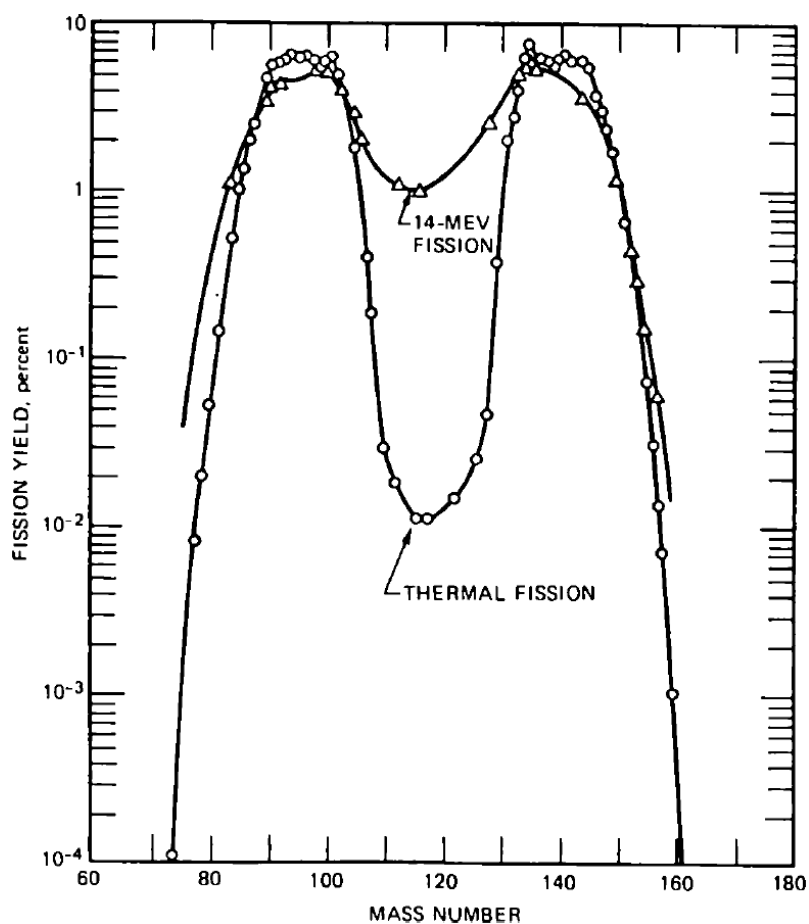


Figura 4-5.: Rendimiento de los productos de fisión del ^{235}U [157].

Debido a que el núcleo fisionado es un núcleo pesado, sus productos de fisión nuclearmente son inestables por tener una elevada cantidad de neutrones con respecto a protones en su núcleo. La desintegración por emisión β^- y emisión de neutrones se observa en la figura 4-6 [33]. Por ejemplo el $^{87}_{35}\text{Br}$ que tiene una vida media de 55 segundos, emite una partícula β^- y queda en un nivel energético aún inestable pero no con la suficiente energía para emitir un neutrón u otra partícula β^- , emitiendo radiación γ y un isótopo estable que es el $^{87}_{36}\text{Kr}$. Si

por el contrario el sistema toma el otro camino emitiendo una partícula β^- de menor energía que la primera, queda en un estado energético aún inestable pero de mayor energía que si se fuese por la primera opción liberando finalmente un neutrón de forma instantánea para producir el isótopo $^{86}_{36}\text{Kr}$ [33].

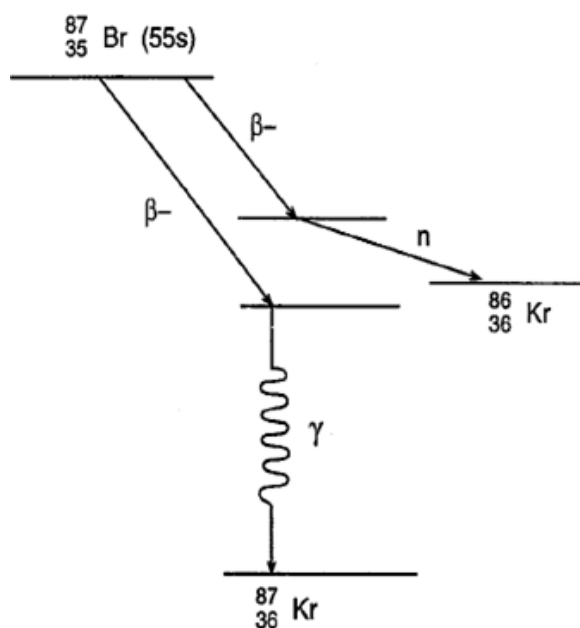


Figura 4-6.: Niveles energéticos y de decaimiento del $^{87}_{36}\text{Kr}$ [33].

El neutrón emitido del estado inestable del isótopo $^{87}_{35}\text{Br}$ producto de la fisión del ^{235}U se llama **neutrón retardado** el cual fácilmente se detecta por un contador proporcional de $^{10}\text{BF}_3$ o ^3He para la cuantificación de uranio total en la muestra. Los neutrones retardados se clasifican en función del tiempo que tardan sus productos de fisión en desintegrarse en varios grupos o fracciones sobre el total de diferidos, como se muestra en la tabla 4-5 para los 6 grupos precursores indicando la nomenclatura del grupo, su vida media y la fracción de emisión β_i con respecto al total de la fisión [32]. Para el caso del Conteo de Neutrones Retardados los 3 primeros grupos (junto con el cuarto, inclusive) son los que se utilizan para realizar el conteo a condiciones normales.

Vladimir Piksaikin [159] muestra un esquema de 8 grupos basándose, entre otras cosas, de

Grupo	Vida media (s)	Fraccion de neutrones retardados ($\times 10^{-4}$)	Energía media (MeV)
1	55,60	2,15	0,25
2	22,70	14,24	0,46
3	6,22	12,74	0,41
4	2,30	25,68	0,45
5	0,61	7,48	0,41
6	0,23	7,63	–
Total	–	65	–

Tabla 4-5.: Modelo de los 6 grupos precursores de neutrones retardados

la contribución dominante a tiempos de decaimiento que no se cuenta en el modelo de 6 grupos. Cuando se comparan teóricamente los resultados, el modelo de Piksaikin produce consistentemente un error mas bajo asociado con el conteo que se indica en la tabla 4-6.

4.7.4. El contador proporcional BF_3

Uno de los detectores por excelencia usados en la cuantificación de neutrones térmicos es el contador proporcional de BF_3 que sirve como material blanco para la reacción de neutrones por medio de la reacción tipo $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ y como gas de conteo de neutrones [160]. El gas se enriquece en el isótopo $^{10}\text{BF}_3$ ya que incrementa la sensibilidad del conteo hasta en 5 veces que si se usara en isótopo $^{11}\text{BF}_3$ [157]. Este detector está fabricado en forma cilíndrica como se muestra en la figura 4-7 y está compuesto de acero inoxidable, aluminio o cobre que sirven como cátodo y posee un filamento de níquel o tungsteno en el centro del tubo que es el ánodo. El intervalo de operación de éstos contadores es usualmente 2000 a 2500 V con un diámetro de filamento anódico de 0,05 mm como se muestra en la figura 4-8 [157] indicando los valores típicos de voltaje para los cuales la derivada de las cuentas (en 30 segundos de conteo con una fuente de neutrones térmicos) con respecto al voltaje se hace mínima. Ésta

Grupo	Precursor	Vida media (s)	Abundancia	Promedio vida media (s)
1	^{87}Br	55,600	0,0330	55,600
2	^{137}I	24,500	0,1780	24,500
3	^{88}Br	16,300	0,1110	16,300
4	^{138}I	6,460	0,0460	5,210
	^{93}Rb	5,930	0,0240	
	^{89}Br	4,380	0,1010	
5	^{94}Br	2,760	0,1620	2,370
	^{139}I	2,300	0,0460	
	^{85}As	2,080	0,1070	
	$^{98\text{m}}\text{Y}$	2,000	0,0880	
6	^{93}Kr	1,290	0,0048	1,040
	^{144}Cs	1,000	0,0070	
	^{140}I	0,860	0,0052	
7	^{91}Br	0,542	0,017	0,424
	^{95}Rb	0,384	0,049	
8	^{96}Rb	0,203	0,0170	0,195
	^{97}Rb	0,170	0,0052	

Tabla 4-6.: Modelo de los 8 grupos precursores de neutrones retardados [159].

region se escoge por estabilidad de la señal por pequeños aumentos o disminución de voltaje durante la operación [31, 157].

El contador proporcional BF_3 puede discriminar entre los pulsos inducidos por detección de neutrones térmicos y los pulsos resultantes de radiación γ . En la figura 4-9 se muestra el

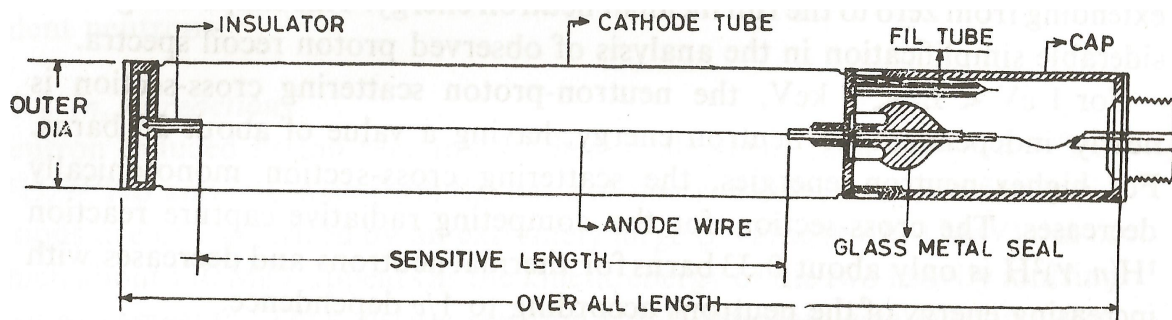


Figura 4-7.: Corte transversal esquemático del contador proporcional BF_3 [157].

