



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE FÍSICA

**“DETERMINACIÓN DE ÍNDICES ALFA Y GAMMA DE
GRANITOS COMUNMENTE USADOS COMO MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Integrador

Presentado para optar el grado académico de:

FÍSICO

AUTORES: MARLON STALIN MATÍNEZ LÓPEZ

CARMEN EMILIA PUEDMAG FUENTES

DIRECTORA: Dra. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDÓÑEZ PhD.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Marlon Stalin Martínez López & Carmen Emilia Piedmag Fuentes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Marlon Stalin Martínez López y Carmen Emilia Piedmag Fuentes, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados. Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

10 de septiembre del 2021



MARLON STALIN MARTÍNEZ LÓPEZ

No. Cédula: 060395480-1



CARMEN EMILIA PUEDMAG FUENTES

No. Cédula: 100337480-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE FÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto Integrador. **DETERMINACIÓN DE ÍNDICES ALFA Y GAMMA DE GRANITOS COMUNMENTE USADOS COMO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA** realizado por el señor y la señorita: **MARLON STALIN MARTÍNEZ LÓPEZ** y **CARMEN EMILIA PUEDMAG FUENTES**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Richard Wiliams Pachacama Cocha PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: RICHARD WILLIANS PACHACAMA CHOCA	2021-09-10
Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordóñez. PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: JHENY DEL CARMEN ORBE ORDONEZ	2021-09-10
Biof. María Fernanda Heredia Moyano. Msc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: MARIA FERNANDA HEREDIA MOYANO	2021-09-10

DEDICATORIA

Con mucho amor, dedico este trabajo a la mujer que más amo en este mundo, todo mi esfuerzo y empeño te lo dedico a ti mamá.

Con mucho cariño, Marlon.

Este trabajo está dedicado a quien siempre ha creído en mi potencial y ha sido mi soporte constante en toda mi vida, a mi madre. ¡Lo hicimos!. También a las personas que sueñan con cambiar el mundo por medio de la ciencia, conquistando esos sueños todos llegaremos más lejos.

Carmen Emilia.

AGRADECIMIENTO

A mi familia, por el amor que recibo, por su esfuerzo y apoyo, a mis padres Gustavo y María por cada día creer en mí y en mis sueños. A la Dra. Jheny Orbe directora de este trabajo, por cada minuto que compartimos, por sus consejos y ayuda. A mis maestros, en especial a Rommel, Omar, Marcelo y José Luis por formarme durante la carrera y enseñarme la belleza de la Física. A Cristian y a Michaela por ser incondicionales en todo momento. A Emilia, mi compañera de tesis, por enseñarme que del trabajo nacen grandes amistades. Finalmente, a todas aquellas personas que aportaron en mi formación profesional.

Muchísimas gracias, Marlon.

A mi familia, en especial a mi mami Anita, a mi tía Irmtraud, a mi tío David y Telmo por formarme en un hogar lleno de amor y pensamiento crítico. A mis hermanas de vida Thea, Raquel y Angelita por ser mi apoyo fraternal en los momentos más difíciles.

A la Dra. Jheny Orbe por darme la oportunidad de aprender e incursionar en un campo muy interesante de la Física, además de ser una guía en este trabajo. A los docentes: Omar, Marcelo y Rommel por hacer que viera la Física desde una perspectiva diferente.

A Marlon, por enseñarme que del trabajo en equipo salen grandes cosas, además de su amistad incondicional y su apoyo. A Mishell, por su amistad desinteresada e incondicional en nuestro proceso de formación profesional.

A la familia Martínez López por su acogida, apoyo y ayuda para el desarrollo de este proyecto. A todos quiénes a pesar de la distancia han aportado a la culminación de esta etapa en mi vida, sin ustedes no hubiese sido posible. Muchísimas gracias.