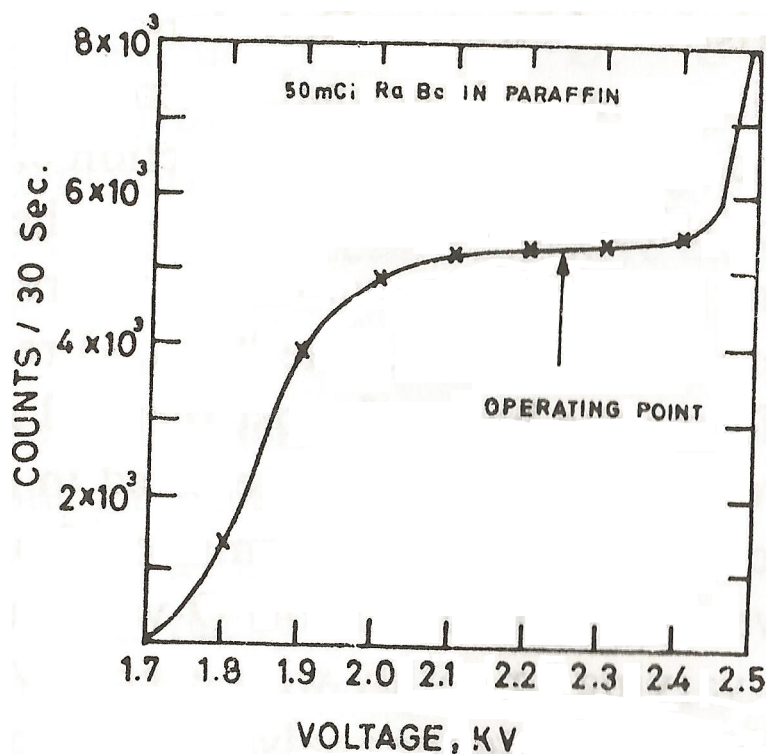


Figura 4-8.: Intervalo de operación típico de un detector BF_3 [157].

espectro de neutrones con una interferencia de un flujo de radiación γ alto [157]. A bajas energías, se pueden observar algunos artefactos asociados con interacciones de la radiación γ y ruido electrónico. El efecto pared puede apreciarse en la parte media del gráfico [161]. Finalmente se observa a 2,31 y 2,79 MeV los picos asociados con las reacciones 4-8 y 4-9 [156, 161].

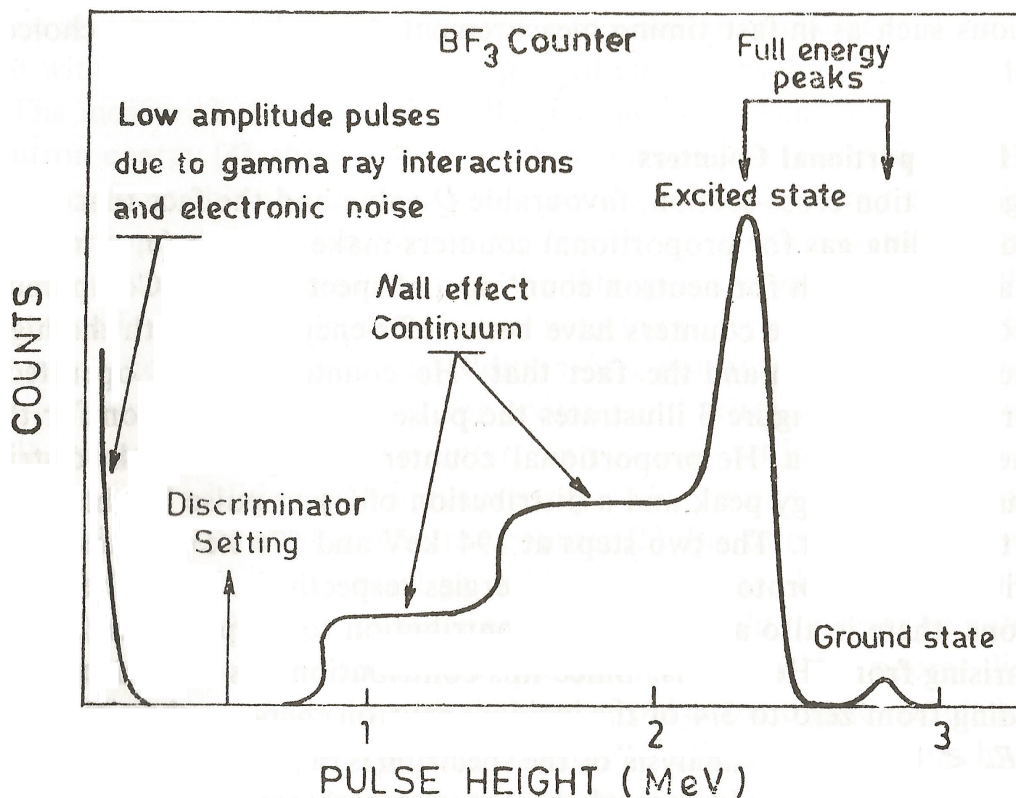


Figura 4-9.: Espectro de neutrones típico del contador BF₃ [157].

El detector, contador proporcional de BF₃, es la parte principal en la cuantificación de uranio debido a que esos neutrones que se detectan e identifican sirven para determinar el número de cuentas del espectro que es proporcional al número de neutrones retardados de los productos de fisión; dicha fisión se produce por una fuente de neutrones que hace dividir el ²³⁵U proveniente de la muestra, que con su respectiva relación isotópica, se calcula el contenido de uranio total de una muestra en un territorio específico. Con un adecuado muestreo en las zonas estratégicas, puede realizarse una prospección más detallada que con equipos de campo convencionales.

4.7.5. Cuantificación analítica y error en la medida

El número de cuentas provenientes de los neutrones emitidos por los precursores de la fisión del ²³⁵U es necesario para conocer la concentración de uranio que se complementa con la

curva de calibración respectiva de la química analítica convencional, con materiales de referencia con contenidos certificados de uranio, como solución para determinar la cantidad del elemento a partir de las cuentas. Dicha curva, para la técnica de Conteo de Neutrones Retardados, debe simular la matriz que contenga la muestra de uranio [162] o al menos tener la certeza de que no existan elementos fisionables por neutrones en el material.

Hay una diversidad de parámetros que afectan el Conteo de Neutrones Retardados, algunos no son competencia del laboratorio como la calidad en el muestreo (el laboratorio lo podría realizar, pero en este trabajo se habla de parámetros en el sistema CNR) y la caracterización del flujo neutrónico ya sea de un reactor nuclear o de otra fuente de neutrones; sin embargo, los que más perjudican la medida de uranio y su optimización para resultados verídicos y con un alto grado de confianza se describen a continuación

1. Preparación de la muestra: el tamaño de partícula es fundamental para obtener resultados con mayor precisión y bajos límites de detección; para tamaños pequeños de partícula se logra una adecuada homogenización y mayor número de cuentas [163]. Por lo tanto, la preparación de la muestra debe incluir ensayos con diferente tamaño de partícula tanto para la muestra a analizar como para la referencia certificada, manteniendo constante el tiempo del análisis. Se recomienda hacer varias repeticiones para calcular el promedio de cuentas netas y su respectiva desviación estándar calculando la precisión del ensayo.
2. Variaciones de tiempo: se debe tener cuidado con los registros de tiempo de irradiación t_{Ir} , tiempo de decaimiento t_d y tiempo de lectura t_l . Para valores de 5 gramos, Kunzendorf *Et. al.* [164] encontraron valores de $t_{Ir} = 20$ s, $t_d = 5$ s y $t_l = 10$ s para un flujo neutrónico de $2,1 * 10^{13}$ n/cm²*s. Se debe conocer específicamente el tiempo de irradiación y realizar medidas de optimización de tiempo de decaimiento (el tiempo que tarda la muestra desde el momento exacto que sale del reactor nuclear hasta que empieza el conteo) y tiempo de lectura de la muestra.

3. Variaciones de masa de estándar y muestra problema: cuando se irradia una masa de estándar se debe analizar la misma cantidad de muestra problema debido a que el conteo depende de la cantidad irradiada para lo cual se deben realizar variaciones de masa de estándar y de muestra problema y apuntar a disminuir significativamente los tiempos t_{Ir} , t_d y t_l [162].
4. Efectos de tiempo muerto: el tiempo muerto τ representa el tiempo de inoperatividad del detector originado al pasar una partícula que crea la señal limitando la capacidad del recuento [165], depende de su diseño, del voltaje aplicado, del circuito externo y del gas utilizado. Es una cantidad dada y el usuario no tiene acceso a cambiar su valor; sin embargo, cuando la rapidez de conteo con el detector es grande, se producen muchos pulsos cercanos, uno al otro, existiendo la posibilidad de solapamiento de la señal dando lugar a una lectura errónea [165, 166]. Para calcular el tiempo muerto se puede usar el experimento de las 2 fuentes que consiste en obtener las cuentas r_1 y r_2 de dos fuentes de actividad conocida; posterior a esto se procede a medir las cuentas de las 2 fuentes juntas y se mide $r_{1,2}$, y con esto se cumple que [165]:

$$\tau = \frac{r_1 r_2 \sqrt{r_1 r_2 (r_{1,2} - r_1)(r_{1,2} - r_2)}}{r_1 r_2 r_{1,2}} \quad (4-12)$$

5. Isótopos que absorben neutrones y neutrones provenientes de otros isótopos: existen isótopos que producen neutrones en el sistema, entre los cuales se encuentran el berilio y el litio. El berilio produce neutrones a partir de una reacción (γ, n) de la siguiente manera:



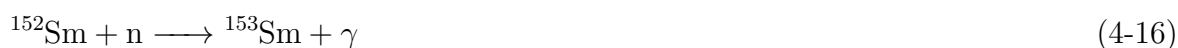
La reacción se produce por radiación γ superior a 2.23 MeV [162].