Carmen Emilia

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
SUMMARY.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Radiación Natural.....	4
1.1.1. Fuentes primordiales.....	4
1.1.2. Fuentes Cosmogénicas.....	4
1.2. Principales cadenas de desintegración de fuentes primordiales.....	5
1.2.1. Cadena de desintegración del Uranio-238.....	5
1.2.2. Cadena de desintegración del Torio-232.....	5
1.2.3. Cadena de desintegración del Potasio-40.....	6
1.3. Radiactividad y equilibrio secular en la muestra.....	7
1.4. Radiación Gamma.....	8
1.5. Espectrometría de radiación gamma.....	9
1.6. Generalidades de detectores de radiación gamma.....	13
1.7. Resolución de detectores.....	14
1.8. Eficiencia de detectores.....	15
1.9. Calibración de detectores.....	16
1.10. Efectos de respuesta de detectores.....	16
1.11. Equipos de detección de radiación gamma.....	17
1.11.1. Detectores Centelladores.....	17
1.11.1.1. Centellador de NaI (Tl).....	18
1.11.1.2. Interacción de la radiación gamma con el centellador.....	20
1.11.2. Detector semiconductor de germanio de alta pureza.....	21
1.12. Análisis Cuantitativo de Espectros.....	23
1.13. Magnitudes dosimétricas de interés.....	24
1.14. Índices alfa y gamma.....	25
1.14.1. Índice alfa.....	25

1.14.2.	<i>Índice gamma</i>	26
1.15.	Efectos causados por exposición a radiación natural.....	28
1.16.	Granito.....	29
1.16.1.	<i>Radiactividad del granito</i>	32

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO.....	34
2.1.	Población de estudio.....	34
2.2.	Método de muestreo.....	34
2.3.	Preparación de las muestras.....	35
2.4.	Instrumentación utilizada para evaluar los índices alfa y gamma.....	37
2.4.1.	<i>Espectrómetro Gamma GCD-40180X</i>	37
2.4.2.	<i>Radiómetro ADANI Rug 91-2</i>	38
2.4.2.1.	Algoritmo del sistema Rug 91-2.....	42
2.5.	Procedimiento de medición de actividad específica de las muestras.....	44

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	46
3.1.	Cálculo del coeficiente de sensibilidad para el K-40 del radiómetro Rug 91-2... 46	46
3.2.	Medidas de radiactividad natural de las muestras de granito con el espectrómetro Rug 91-2.....	47
3.3.	Medidas de radiactividad natural de las muestras de granito mediante el espectrómetro GCD-40180X.....	49
3.4.	Cálculo de índices alfa y gamma.....	51
3.4.1.	<i>Índice gamma</i>	52
3.4.2.	<i>Índice alfa</i>	52
	CONCLUSIONES.....	54
	RECOMENDACIONES.....	55

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Cadena de desintegración del U-238.....	5
Tabla 2-1: Cadena de desintegración de Th-232.....	6
Tabla 3-1: Energías características de emisión de radiación gamma en las series de decaimiento del U-238, Th-232 y K-40, con su porcentaje de ocurrencia.	9
Tabla 4-1: Tasa de dosis específica de acuerdo con el tipo de estructuras.	25
Tabla 5-1: Índice gamma de acuerdo con el criterio de dosis.....	26
Tabla 6-1: Regulaciones nacionales propias con respecto a los NORM empleados como materiales de construcción.....	27
Tabla 7-1: Recopilación de resultados de actividad específica de los radionucleidos presentes en el granito con su procedencia.....	32
Tabla 1-2: Codificación de las muestras de granito analizadas.	34
Tabla 2-2: Características técnicas del espectrómetro GCD-40180X.....	37
Tabla 3-2: Requerimientos técnicos del software para el ordenador.	41
Tabla 4-2: Masa de las muestras de granito analizadas.	45
Tabla 1-3: Coeficiente de sensibilidad del K-40 para diferentes tiempos de adquisición de datos.....	46
Tabla 2-3: Concentración de actividad del K-40 para las muestras de granito estudiadas, usando el radiómetro Rug 91-2.	48
Tabla 3-3: Valores de la concentración de actividad para el K-40, calculados manualmente.	48
Tabla 4-3: Actividades específicas del Ra-226, Th-232 y K-40 de las muestras de granito, reportadas por la SCAN.....	50
Tabla 5-3: Índices Gamma de los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba. .	52
Tabla 6-3: Índice alfa de los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Desintegración del K-40 en Ar-40 por captura electrónica y por desintegración beta.	7
Figura 2-1:	Esquema de desintegración del Ra-226 en Rn-222.	10
Figura 3-1:	Espectro de rayos gamma del U-238 y sus productos de desintegración.	11
Figura 4-1:	Espectro del K-40 con un detector centellador de NaI.	12
Figura 5-1:	Esquema de decaimiento del Th-232 a Ra-228.	12
Figura 6-1:	Espectro del Th-232 y sus productos de decaimiento.	13
Figura 7-1:	Comparación de los espectros con detectores de NaI y HPGe para el Co-60.	15
Figura 8-1:	Esquema de bandas para un cristal puro típico.	19
Figura 9-1:	Estructura de bandas de energía de un cristal centellador activado.	20
Figura 10-1:	Esquema de funcionamiento de un detector centellador.	21
Figura 11-1:	Principio físico de un detector semiconductor de HPGe.	22
Figura 12-1:	Diagrama QAFP para la determinación de tipos de rocas ígneas intrusivas.	31
Figura 1-2:	Muestras de cinco clases de granito más usados en la ciudad de Riobamba.	35
Figura 2-2:	Proceso de trituración y pulverización de las muestras de granito.	36
Figura 3-2:	Espectrómetro Rug 91-2.	39
Figura 4-2:	Espectrómetro Rug 91-2. Esquema general del espectrómetro Rug 91-2.	40
Figura 5-2:	Interfaz gráfica del Rug 91-2.	42