La presencia de litio en la muestra aumenta el conteo de neutrones debido a que es un precursor de tritio que usa el ${}^{17}\text{N}$ para su producción causando interferencias debido a que es detectado por el BF_3 de la siguiente forma:





Dentro de los isótopos que absorben neutrones se encuentran principalmente el boro, el samario y el gadolinio. El ^{10}B posee una sección eficaz neutrónica de 3840 barn y el ^{157}Gd de 240000 barn; razón por la cual la presencia de éstos isótopos disminuye la tasa de conteo [167]. El samario sufre un reacción (n, γ) de la siguiente forma



La tabla 4-7 muestra las contribuciones neutrónicas de los elementos que interfieren en el Conteo de Neutrones Retardados; se puede apreciar que el berilio es el elemento que más aporta neutrones al sistema (mostrado en la figura 4-10) y el gadolinio el que más neutrones absorbe.

Elemento	Intervalo de variación de medida (ppm)	$\Delta U/U$ (% de conteo por cada 1000 ppm)
Be	0 - 4000	+ 0,88
Li	0 - 50000	+ 0,13
B	0 - 10000	- 2,68
Sm	0 - 20000	- 2,24
Gd	0 - 5000	- 10,19

Tabla 4-7.: Variaciones de conteo de neutrones frente a diferentes elementos [162].

Para optimizar estos parámetros debe conocerse la matriz que acompaña al uranio en la muestra usando la fluorescencia de rayos X, análisis por activación neutrónica instrumental o espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo y crear un blanco el cual puede construirse con sílica gel en polvo y óxidos o hidróxidos de los elementos presentes en la muestra, realizando el análisis del blanco para determinar su

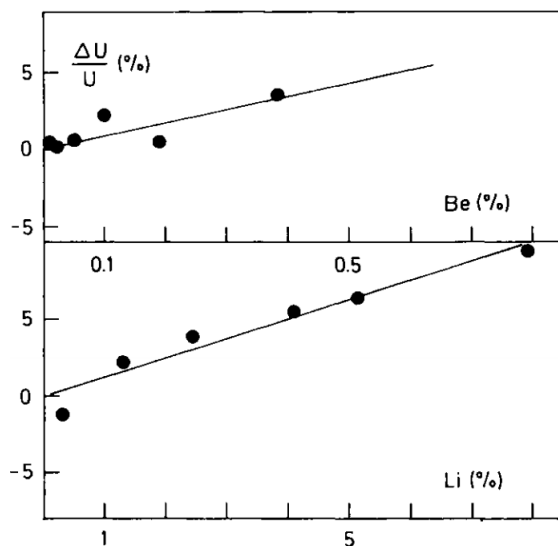


Figura 4-10.: Contribución del Be y Li en el CNR [162].

contribución en el sistema electrónico y finalmente restar las cuentas cuando se analice la muestra.

4.8. El laboratorio de neutrones retardados del SGC

El Servicio Geológico Colombiano cuenta con un laboratorio de Conteo de Neutrones Retardados el cual es una instalación única en el país y hace parte del grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas (GIANG) de la Dirección de Asuntos Nucleares (DAN) como se muestra en la figura 4-11. El laboratorio posee todo el sistema electrónico para la detección de los neutrones retardados producidos por la fisión del ^{235}U de las muestras provenientes de proyectos internos donde el cliente potencial es el eje temático de exploración de uranio del grupo de Investigación y Exploración de Recursos Minerales Energéticos del SGC, el cual realiza anualmente exploraciones de los minerales de uranio en zonas del territorio colombiano, como se mostró en la tabla 3-4. Pueden existir otros clientes como grupos de geoquímica inorgánica de uranio y torio, análisis de elementos radiactivos en materiales de construcción y control de calidad de combustibles nucleares.

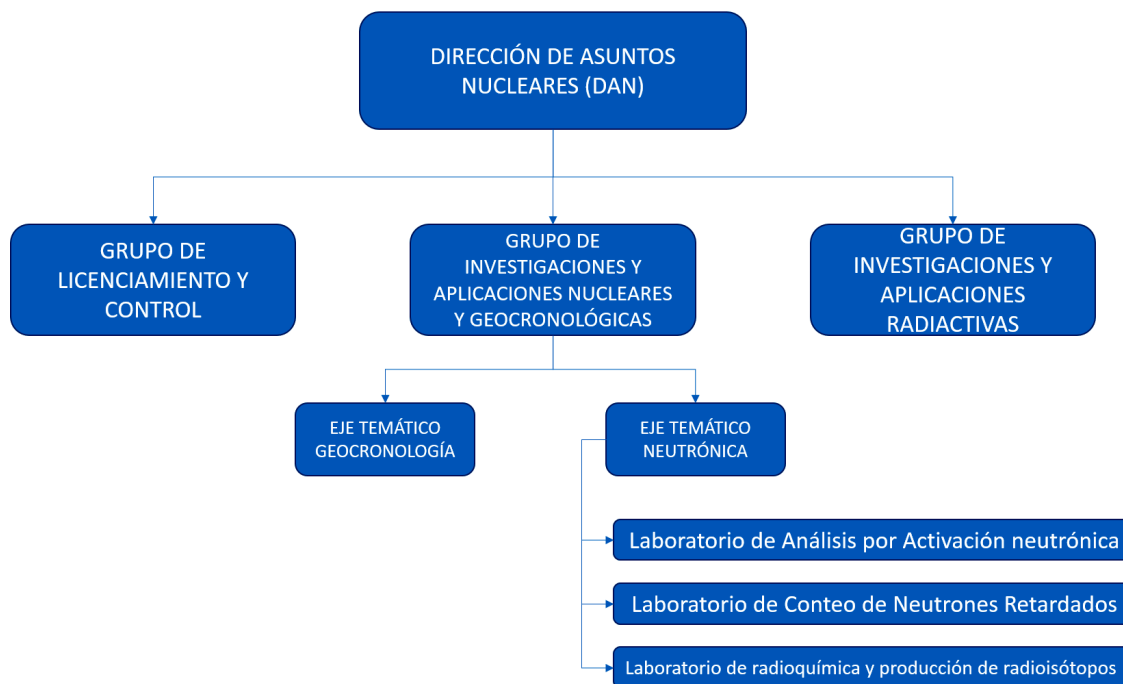


Figura 4-11.: Organigrama de ubicación del laboratorio en la DAN

Actualmente, el eje temático de neutrónica posee profesionales de las áreas de Química, física e ingeniería con estudios de posgrado de temas asociados con instrumentación nuclear, aplicaciones y planes de manejo ambiental de materiales radiactivos que, junto con experiencia en el área, garantizan la idoneidad de manejo de muestras y datos para la calidad en su interpretación. El personal de este eje temático trabaja además en el Laboratorio de Análisis por Activación Neutrónica y está actualmente desarrollando la validación de metodologías para diferentes elementos, así como en el laboratorio de producción de radioisótopos que prestará los servicios de producción de ^{24}Na , ^{198}Au , ^{82}Br , ^{153}Sm , ^{140}La y ^{165}Dy que son radionúclidos utilizados como radiotrazadores con múltiples aplicaciones en medicina nuclear, hidrogeología y física nuclear.

La visión del Servicio Geológico Colombiano establece que para el año 2023 será reconocido nacional e internacionalmente como entidad líder en investigación y generación de conocimiento geocientífico y aplicaciones nucleares, entregando productos y servicios de impacto para el desarrollo del país [168]. Uno de sus reconocimientos principales es el de impulsar

el desarrollo de las tecnologías nucleares en Colombia a través del reactor nuclear y sus laboratorios asociados como el laboratorio de Conteo de Neutrones Retardados que será una instalación de referencia a nivel latinoamericano en determinaciones de contenidos de minerales energéticos. En el país, será importante para el levantamiento del mapa con zonas uraníferas identificando sus contenidos reales, zonas de interés para la explotación y minerales asociados que pueden dar valor agregado y de ésta manera, posicionar mejor el país frente a la negociación de la extracción y pago de regalías con las empresas contratistas.

4.9. Conclusiones

1. La importancia de adecuar un laboratorio de neutrones retardados para determinar el contenido de uranio de muestras geológicas es alta, ya sea como parte de la visión del Servicio Geológico Colombiano como atendiendo normatividades colombianas de conocer la cantidad y la calidad de mineral de uranio para el progreso del país.
2. El eje temático de neutrónica del GIANG se debe consolidar como centro de referencia en el país en temas relacionados con teoría y aplicaciones de los neutrones y debe ser un centro de estudios especializado en análisis no destructivos de muestras geológicas para consolidar el mapa geológico colombiano a escala 1:25000 de tierras raras, especialmente minerales estratégicos.

5. La protección radiológica asociada con el conteo de neutrones retardados

Para comprender el análisis de protección radiológica, el grado de peligrosidad de la instalación y su clasificación, se realiza un análisis proveniente de cálculos computacionales, tanto en radiación γ como en radiación neutrónica, que son las partículas que más poder de ionización producen cuando salen de la muestra irradiada. El interés es determinar la dosis que produce la interacción de las radiaciones con la materia en los diferentes puntos de la instalación del CNR, ya que los neutrones son partículas indirectamente ionizantes, es decir, partículas sin carga, las cuales primero transfieren su energía a una partícula cargada en la materia y la liberan causando daños al tejido humano.

5.1. Cálculos para radiación γ incidente

La aproximación teórica al cálculo de la actividad de cada radionúclido durante el desarrollo de una práctica normal del CNR se realizó tomando como base el análisis de diferentes muestras que ejemplifican la composición promedio en la corteza terrestre de matrices objeto de análisis como rocas, suelos y sedimentos. Para éste análisis se usaron las muestras de referencia certificadas IAEA 312 (muestra de suelo con altos contenidos de U, Th, y ^{226}Ra), CLB-1 (Carbón de la mina Lower Bakerstown, Estados Unidos) y NIST 950a (Óxido de uranio, 99.94 % de pureza). Para la clasificación de la peligrosidad de la práctica, se calculan las actividades de éstos materiales de referencia y se comparan con los niveles de exención

aceptados internacionalmente [169]. Las actividades teóricas fueron calculadas a partir de la composición elemental certificada correspondiente a 1,0 g de muestra de referencia, 40 segundos en una fuente de neutrones asumiendo valores de flujo neutrónico normales para un reactor nuclear de investigación de baja potencia [170]. Para determinar la actividad teórica de cada radionúclido, se emplea la ecuación general de activación:

$$A = nN_A\Phi\sigma f(1 - e^{-\lambda t}) \quad (5-1)$$

donde A es la actividad producida, en Bq; n equivale al número de moles del núclido blanco; N_A es el número de Avogadro; σ es la sección eficaz del núclido blanco, en barns (10^{-24} cm^2); Φ es el flujo de neutrones térmicos, en $\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$; f es equivalente a la abundancia isotópica del núclido blanco; λ es la constante de desintegración del núclido radiactivo formado y es igual a $\ln 2/T$; t es el tiempo de irradiación, en horas y T es el período de semidesintegración del radionúclido producido, en horas [155].