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Abundancia de las rocas en la corteza terrestre.....	30
Gráfico 1-3:	Coeficiente de sensibilidad del K-40 en función del tiempo de adquisición de datos.	47
Gráfico 2-3:	Comparación de la concentración de actividad del K-40, calculada usando el Software Rug 91-2 y el Método Manual.	49
Gráfico 3-3:	Comparación de los resultados de la actividad específica del K-40 de muestras de granito, usando un detector de yoduro de sodio dopado con talio NaI (TI) y un detector de germanio hiperpuro (HPGe).	51

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** FORMATO DE CÁLCULO DE GUARDADO DE DATOS EN EXTENSIÓN.DAT
- ANEXO B:** FORMATO DE GUARDADO DE DATOS EN EXTENSIÓN .TXT
- ANEXO C:** IMPULSOS CORRESPONDIENTES A LOS CANALES PARA EL K-40
- ANEXO D:** REPORTE DE ESPECTROMETRÍA GAMMA DE LAS MUESTRAS DE GRANITO REALIZADO POR LA SCAN.
- ANEXO E:** RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GGBC
- ANEXO F:** RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GNGI
- ANEXO G:** RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GRI
- ANEXO H:** RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GVC
- ANEXO I:** RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GVUB
- ANEXO J:** ENTREVISTA A PROVEEDORES DE GRANITO EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA

RESUMEN

En la presente investigación se han determinado los índices de riesgo asociados a emisores de radiación alfa y gamma presentes en los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba. Las muestras de granito fueron trituradas, pulverizadas y secadas a 105 grados Celsius para luego ser selladas herméticamente y reposar durante cuatro semanas. El material fue analizado en la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) empleando un detector semiconductor de germanio de alta resolución (HPGe) y en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, donde se implementó una técnica de trabajo mediante el espectrómetro Rug 91-2 con un centellador de yoduro de sodio activado con talio NaI (Tl). La comparación de los resultados de la actividad específica del K-40 obtenidas con el detector NaI (Tl) y el detector HPGe muestra una tendencia de concentración de actividad medida con el centellador mayor que aquella medida con el detector semiconductor, excepto en el caso del granito Negro Galaxy donde se observa lo opuesto, se verifica que los dos sistemas de detección tienen eficiencias diferentes y por tanto presentan resultados heterogéneos. El índice gamma para los granitos estudiados, calculados con las actividades específicas de K-40, Th-232 y Ra-226, reportadas por la SCAN, evidencian que el granito Violet presenta un valor de 6.72, por tanto, su uso en viviendas contribuirá a superar el nivel de referencia de la exposición externa debida la radiación gamma en interiores, los otros cuatro granitos presentan valores típicos de 0.04 a 0.80, por otra parte, los índices alfa variaron entre 0.10 y 0.80, en consecuencia, las concentraciones específicas de Ra-226 en todas las muestras no exceden el valor sugerido de 200Bq por kg. Por último, se recomienda seguir realizando estudios con granito, mediante técnicas complementarias que ratifiquen los resultados obtenidos en la investigación.