La actividad calculada de acuerdo con la ecuación 5-1 para cada material de referencia y radionúclido con su nivel de exención (actividad mínima para que el material no cause daños) se muestra en las tablas A.1., A.2. y A.3. del Anexo A. El análisis de categorización de las fuentes obtenidas se realizó de acuerdo con lo estipulado en el documento *Categorización de Fuentes* de la Resolución 9-0874 de 2014 expedida por el Ministerio de Minas y Energía [171], en la cual se establece que para “prácticas en donde existan varias fuentes que se encuentren muy próximas entre sí” (como ocurre en el caso de la práctica en cuestión), “el conjunto de fuentes, para los fines de su categorización, será considerado como una sola fuente, utilizando la siguiente fórmula para su agregación”:

$$\left(\frac{A}{D}\right)_{\text{Agregado}} = \sum_n \frac{\sum A_{i,n}}{D_n} \quad (5-2)$$

Donde $A_{i,n}$ es la actividad de cada fuente individual (i) de un radionúclido n y D_n es el valor D para el radionúclido n.

La determinación de la categoría a la que pertenece la práctica del CNR sigue los lineamientos establecidos en la Resolución 18-0052 de 2008 del Ministerio de Minas y Energía [171], teniendo en cuenta el cálculo de la razón entre la actividad del radionúclido (A) y el valor D (descrito anteriormente), lo cual permite establecer las cinco categorías relacionadas en la tabla 5-1.

Categoría	Proporción de actividad
1	$A/D \geq 1000$
2	$1000 > A/D \geq 10$
3	$10 > A/D \geq 1$
4	$1 > A/D \geq 0,1$
5	$0.01 > A/D$ y $A > \text{Exención}$

Tabla 5-1.: Límites de A/D para clasificar prácticas radiactivas [171].

La tabla 5-2 muestra los resultados de las actividades de los 3 patrones a un flujo neutrónico de $2,5 \cdot 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ apreciando que, a las condiciones de flujo, tiempo de irradiación y distancia dadas, los 3 estándares analizados poseen la categoría más baja de peligrosidad de fuentes radiactivas (categoría 5). Es importante notar que las categorías 4 y 5 no necesitan licencia de manejo de material radiactivo por parte de la entidad reguladora (que es el Servicio Geológico Colombiano, y el Ministerio de Minas y Energía para las instalaciones propias del SGC), únicamente una autorización para realizar la operación y la demostración que no existe riesgo que merezca una categorización más alta para la práctica.

Estándar	Valor A/D	Nivel de categorización
IAEA 312	$1,02 \cdot 10^{-8}$	5
CLB-1	$4,57 \cdot 10^{-10}$	5
NIST 950a	$5,5 \cdot 10^{-4}$	5

Tabla 5-2.: Categorización de los estándares irradiados.

5.2. Cálculos Monte-Carlo para dosis de neutrones

Para realizar el cálculo de la dosis adquirida mediante neutrones debe conocerse su transporte en el sistema de interés aplicando el método de Monte Carlo para partículas con masa y encontrando su densidad (x) mediante la siguiente ecuación [172]:

$$x(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = C(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}, t) T(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, E, \vec{\Omega}) x'(\vec{r}', E', \vec{\Omega}', t) \quad (5-3)$$

En donde $x(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ es la densidad de partículas que abandonan una fuente o emergen de una colisión en las coordenadas \vec{r} , dirección $\vec{\Omega}$, a un tiempo t y una energía E ; $C(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}, t)$ es un operador de colisión que indica que una partícula en las coordenadas \vec{r} , choca y cambia su dirección de $\vec{\Omega}'$ a $\vec{\Omega}$ y su energía de E' a E ; $T(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, E, \vec{\Omega})$ es el operador de transporte, que traslada una partícula desde una posición \vec{r}' hasta la nueva coordenada \vec{r} con una dirección $\vec{\Omega}$ a energía constante y el último término es la densidad de las partículas iniciales como se muestra esquemáticamente en la figura 5-1 [172].

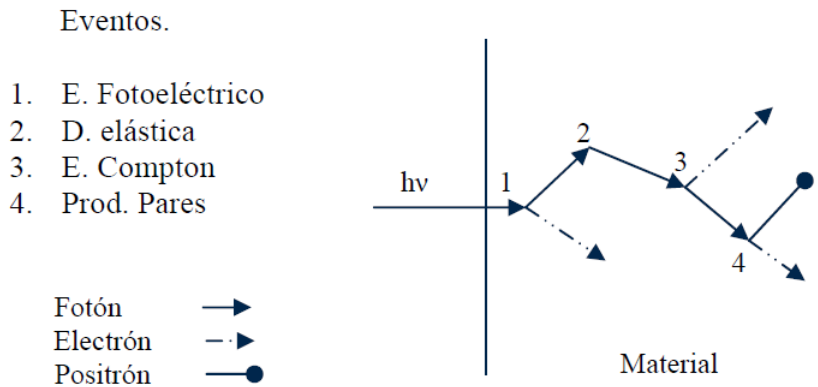


Figura 5-1.: Esquema de la simulación de una secuencia de eventos neutrónicos [173].

El método comienza calculando mediante procesos aleatorios la probabilidad de que la partícula exista, consecuentemente se crea su energía, su posición y la dirección inicial de la trayectoria, tomando en cuenta que las partículas son independientes entre sí. Posteriormente, se simula la distancia libre media que recorre antes de interactuar y generar un tipo específico de colisión; la energía y la dirección de las partículas dispersadas también se simulan y se evalúa la totalidad del proceso hasta que alcanza una condición terminal depositando

completamente la energía en el sistema [173].

El programa MonteCarlo N-Particle (MCNP) es una herramienta de cálculo poderosa para analizar el funcionamiento de un sistema de tipo nuclear [174]. Actualmente, existen muchos tipos de programas que realizan simulación de transporte de neutrones, uno de ellos es el código Geant4, el cual simula el mismo transporte de neutrones que MCNP, con la ventaja de que es software libre, a diferencia de MCNP que es licenciado. Éstos programas permiten considerar distintos modos de simulación de transporte de partículas ya sea individuales o combinados [175]. Las áreas específicas de aplicación incluyen protección radiológica y dosimetría, radiografía, física médica, seguridad nuclear, cálculos de flujos neutrónicos entre otros [174] calculándose numerosos parámetros de protección radiológica debido a la amplia variedad de análisis mundialmente reconocidos.

GAMOS es un ambiente de simulación basado en Geant4 el cual es fácil de usar ya que el lenguaje de secuencias de comandos integrales hace fácil poner en práctica los requisitos de una aplicación de física nuclear sin necesidad de codificación de C ++ (que es el lenguaje madre de Geant4) [176]. El diseño modular simple, la documentación detallada y al conjunto de ejemplos y tutoriales facilitan la ampliación de las aplicaciones permitiendo explotar al máximo la flexibilidad de Geant4, mediante la creación de nuevo código de usuario [176].

La simulación del blindaje para la práctica de Conteo de Neutrones Retardados se realizó con el software GAMOS y el archivo de entrada (input) se muestra en el anexo B.2. Para las condiciones generales del archivo de entrada se consideran los siguientes aspectos:

- Cilindro de radio 3,5 cm y altura 3 cm que abarca la totalidad de la muestra. La figura **5-2** muestra la geometría cilíndrica del material que equivale al cilindro formado por 1 gramo de óxido del estándar NIST 950a.
- Cubo de aire de 7 cm³ que abarca a la totalidad de la muestra.

- Cubo de parafina borada que contiene al cubo de aire de 80 cm³
- Universo definido como las dimensiones del laboratorio.

Para verificar que las condiciones iniciales están bien establecidas, se realiza la simulación con 1 solo evento (1 neutrón) asegurando que el archivo de entrada no tiene problemas y confirmando la geometría del sistema (figura 5-2).

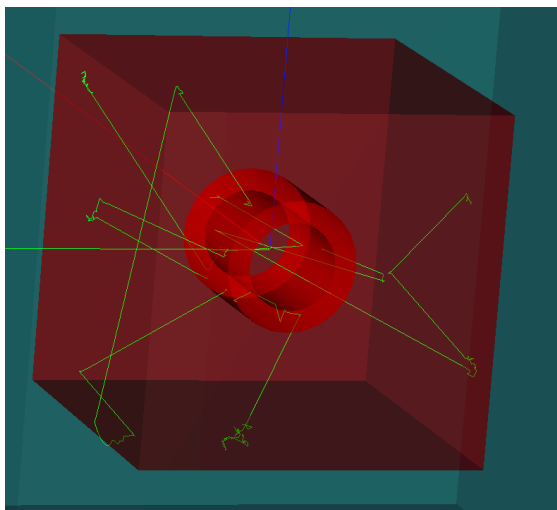


Figura 5-2.: Verificación de geometría en GAMOS.

La simulación se realizó para distancia 0 (a contacto con el blindaje) y aumentando la medida cada 30 cm hasta llegar a la pared del cuarto. Los resultados de la simulación del proceso indican que los neutrones no salen del blindaje de parafina borada como se muestra en la figura 5-3, lo que significa que un Trabajador Ocupacionalmente Expuesto (TOE) puede permanecer a poca distancia del blindaje y no recibir radiación proveniente de los neutrones emitidos por la muestra irradiada asegurando su protección lo cual es benéfico porque no se necesita dosimetría para neutrones en la práctica de CNR.

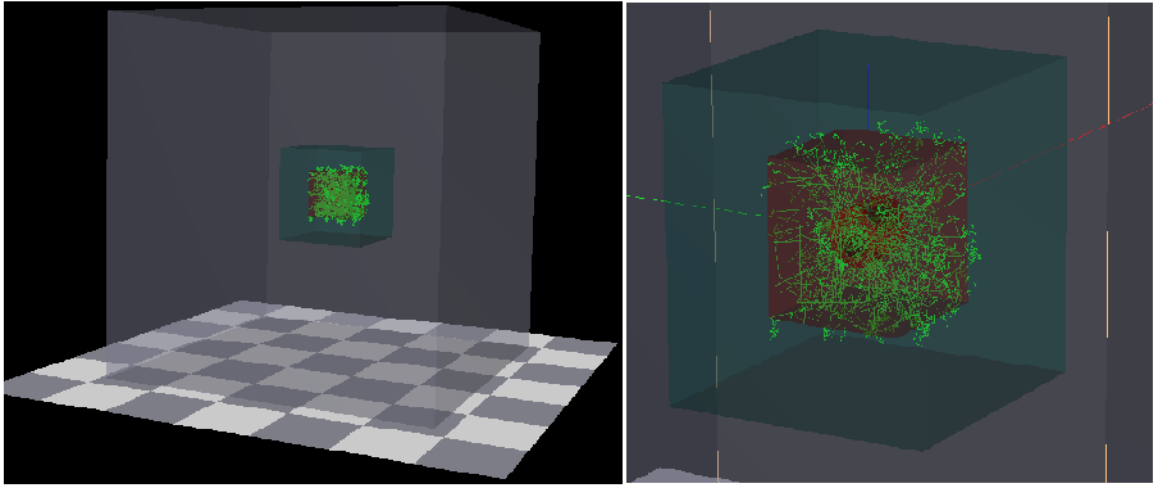


Figura 5-3.: Resultados de la simulación.

5.3. Conclusión

La práctica tiene la menor peligrosidad radiactiva establecida por la autoridad reguladora dado que la parafina borada garantiza el blindaje para que ningún neutrón proveniente de la muestra irradiada salga del sistema asegurando al operador que realiza el análisis.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

1. La energía nuclear es y continuará como protagonista en el ámbito geopolítico a nivel mundial convirtiéndose en la más fuerte competidora energética para que la humanidad pueda desligarse de los combustibles de tipo fósil.
2. La exploración de uranio en Colombia y la investigación en el tema nuclear tuvo un fuerte descenso a raíz de la liquidación del Instituto de Asuntos Nucleares y como consecuencia se perdió información valiosa originada durante la época de oro del IAN, razón por la cual las investigaciones actuales por parte del Servicio Geológico Colombiano son de remembranza de lo que se realizaba en esa época solo que con instrumentación actualizada.
3. El análisis de protección radiológica de la instalación de Conteo de Neutrones Retardados con que cuenta el SGC indica que la radiación γ y los neutrones emitidos de la muestra están en la categorización 5 de peligrosidad de fuentes radiactivas que la hace inocua para su operación por sus bajos niveles de radiación ionizante.

6.2. Recomendaciones

1. El Servicio Geológico Colombiano debe hacer el esfuerzo para capacitar y entrenar al personal que realiza exploración de uranio en temas relacionados con la protección radiológica de fuentes abiertas de radiación por cuanto las muestras con anomalías

significativas tienen dosis asociadas equivalentes a la de un Trabajador Ocupacionalmente Expuesto. Asimismo, el Ministerio de Minas debe regular los requisitos para la seguridad radiológica en explotaciones mineras e instalaciones de uranio y torio o material sin procesar.

2. Debe continuarse con la recopilación de informes de las empresas que realizaron búsqueda de uranio en Colombia y de las investigaciones de lixiviación y procesamiento del mineral que se hicieron antes de 1997 ya que, por la liquidación del IAN, ésta información desapareció y posiblemente las personas o empresas que realizaron éstos estudios conserven copias del material bibliográfico e informes que serían útiles para el Servicio Geológico Colombiano y para el país.

A. Anexo: Actividades calculadas para análisis de categorización de la práctica del CNR

A.1. IAEA-312

Radioisótopo a analizar	Masa del elemento a 1 g de muestra (mg)	Constante de dosis gamma (rem*m ² *h ⁻¹ *Ci ⁻¹)	Actividad (Bq)	Valor D (TBq)	A/D
²²⁶ Ra	1.21*10 ⁻¹⁰	7.83*10 ⁻³	5.74*10 ⁻¹²	0.07	8,2*10 ⁻²³
²³² Th	0.0914	9.57*10 ⁻²	9.11*10 ⁻³	8.0	1.1*10 ⁻⁹
²³⁸ U	0.0165	1.34*10 ⁻¹	5,42*10 ²	0.06	9.0*10 ⁻⁹
Total	0.1079	–	9.65*10 ³	–	1.02*10 ⁻⁸

A.2. CLB-1

Radioisótopo a analizar	Masa del elemento a 1 g de muestra (mg)	Constante de dosis gamma (rem*m ² *h ⁻¹ *Ci ⁻¹)	Actividad (Bq)	Valor D (TBq)	A/D
²³ Na	0.23	1.94	4.08*10 ²	20	2.0*10 ⁻¹¹
²⁶ Mg	0.47	0.54	5.47*10 ²	NR	–
²⁷ Al	15.1	0.88	3.62*10 ⁶	NR	–

³⁰ Si	25.1	$4.8*10^{-4}$	$1.22*10^3$	20	$6.1*10^{-11}$
⁴¹ K	0.76	0.14	$1.71*10^2$	10	$1.7*10^{-11}$
⁴⁴ Ca	2.2	$2.99*10^{-8}$	$2.22*10^{-15}$	100	$2.8*10^{-15}$
⁴⁵ Sc	0.002	1.17	$6.95*10^{-1}$	40	$1.7*10^{-14}$
⁵⁰ Ti	0.78	$2.64*10^{-1}$	$1.67*10^3$	NR	–
⁵¹ V	0.012	$7.61*10^{-1}$	$2.01*10^4$	NR	–
⁵⁵ Mn	0.008	0.92	$8.75*10^2$	20	$4.4*10^{-11}$
⁵⁸ Fe	12.5	0.92	$7.57*10^{-1}$	10	$7.6*10^{-14}$
⁵⁹ Co	0.007	1.37	$1.10*10^{-1}$	30	$3.7*10^{-15}$
⁶⁴ Ni	0.0002	0.30	$1.68*10^{-2}$	20	$8.4*10^{-16}$
⁶⁴ Zn	0.024	0.33	$3.95*10^{-2}$	300	$1.3*10^{-16}$
⁶⁸ Zn	0.009	$4.32*10^{-6}$	$2.39*10^1$	30	$8.0*10^{-13}$
⁷¹ Ga	0.003	1.46	6.55	20	$3.3*10^{-13}$
⁸⁵ Rb	0.004	0.054	$4.07*10^{-2}$	20	$2.0*10^{-15}$
⁸⁷ Rb	0.0014	0.32	2.14	NR	–
⁹³ Nb	0.001	0.98	$8.08*10^{-8}$	30	$2.7*10^{-21}$
¹³⁰ Ba	$3.6*10^{-5}$	0.46	$1.07*10^{-5}$	100	$1.1*10^{-19}$
¹³² Ba	$3.4*10^{-5}$	0.45	$5.16*10^{-7}$	70	$7.4*10^{-21}$
¹³⁸ Ba	0.024	0.028	$4.26*10^1$	NR	–
¹³⁹ La	0.005	1.00	9.34	20	$4.7*10^{-13}$
¹⁴⁰ Ce	0.008	0.073	$4.79*10^{-2}$	20	2.4e-15
¹⁴² Ce	0.001	0.25	$2.94*10^{-2}$	20	$2.9*10^{-15}$
¹⁴⁶ Nd	$8.6*10^{-4}$	0.14	$6.62*10^{-3}$	40	$1.7*10^{-16}$
¹⁴⁸ Nd	$2.8*10^{-4}$	0.30	0.193	10	$1.9*10^{-14}$
²³² Th	0.0014	$9.57*10^{-2}$	$1.39*10^2$	20	$7.0*10^{-12}$
²³⁸ U	0.0005	$1.34*10^{-1}$	$1.81*10^1$	0.06	$3.0*10^{-10}$
⁷⁵ As	0.013	$274*10^{-1}$	$3.44*10^1$	10	$3.4*10^{-12}$
¹²¹ Sb	0.0015	$3.04*10^{-1}$	$7.25*10^{-1}$	70	$1.0*10^{-14}$
Total	60.0	–	$3.65*10^6$	–	$4.57*10^{-10}$

NR: No Reportado.

A.3. NIST 950a

Radioisótopo a analizar	Masa del elemento a 1 g de muestra (mg)	Constante de dosis gamma (rem*m ² *h ⁻¹ *Ci ⁻¹)	Actividad (Bq)	Valor D (TBq)	A/D
²³⁸ U	999.4	1.34*10 ⁻¹	3.28*10 ⁷	0.06	5.5*10 ⁻⁴
Total	999.4	–	3.28*10 ⁷	–	5.5*10 ⁻⁴

B. Anexo: Inputs MCNP y Geant4 para la simulación

B.1. Input MCNP

Realizado por: Madison Sellers y modificado por Andrés Porras.

```
1      1      -1.13 1 -5 -6 -7 -8 -9 -10 -11 -12 -13
2      2      -0.6 -1 2
3      3 -0.8325 3 -2
4      2      -0.6 4 -3
5      3 -0.8325 -4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
27     5000 -0.9977 -509

imp:n=1
30 0 509 $ geometry void
imp:n=0

1      rpp -98 98 -98 98 -84 84
2      rpp -96.5 96.5 -96.5 96.5 -84 84
3      rpp -86.5 86.5 -86.5 86.5 -84 84
4      rpp -84 84 -84 84 -84 84
5      cz 4
6      c/z -11 0 3.5
7      c/z 11 0 3.5
```

```

8      c/z 0 11 3.5
9      c/z 0 -11 3.5
10     c/z 8 8 3.5
11     c/z -8 8 3.5
12     c/z 8 -8 3.5
13     c/z -8 -8 3.5
14     c/z -8 -8 3.5
509    rcc 0 0 17.3 0 0 1.38 0.4826 $ top small vial solution