Palabras clave: < RADIACIÓN NATURAL > < GRANITO > < ÍNDICES ALFA Y GAMMA > < ESPECTROMETRÍA GAMMA > < DETECTOR CENTELLADOR >.

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, o=BANCO CENTRAL DEL
ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-
ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.09.16 11:11:04 -05'00'



1801-DBRA-UTP-2021

SUMMARY

In the present investigation, the risk indices associated with alpha and gamma radiation emitters present in the most commercialised granites in the city of Riobamba have been determined. The granite samples were crushed, pulverised, and dried at 105 degrees Celsius, then hermetically sealed and left to stand for four weeks. The material was analysed at the Subsecretaria de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) using a high resolution germanium semiconductor detector (HPGe) and at the laboratory of Nuclear Techniques of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, where a working technique was implemented using the Rug 91-2 spectrometer with a NaI(Tl) thallium-activated sodium iodide scintillator. The comparison of the results of the specific activity of K-40 obtained with the NaI (Tl) detector and the HPGe detector shows a trend of activity concentration measured with the scintillator higher than that measured with the semiconductor detector, except in the case of the Negro Galaxy granite where the opposite is observed, it is verified that the two detection systems have different efficiencies and therefore present heterogeneous results. The gamma index for the studied granites, calculated with the specific activities of K-40, Th-232 and Ra-226, reported by SCAN, show that the Violet granite presents a value of 6.72, therefore, its use in dwellings will contribute to exceed the reference level of external exposure due to gamma radiation indoors, the other four granites present typical values of 0.04 to 0.80, on the other hand, the alpha indices varied between 0.10 and 0.80, consequently, the specific Ra-226 concentrations in all samples do not exceed the suggested value of 200Bq per kg. Finally, further studies with granite are recommended, using complementary techniques to ratify the results obtained in the investigation.

Keywords: < NATURAL RADIATION> < GRANITE> < ALPHA AND GAMMA INDEXES >
< CENTELLERING DETECTOR>.

INTRODUCCIÓN

La radiación ionizante producida en los procesos de radiactividad natural son una fuente de exposición para el ser humano, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) “puede afectar el funcionamiento de órganos y tejidos, producir efectos agudos tales como: enrojecimiento de la piel, caída de cabello, quemaduras por radiación o síndrome de irradiación aguda” (OMS, 2016). El daño que causa en los órganos y tejidos depende de la dosis recibida, y se debe principalmente a la exposición con rayos gamma e inhalación de isotopos de radón (OMS, 2016). Las construcciones en las que el hombre habita generalmente son de piedra, ladrillo y hormigón, estos materiales son buenos atenuadores de los rayos gamma emitidos al aire libre, por lo que la exposición a la radiación natural en interiores se debe principalmente a los materiales con los cuales se elabora una vivienda (Rigui y Bruzzi, 2006, p.159). Además, en la actualidad la población pasa la mayor parte del tiempo dentro de edificaciones. En el 2000 *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) informó una ocupación promedio mundial con un factor de 0.8, lo que supone un mayor tiempo de exposición, la dosis de radiación gamma en interiores depende del tipo de material, en general estos niveles están relacionados con los tipos de rocas que se extraen del suelo, los valores más altos de radiación están asociados con las rocas como el granito y los más bajos con rocas sedimentarias (UNSCEAR, 2000, pp. 89-92). Los granitos en particular exhiben una alta concentración de radionucleidos naturales, los de composición granítica están fuertemente enriquecidos en U-238 y Th-232 (UNSCEAR, 2000, p.89), estos materiales se encuentran presentes en la mayoría de construcciones y edificaciones, aportando a la dosis de radiación a la que el ser humano está expuesto.