```

mode n

ACT

DN=both \$ cambie entre DN=model, DN=both and DN=library

DNBIas=10 \$ biases the #productos NR

```

m1    1001.60c    -5.399e-006  $MAT
      1002.60c      -9.6e-009 2003.60c    -7.398e-013 2004.60c    -5.399989e-006
      6012.42c    -0.0001035879 6013.42c    -1.15214e-007 7014.60c    -0.7779821
      7015.60c    -0.002857874 8016.60c    -0.2092697 8017.60c    -7.971222e-005
      8018.      -0.000419538 1020.42c    -1.644926e-005 1021.      -4.9086e-008
      1022.      -1.68165e-006 18036.      -3.13824e-005 18038.      -5.8842e-006
      18040.      -0.00930264 36078.66c    -3.99e-009 36080.66c    -2.565e-008
      36082.66c    -1.3224e-007 36083.66c    -1.311e-007 36084.66c    -6.498e-007
      36086.66c    -1.9722e-007
m2    1001.62c      0.476137  $MAT
      1002.24c      5.5e-005 6000.24c      0.285714 8016.62c      0.237516
      8017.66c      9e-005 8018.      0.000488
m3    8000.      -0.2  $MAT
      6000.      -0.3 7000.      -0.5

```

m5000

92235 -2.14e-3 \$ 94239 para Pu239, 92233 para U233, 92235 para U235

```
1001 -0.10531
8016 -0.87777
7014 -0.01478
mt5000 lwtr.10t
sdef pos=0 0 18.0 par=n cel=27
Rad=D2 Ext=D3 AXS 0 1 0
erg=d4 tme=d1 wgt=1.92e14
si1 H 0 60e8
sp1 D 0 1
si2 H 0 0.4826
sp2 -21 1
si3 -0.7 0.7
cut:n 243e8 j 0 0
F1:n (509.1 509.2 509.3)
T1: 63e8 179i 243e8
F44:n 27
E44: 0.625e-6 0.5 10
T44: 1e8 243e8
```

B.2. Input en Geant4

Realizado por: Diana Herrera y Andrés Porras.

```
/gamos/setParam GmGeometryFromText:FileName Simplest.geom
/gamos/geometry GmGeometryFromText
/gamos/physicsList G4QGSP_BIC_HP
/gamos/generator GmGenerator

#/tracking/verbose 2
```

```
/run/initialize

/gamos/generator/addSingleParticleSource source neutron 1*MeV
/gamos/generator/positionDist source GmGenerDistPositionInG4Volumes URANIUM
/gamos/generator/energyDist source GmGenerDistEnergyFromFile EnergyDist.txt fixed
#/gamos/generator/energyDist source GmGenerDistEnergyConstant 0.25*MeV

/gamos/userAction GmKillAtStackingActionUA GmSecondaryFilter

####PDS NEUTRONS#####
/gamos/setParam GmPDS:ScoreNeutrons 1
/gamos/setParam GmPDS:ScoreGammas 0
/gamos/setParam GmPDS:DetectorName PDS
#/gamos/setParam GmPDS:AngleDeviationFileName angleDeviation.neutronALL.root
/gamos/setParam GmPDS:ExclusionRadius 1*mm
/gamos/setParam GmPDS:ScoreSeparatelyTrueAndGeantino 1

#CONVERT THE FLUX TO DOSE
#/gamos/setParam GmPDS:Flux2DoseFileName Flux2Dose.neutron.ICRU57.lis
#/gamos/setParam GmPDS:EnergiesFileName Flux2Dose.neutrons.ICRU57.lis
#/gamos/setParam GmPDS:ResultsFileName Results
#/gamos/setParam GmPDS:EnergyBinsFileName energy_bins.lis

/gamos/setParam GmPDS:PrintHstar 1
/gamos/setParam GmPDS:PrintHp0 1
/gamos/setParam GmPDS:PrintHp15 0
```

```
/gamos/setParam GmPDS:PrintHp30 0
/gamos/setParam GmPDS:PrintHp45 0
/gamos/setParam GmPDS:PrintHp60 0
/gamos/setParam GmPDS:PrintHp75 0
/gamos/setParam GmPDS:HistosFileName   histos
```

```
/gamos/userAction GmPDSUA
```

```
/vis/scene/create
/vis/open VRML2FILE
/vis/viewer/flush
/vis/viewer/zoom 1
/vis/scene/add/trajectories
/vis/scene/endOfEventAction accumulate
/vis/viewer/update
/vis/viewer/flush
```

```
/run/beamOn 150
```

Bibliografía

- [1] J. Phillips, W. *Fundamentos de Mineralogía para Geólogos*. Limusa, 1986.
- [2] L. González de Vallejo. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, 2002.
- [3] Gonzalez Yelamos J. Giner Robles J. Pozo Rodriguez, M. *Geología Práctica*. Pearson Education, 2002.
- [4] P. Groover, M. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Prentice Hall, 1997.
- [5] Lutgens F. Tarbuck E. *Ciencias de la Tierra*. Pearson, 2005.
- [6] C. Álvaez Álvaez, M. *Yacimientos y Obtención de Uranio*. Universidad de Oviedo, 1995.
- [7] J. Barquín. *Energía: técnica, economía y sociedad*. Univ Pontifica Comillas, 2004.
- [8] [http://global.britannica.com/EBchecked/topic/319885/Martin Heinrich-Klaproth](http://global.britannica.com/EBchecked/topic/319885/Martin_Heinrich-Klaproth), Consultado en Mayo de 2015.
- [9] <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/herschel.htm>, Consultado en Mayo de 2015.
- [10] http://www.goodreads.com/quotes/tag/sir-william_herschel, Consultado en Mayo de 2015.
- [11] Granger H. C Nash, J. T. Geology and concepts of genesis of important types of uranium deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume:63–116, 1981.

- [12] http://pechblenda.hotglue.me/intro_panel.head.138468708953, Consultado en marzo de 2015.
- [13] A. Tanarro S. O. Tanarro, S. *Diccionario inglés - español sobre Tecnología Nuclear*. Foro nuclear, foro de la industria nuclear española, 2008.
- [14] Ahumada. J. *Informe de labores IAN 1989*. Instituto de Asuntos Nucleares, 1989.
- [15] <http://www.sgc.gov.co/Nosotros/Historia.aspx>, consultado en abril de 2014.
- [16] <http://www.minminas.gov.co/minminasindex.jsp=cargaHome=3idcategoria=43id-subcategoria=174>, Consultado en mayo de 2014.
- [17] [http://enciclopediauniversal.esacademic.com/24547/Ricardo Lleras-Codazzi#sel=](http://enciclopediauniversal.esacademic.com/24547/Ricardo_Lleras-Codazzi#sel=), consultado en junio de 2014.
- [18] http://www.california-santander.gov.co/territorios.shtml?apc=bbxx_1-&x=2091458, Consultado en junio de 2014.
- [19] http://socialarchive.iath.virginia.edu/xtf/view?docId=anaconda-copper-mining_company_cr.xml, Consultado en junio de 2014.
- [20] J. Pfeiffer. Estado actual de la prospección de minerales radiactivos en el ian. *Instituto de Asuntos Nucleares*, 1980.
- [21] J.-A.; Pfeiffer J. Rodríguez, H.; Aluja. Manifestaciones uraníferas conocidas en Colombia. In *IAEA-AG-162/17*. IAEA, VIENA, 1981.
- [22] O. Navas. Estudio geológico, geoquímico y radiométrico para uranio en lebrija, departamento de santander del sur. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 1980.
- [23] H. Delgado. Geología y radimetría de la localidad de vetas (santander). Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 1982.

- [24] O. Duque. Análisis radiométrico y su aplicación en los estudios de desequilibrio radiactivo de algunos minerales uraníferos en Colombia. *Instituto de Asuntos Nucleares*, 1988.
- [25] J. Martínez. Geología, geoquímica y geofísica para uranio en el Hato, Santander. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 1982.
- [26] Resolución 180102 “por el cual se determinan unos minerales de interés estratégico para el país”. Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia.
- [27] <http://aplicaciones7.sgc.gov.co/ZonaPotencialGeoquimico/default.aspx>, Consultado en junio de 2014.
- [28] *Minerales estratégicos*. Ministerio de Minas, 2000.
- [29] Bain W. Geology of the fissionable materials. *Economic Geology*, 45(4):273 – 323, 1950.
- [30] J. T. Nash. Uranium geology in resource evaluation and exploration. *Economic Geology*, 73(8):1401 – 1408, December 1978.
- [31] Amiel. S. Analytical applications of delayed neutron emission in fissionable elements. *Analytical Chemistry*, 34(10):1683 – 1692, December 1962.
- [32] R. Wimett T. F. Zeigler R. K. Keepin, G. Delayed neutrons from fissionable isotopes of uranium, plutonium, and thorium. *Journal of Nuclear Energy*, 6:1044 – 1049, 1957.
- [33] Y. Chen. Delayed neutron emission measurements for U-235 and Pu-239. Master's thesis, Texas A & M University, 2006.
- [34] <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015086456467;view=1up;seq=8>, Consultado en junio de 2014.
- [35] Zagyvai. Outline for the lecture on health physics / radiation protection. European Nuclear Engineering Network.

- [36] EML. *Protección Radiológica*. Number Tomo 1. Argentina, 2005.
- [37] Peerani P. Tagziria H. Looman, M. Monte carlo simulation of neutron counters for safeguards applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, pages 542 – 550, 2009.
- [38] <http://www.chem.unl.edu/zeng/joy/mclab/mcintro.html>, Consultado en junio de 2014.
- [39] J. C. Mackay, D. *Introduction to Monte Carlo Methods*. Department of physics, Cambridge University,, United Kingdom.
- [40] M. W. Zemansky F. W. Sears. *Fisica*. Addison-Wesley, 1966. 394 - 395 pp.
- [41] http://www.world-nuclear.org/Nuclear_Basics/, Consultado en septiembre de 2015.
- [42] https://www.dosomething.org/facts/11-facts-about-nuclear_energy, Consultado en Septiembre de 2015.
- [43] http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/Heat-values-of-various_fuels/, Consultado en marzo de 2015.
- [44] <http://www.renewableenergyworld.com/hydrogen/tech.html>, Consultado en Septiembre de 2015.
- [45] http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear_Fuel-Cycle/Introduction/Nuclear-Fuel-Cycle-Overview/, Consultado en Enero de 2016.
- [46] G. Rothwell. Market power in uranium enrichment. *Science & Global Security*, (17):132 – 154, 2009.
- [47] Organización Mundial de La Salud. Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. Technical report, Nota Descriptiva No. 371, Noviembre de 2012.

-
- [48] *Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources*. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, 2010.
- [49] IEA. *IEA statistics, coal information with 2011 data*. International Energy Agency, 2012.
- [50] [http://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history chart](http://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart), Consultado en Enero de 2016.
- [51] *La guerra del Yom Kippur*. Historia / Inédita. Inédita, 2004.
- [52] <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=uranio&meses=360>, Consultado en Enero de 2016.
- [53] T. Neff. The international uranium market. MIT Energy Laboratory Report MIT-EL 80-014, Massachusetts Institute of Technology, 1980.
- [54] [http://www.world-nuclear-news.org/ENF Cameco_completes_draining_of_Cigar_Lake_1202104.html](http://www.world-nuclear-news.org/ENF_Cameco_completes_draining_of_Cigar_Lake_1202104.html), Consultado en Enero de 2016.
- [55] <http://www.muypymes.com/2011/03/24/las-10-burbujas-economicas-mas-extranas>, Consultado en Enero de 2016.
- [56] <http://www.euribor.com.es/noticias/2012/05/02/burbujas-absurdas-el-repentino-auge-del-uranio/>, Consultado en Enero de 2016.
- [57] Hershel / Williams. *A Look of Economic Biubbles (17th century - 21st century)*. First edition edition, 2015.
- [58] Walter C Patterson. *La energía nuclear*, 2004.
- [59] Ronald Luiz Bonewitz. *Rocas y Minerales*. Guías de la Naturaleza, 2013.
- [60] <http://www.nasasa.com.ar/centrales/embalse>, Consultado en marzo de 2015.

- [61] [http://www.world-nuclear.org/info/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors worldwide/](http://www.world-nuclear.org/info/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide/), Consultado en Enero de 2016.
- [62] <https://www.iaea.org/pris/>, Consultado en marzo de 2016.
- [63] Chemical and engineering news. Marzo de 2004.
- [64] Universidad Nacional del Jujuy. Gacetilla del área de minas. Serie D: Mineralogía descriptiva, Facultad de Ingeniería.
- [65] Antonio Vega de Seoane. Notas sobre minerales radioactivos. Comunicaciones Recibidas.
- [66] Hurlbut C. Klein, C. *Manual de Mineralogía*. Cuarta edición edition, Octubre 2003.
- [67] Burns P C Locock A J. Crystal structures and synthesis of the copper-dominant members of the autunite, and meta-autunite groups: Tobernite, zeunerite, metatorbernite and metazeunerite. *The Canadian Mineralogist*, 41:489 – 502, 2003.
- [68] Secretaría de energía. Guía de procedimientos mineros. Technical report, Secretaría de Economía, Marzo 2013.
- [69] Benedik L. Byrne AR. Uranium content of blood, urine and hair of exposed and non-exposed persons determined by radiochemical neutron activation analysis, with emphasis on quality control. *Science of The Total Environment*, 107:143 – 157, Sep 1991.
- [70] International Atomic Energy Agency. IAEA. *Methods of exploration of different types of uranium deposits*. IAEA-TECDOC-1174, 2000.
- [71] M Sandoval. *Diagénesis de Areniscas*. Universidad Central de Venezuela, 2000.
- [72] <http://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/extraction-methods/heap-leach-ion-exchange.html>, Consultado en octubre de 2015.

- [73] Kyser-K. Cuney, M. Recent and no-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration. *Mineralogical Association of Canada*, 39:23 – 49, May 2008.
- [74] *Uranium: Resources, Production and Demand (The Red Book)*. IAEA, 2015.
- [75] *International Atomic Energy Agency - IAEA*. IAEA-TECDOC-1613, April 2009.
- [76] <http://www.cnea.gov.ar/ENRIQUECIMIENTODEURANIO>, Consultado en enero de 2016.
- [77] S Manahan. *Introducción a la química ambiental*. 2007.
- [78] <http://web.ead.anl.gov/uranium/guide/depletedu/enrich/>, Consultado en Enero de 2016.
- [79] International Atomic Energy Agency. IAEA. The various activities associated with the production of electricity from nuclear reactors are referred to collectively as the nuclear fuel cycle. 2011.
- [80] <http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/how-does-a-nuclear-reactor-make-electricity.aspx>, Consultado en Diciembre de 2015.
- [81] <http://www.aveva.com/EN/operations-1173/the-fabrication-of-mox-fuel-recycled-nuclear-power.html>, Consultado en febrero de 2016.
- [82] Walter-C.-Pshakin-G. Merz, E. *Mixed Oxide Fuel (MOX) Exploitation and Destruction in Power Reactors*, volume Vol. 2. NATO ASI Series, 1994.
- [83] Skb 91 final disposal of spent nuclear fuel importance of the bedrock for safety (skb-tr-92-20). *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co*, 1992.
- [84] E. Muller-Eberhard. Situación del uranio en Colombia. evaluación de recursos especulativos en base a las exploraciones. *Cooperación Técnica Alemana*, 1982.
- [85] *Administración de Los Recursos Naturales Renovables de la Rama Del Poder Público*. IICA Biblioteca Venezuela, 2002.

- [86] E. Concha, M. Geología, petrografía y geoquímica para prospección de uranio al suroeste del municipio de páez, cauca. *Universidad Nacional de Colombia*, 1955.
- [87] L. Carrillo, P. Comparación de métodos de análisis de materiales de uranio y su aplicación a minerales de colombia. *Universidad Nacional de Colombia*, 1962.
- [88] Zambrano-J Mier, R. Estudio geológico, prospección geoquímica y radimetría para uranio del flanco este de la serranía de los cobardes. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, 1980.
- [89] J.-A. Bueno, O. Reconocimiento de yacimientos de uranio en la región de la baja, municipio de california, departamento de santander. *Informe interno IAN, INGEOMINAS*(Informe No. 933), 1953.
- [90] R. Lleras Codazzi. *Lecciones de Petrografía*. Publicación digital en la página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/viajes/indice.htm>; Búsqueda realizada en febrero de 2015, 1914.
- [91] Meunier-A.-Tauchid-M Cameron, J. Iurep orientation phase mission. report: Colombia. Technical report, International Atomic Energy Agency, March 1980.
- [92] Ricardo Lleras Codazzi. *Notas Mineralógicas y petrográficas*. Publicación digital en la página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/viajes/indice.htm>. Consultado en Febrero de 2015, 1925.
- [93] R. Lleras Codazzi. *Notas Geológicas y geográficas*. Publicación digital en la página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/viajes/indice.htm>. Consultado en Febrero de 2015, 1926.
- [94] R. Lleras Codazzi. *Los Minerales de Colombia*. Publicación digital en la página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la Repúbli-

ca. <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/viajes/indice.htm>¿Búsqueda realizada en marzo de 2014, 1927.

- [95] J. A. Bueno, O. Yacimientos de uranio y otros metales en la región de la baja, municipio de california, departamento de santander. *Ingeominas*, (Informe No. 1143), 1955.
- [96] O. Bueno. Informe sobre platas de beneficio de minerales de uranio y observaciones sobre el particular de los minerales de california, santander. Technical report, Ingeominas, 1956.
- [97] Biel: Boletín sobre inversiones y empresas latinoamericanas. Integración Latinoamericana, Junio 1982.
- [98] Instituto de Asuntos Nucleares. Decreto legislativo no. 2345. Agosto 1959.
- [99] S.-Lucero-E.-Guzman-O. Ahumada. J., J. Zuleta. *Instituto de Asuntos Nucleares: Ciencia y Tecnología para el progreso*. Bogotá, Colombia, 1989.
- [100] H. Múnera. *Tecnología Nuclear No Médica en Colombia*. Tecnicontrol S.A., 2011.
- [101] Ministerio de Minas y Energía. Políticas públicas mineras, ciclo de producción de uranio. Technical report, 2010.
- [102] OIEA. Prospección uranio colombia. In *Conclusiones y recomendaciones*. Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo, 1983.
- [103] Instituto de Asuntos Nucleares. Síntesis de los trabajos geologico-radimétricos realizados por las compañías enusa y cogema en la orinoquía - amazonía colombiana. Technical report, Área de Materias Primas, 1987.
- [104] Rodríguez H. Fernández, J. Geología y metalogénesis de las principales anomalías descubiertas por enusa en colombia. Empresa Nacional del Uranio S.A., 1981.
- [105] R. Umaña. Proyecto ocaña w. In *I. T. 35*. Compañía Colombiana del Uranio Çoluranio S.A.", Febrero 1983.

- [106] Shibayama H. Arai, K. Informe del estudio del yacimiento de uranio de la república de colombia. Technical report, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation, 1977.
- [107] K. Arai. Informe de estudio de recursos de uranio de la sierra nevada de santa marta. Technical report, Power Reactor and Fuel Development Corporation - Instituto de Asuntos Nucleares, 1979.
- [108] E. García. Energías del presente y del futuro. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia*, 34(114):36 – 45, Agosto 1979.
- [109] <http://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/uranio.pdf>, Consultado en Noviembre de 2015.
- [110] Ministerio de Minas y Energía. Estudios para la formulación del plan nacional de desarrollo minero. In *Uranio (estudios de inventario minero)*. Consorcio Instituto de Estudios Colombianos - Integral Ltda., 1984.
- [111] Informe de labores. Technical report, Instituto de Asuntos Nucleares, Diciembre 1987.
- [112] Un proyecto de eisenhower asigna ayuda económica técnica al extranjero para la producción e investigación atómica, diario abc, edición de andalucía no. 16162, 1955.
- [113] <http://internacional.elpais.com/internacional/2006/12/11/actualidad/1165791610.html>, Consultado en mayo de 2015.
- [114] <http://actualidad.rt.com/actualidad/view/131692-india-bomba-atmica-nuclear>, Consultado en mayo de 2015.
- [115] <http://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/energia-nuclear-en-el-mundo/grafico-de-informacion-nuclear-por-paises>, Consultado en Mayo de 2015.
- [116] Tulio Marulanda. Nuestro primer reactor nuclear. In *Conferencia de inauguración del Instituto de Asuntos Nucleares*, 20 de Febrero 1965.