La investigación de la radiactividad natural en materiales de construcción, especialmente en rocas y piedras de decoración como el granito han sido un tema de poco estudio alrededor del mundo, por ello es que no se cuenta con numerosa literatura, en gran parte porque las decoraciones y acabados con granito solo han comenzado a usarse en los últimos años, las directrices emitidas por las agencias internacionales, recomiendan a los estados, evaluar los materiales de construcción, a fin de caracterizar aquellos de interés desde el punto de vista de la protección radiológica, existen algunos trabajos importantes que han aportado al conocimiento que se tiene de estas rocas graníticas: La Unión Europea en 1999 en un esfuerzo de controlar la exposición a altos niveles de radiación natural presentes en materiales de construcción en su documento “*Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Buildings Materials*”, establece ciertos criterios de control a la dosis que genera la radiación gamma emitida por los materiales de 1 mSv por año, donde la radiación que exceda este valor solo puede ser aceptada en casos excepcionales. Además, se sugiere un índice de riesgo radiactivo en función de un criterio de dosis (EURATOM, 2014, p.31) el cual se usa en este trabajo. Por otra parte la UNSCEAR en su reporte del año 2000 denominado “*Sources and Effects of Ionizing Radiation*”, en el anexo B,

habla sobre exposición debido a fuentes naturales de radiación en interiores y exteriores, concluye que la media de la dosis efectiva anual de la población mundial es de 2.4 mSv, alrededor del 65% de las personas tienen exposición en dosis de entre 1 y 3 mSv, y el 10% tiene exposiciones superiores a 3mSv, se señala que esta base de datos sigue mejorando con cada investigación realizada en el mundo (UNSCEAR, 2000,p.112). Otros trabajos desarrollados por la comunidad científica tuvieron un alto impacto en el conocimiento que se tiene de la radiactividad del granito como material decorativo y de construcción. Tzortzis et al. en el año 2003 realizó uno de los primeros estudios sobre granitos a partir de métodos de espectrometría gamma, consistió en la recolección de 28 diferentes tipos de rocas graníticas importadas, las cuales se pulverizaron y secaron, el análisis se realizó con un espectrómetro gamma de germanio de alta resolución para una utilización de granitos en interiores en una proporción de un cuarto, un medio y la totalidad de la construcción, se concluyó que la dosis total efectiva recibida comprendía rangos aceptables según lo indicado por legislaciones internacionales y que los valores de concentración de actividad dependían del lugar de procedencia del material, las concentraciones de Th-232 de 13 muestras de granito superaban los 100 Bq kg⁻¹, en cambio tan solo 6 muestras presentaban concentraciones de U-238 que sobrepasaban este mismo valor. Una interesante conclusión en este trabajo fue lo idóneo que resulta la utilización de un espectrómetro gamma de alta resolución como herramienta sensible para el estudio de la radiactividad natural y la determinación de concentraciones elementales y tasa de radiación en rocas (Tzortzis et al., 2003, pp.223-235).

Otro estudio que enriquece la literatura de la región es el propuesto por Anjos et al. en el 2005, con un análisis de 110 diferentes tipos de los principales granitos comercializados en Brasil, se usó un detector de NaI(Tl) (centellador de yoduro de sodio activado con talio) donde se encontró correlaciones entre las concentraciones de Th-232 y K-40, y se concluye que los granitos brasileños están compuestos por una mezcla de minerales que no producen altos niveles de dosis al usarse como material de recubrimiento (Anjos et al., 2005, pp.245-253).

Además, se debe hacer mención el trabajo de Righi y Bruzzi (2006) el cual es un estudio de radiactividad natural sobre exhalación de radón y cálculo de índice alfa e índice gamma propuesto por la Comisión Europea para materiales de construcción, se usó el método de acumulación con el sistema de detección E-PERM y espectrometría gamma con un detector de HPGe coaxial tipo n para cada estudio respectivamente. Entre los materiales estudiados por los autores tenemos ladrillo, concreto, arcilla, porcelana, cerámica, tufo volcánico y de especial interés algunos tipos de granito clasificados por colores. La investigación muestra una mayor concentración de actividad radiactiva en los granitos rojos. En general se concluye que rocas magmáticas como el granito se caracterizan por una radioactividad relativamente alta comparada con los otros materiales de construcción. Los valores obtenidos son comparados con los rangos establecidos para protección radiológica de la Comisión Europea y exceden de 5 a 25% lo recomendado (Righi y Bruzzi, 2006, pp.158-170). En el 2007, Lu y Zhang realizaron un estudio denominado: *Natural*