- [117] A. León, J. El reactor nuclear colombiano y la agencia de actores no humanos en los estudios sociales de la ciencia. *Revista colombiana de sociología*, (23):31 – 48, 2004.
- [118] Cabal-M.-Muñoz-M. Múnera, H. Risk associated with transportation of spent nuclear fuel under demanding security constrains. *Risk Analysis*, 17(3), 1997.
- [119] <http://www.eltiempo.com/opinion/columnistas/erase-una-vez-el-inea-moises-wasserman-columna-el-tiempo/16514088>, Consultado en Febrero de 2016.
- [120] A.-Ross-A.-M.-DeSessa-M.-A. Centanni, F. Fluorometric determination of uranium. *Annal Chem*, 28(11):1651 – 1657, April 1956.
- [121] Archivo ministerio de minas y energía. In *Instituto de Asuntos Nucleares - IAN*. Periodo: 8, Caja corr No. 70, Caja cons No. 565.
- [122] Espinosa-R. Mesa, E. Emisión radiactiva de las cenizas volantes y escoria en las centrales térmicas. In *II congreso nacional de ciencia y tecnología del carbón*, pages 305 – 311, Noviembre 1993.
- [123] J. López. Concentración del producto lixiviado de minerales uraníferos de la región de zapatoaca. Master's thesis, Universidad Industrial de Santander - UIS, 1980.
- [124] Urazan-A. Pfeiffer, J. Clasificación genética preliminar de las manifestaciones uraníferas de colombia. *Geología Colombiana*, (15):185 – 197, 1986.
- [125] Kim-J-Kim-C.-Lee-J. Jung, K. Trace analysis of uranium in aqueous samples by laser-induced fluorescence spectroscopy. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 19(4):242 – 248, July 1987. December.
- [126] O.-Cañón-Y.-Alonso-D.-Porras-A. Herrera D. Peña M. Parrado G., Sierra. Improvement of analytical capabilities of the neutron activation analysis laboratory at the colombian geological survey. *14th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis - Memories.*, PT24 - Poster Presentation:105 p, 23 - 28 August 2015, Delft, The Netherlands 2015.

- [127] Vásquez L.-Munoz R.-Gómez-H.-Parrado-G.-Vargas S. González, L. Exploración de recursos energéticos. exploración de uranio en paipa, iza, pesca, chivatá (boyacá). Technical report, Instituto colombiano de geología y minería ingeominas, Noviembre 2008.
- [128] ENUSA IAN. informe contrato i. proyecto iii: Paipa. Technical report, 1979.
- [129] Espinosa O. Alfaro, C. Sondeo preliminar de radón en el área geotérmica de paipa. Technical report, Instituto colombiano de geología y minería ingeominas, 2004.
- [130] Zambrano F. Durán, R. Roca fosfórica en el cuadrángulo j - 13: Sogamoso. Technical Report informe I1676 D87, Instituto colombiano de geología y minería ingeominas, 1975.
- [131] Vásquez L.-Munoz R.-Gómez H.-Vargas S. González, L. Exploración de uranio en floresta (boyacá). Technical report, Instituto colombiano de geología y minería ingeominas, 2009.
- [132] A. Perez. Exploración de uranio en el sector occidental del macizo de santander. Technical report, Instituto colombiano de geología y minería ingeominas, 2010.
- [133] Díaz J.-Quintero F. Moreno, G. Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector central del macizo de santander, colombia. Technical report, Servicio Geológico Colombiano, 2011.
- [134] J. Moreno, G. Díaz. Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector norte del macizo de santander, colombia. Technical report, Servicio Geológico Colombiano, 2012.
- [135] Moreno G.-Bautista S. D, J. Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector sur del macizo de quetame, colombia. Technical report, Servicio Geológico Colombiano, 2013.
- [136] Niemann-P. Miller-P. Véliz-P. Corley-D. de Klerk, L. Preliminary economic assessment on the berlin deposit, colombia. Technical report, Tenova Mining & Minerals (Australia) Pty Ltd, January 18 2013.

- [137] <http://www.u3o8corp.com/main1.aspx?id=111>, Consultado en Febrero de 2016.
- [138] Hoorn C.-Bernet M.-Cariillo E.-Van der Veeck P. Garver J. Mora J. Mehrkian K. Bermudez, M. The detrital record of late-miocene to pliocene surface uplift and exhumation of the venezuelan andesinthe maracaibo and barinas foreland basins. *Basin Research*, October 2015.
- [139] Murray A.-Roberts G. Olley, J. The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burial dose rates in fluvial sediments. *Quaternary Science Reviews*, 15:751 – 760, 1999.
- [140] Lagerkvist P.-Holmgren S.-Jonsson S.-Sandstrom B. Tovedal A. Vesterlund A. Vidmar T. Kastlander J. Rameback, H. On the accuracy of gamma spectrometric ratio measurements of uranium. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 815:57 – 61, 2016.
- [141] E. Adams-F. Dams-R. Croutamel, C. *Applied Gamma Ray Spectrometry, 2nd edn.* Pergamon Press, 1970.
- [142] https://nucleus.iaea.org/rpst/referenceproducts/referencematerials/radionuclides/IAEA_RGU-1.htm, Consultado en junio de 2015.
- [143] The Radiochemical center, editor. *The Radiochemical Manual, 2nd edn.* Amsterdam, 1966.
- [144] Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")*. IUPAC, 1997.
- [145] Tumer T. Visser G.-Maedling D.-Yin S. Kravis, S. A multichannel readout electronics for nuclear application (rena) chip developed for position sensitive solid state detectors. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment*, 422:352 – 356, February 1999.
- [146] International Atomic Energy Agency. IAEA. *Analytical techniques in uranium exploration and ore processing*. 1992.

- [147] <http://ie.lbl.gov/toi/nuclide.asp?iZA=930239>, Consultado en marzo de 2015.
- [148] Gostilo V. Sokolov A.-Rozite A. Docenko, D. On-line measurement of uranium in ores using xrf analyzer p2 con-x. Technical report, International Atomic Energy Agency.
- [149] Elliot M. Rein J. Paige, B. Ultraviolet spectrophotometric determination of uranium. *Analytical Chemistry*, 29(7):1029 – 1032, 1957.
- [150] D. Harris. *Análisis Químico Cuantitativo*. 3 edition, 2007.
- [151] E. Rochow. *Química inorgánica descriptiva*. Harvard University, 1981.
- [152] http://dev.physicslab.org/Document.aspx?doctype=3&filename=AtomicNuclear_ChadwickNeutron.xml, Consultado en marzo de 2016.
- [153] <http://www.reak.bme.hu/WignerCourse/WignerManuals/Budapest/.htm>, consultado en mayo de 2014.
- [154] Byrne J. *Neutrons, Nuclei and Matter*. Institute of Physics Publishing, 1994.
- [155] Antonio Travesi. *Análisis por Activación Neutrónica: Teoría, práctica y aplicaciones*. Servicio de publicaciones de la J.E.N., 1975.
- [156] H. Wirtz K. Beckurts, K. *Neutron Physics*. kernforschungszenrum karlsruhe, translated by: l. dresner, oak ridge national laboratory edition, 1964.
- [157] S. Ramamurthy S.. S.. Kapoor, V. *Nuclear Radiation Detectors*. New Age International Publishers, reprint 2008 edition, 1986.
- [158] Queral. C Wiese V., K. *Energía nuclear y ciclo del combustible*. Notas de clase, 2012.
- [159] M. Piksaikin, V. An 8 - group delayed neutron model based on a consistent set of half - lives. *Progress in Nuclear Energy*, 41(1-4):223–251, 2002.
- [160] D.J. Thomas. Neutron spectrometry. *Radiation Measurements*, 45:1178 – 1185, 2010.
- [161] Knoll. *Radiation detection measurements*. elsevier scientific publishing company, 1975.

- [162] Lovbrog L. Kunzendorf, H. Elemental interferences in the analysis of uranium by delayed neutron counting. *Economic Geology*, 1981.
- [163] N. Gale. Development of delayed neutron technique as rapid and precise method for determination of uranium and thorium at trace levels in rocks and minerals, with applications in isotope geochronology. Technical report, IAEA, 1967.
- [164] Lovbrog L. Kunzendorf, H. Automated uranium analysis by delayed-neutron counting. Technical report, Riso National Laboratory, 1980.
- [165] Antonio Ferrer Soria. *Física nuclear y de partículas*. Universitat de Valencia, 2006.
- [166] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_8.htm, Consultado en marzo de 2016.
- [167] Brugger R. Shih, J. Gadolinium as a neutron capture therapy agent. *Med Phys*, 19(3):733 – 744, 1992.
- [168] http://www2.sgc.gov.co/Nosotros/Marco_Estrategico.aspx, Consultado en abril de 2016.
- [169] IAEA. Aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispensa. Technical report, Guía de seguridad No. RS-G-1.7, 2007.
- [170] Castiblanco L. Sarta, J. Neutron flux measurement and thermal power calibration of the ian-r1 triga reactor. In *4th World TRIGA users Conference*, 2008.
- [171] Ministerio de Minas y Energía. Por medio de la cual se adopta el sistema de categorización de las fuentes radiactivas, 2008.
- [172] J. Gomez. Diseño de un modelo digital en el programa mcnp para la simulación de la dosimetría de la fuente de cobalto-60 de la epn y validación del modelo mediante dosimetría fricke. Master's thesis, Escuela Politecnica Nacional, Febrero 2013.
- [173] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lfa/bautista_a_md/capitulo2.pdf, Consultado en Marzo de 2016.

[174] <https://mcnp.lanl.gov/>, consultado en mayo del 2014.

[175] A. MARTÍNEZ, editor. *Introducción al código MCNP*. UPTC, 2004.

[176] <http://fismed.ciemat.es/GAMOS/>, Consultado en marzo de 2016.