radioactivity measurements in rock samples of Cuihua mountain national geological park, China. En él se mide la concentración de radionucleidos naturales de Ra-226, Th-232 y K-40 en algunas muestras de rocas graníticas recogidas del parque geológico de Cuihua de China mediante un detector NaI (TI). Los promedios de estos radionucleidos muestran valores típicos encontrados en otras partes del mundo. Se concluye que la tasa media de dosis absorbida al aire libre debido a la radiación gamma presenta un valor bajo respecto a lo recomendado por la UNSCEAR (Lu y Zhang, 2008, pp.77-82).

En Ecuador los materiales utilizados para revestimiento de mesones, paredes o pisos como el granito en su totalidad son importados (Pinzón, 2017, p.26), por ello es importante cuantificar la radiación gamma emitida por estos elementos provenientes de minas de alrededor del mundo. Además, en el país no se ha realizado estudios relacionadas a la radiactividad natural de estos elementos extranjeros. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal determinar los índices alfa y gamma de granitos comúnmente usados como materiales de construcción en la ciudad de Riobamba, los resultados tienen gran importancia debido a que servirán como una guía para identificar la radiactividad por emisores gamma del granito al interior de los hogares, y alertar su potencial nocivo para la salud, tomando como referencia estándares internacionales. Los beneficiarios directos son la comunidad científica y los gobernantes que podrán tomar decisiones acertadas, en función de la información de índices alfa y gamma, la población que tendrá acceso a esta fuente de información y podrá tomar mejores decisiones. La realización de este proyecto aportará a una base de datos internacional sobre la radiactividad natural del granito y será un importante aporte a la producción científica del Ecuador.

El estudio es viable debido a que las muestras se pueden adquirir con facilidad en cualquier distribuidor de granitos en el mercado local, los análisis se realizarán con Espectrometría Gamma. Además, se pretende estudiar el espectrómetro (radiómetro) gamma Rug 91-2, marca ADANI e implementar un protocolo de trabajo en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), el cual cuantifica la actividad específica de los radionucleidos disponibles en su software como el K-40. Se medirá la concentración de actividad de Ra-226, Th-232 y K-40, en el Laboratorio de Vigilancia Ambiental Radiactiva de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares del Ecuador (SCAN), con un espectrómetro gamma con detector de germanio hiperpuro (HPGe), además se realizará una comparación entre los dos sistemas de detección.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Radiación Natural

Los núcleos que componen la materia pueden presentar una configuración inestable, el proceso por el cual llegan a la estabilidad se conoce como “decaimiento radiactivo, entre los tipos de decaimiento se puede encontrar la desintegración alfa, beta y gamma (Alonso, 1986, p.340), estos procesos pueden producir radiación ionizante que generan efectos biológicos en el ser humano, por ejemplo, el mal funcionamiento de las células tras dosis elevadas, cáncer y efectos heredables a su progenie debido a la mutación de células reproductoras (ICRP, 2007, pp. 45-49). La exposición del hombre a radiación ionizante por fuentes naturales es una característica inevitable de la vida en la tierra. Los elementos radiactivos naturales que contribuyen a la exposición en estas fuentes pueden categorizarse de la siguiente forma:

1.1.1. Fuentes primordiales

Son aquellos elementos radiactivos presentes en la tierra desde su formación, originados en la corteza terrestre y presentes en el medio ambiente, incluido en el ser humano, los radionucleidos con vidas medias comparables con la edad de la tierra y sus productos de desintegración como el U-238, Th-232 y K-40 existen en cantidades significativas en estos materiales. La irradiación que sufre el ser humano debido a fuentes terrestres se produce principalmente por radiación gamma de estos radionucleidos. Algunos otros elementos radiactivos de fuentes primordiales son la serie del U-235, Rb-87, Sm-147 y Lu-176 presentes en niveles muy bajos (UNSCEAR, 2000, p.89).

1.1.2. Fuentes Cosmogénicas

Son el resultado de la interacción de rayos cósmicos con la materia, su contribución a la dosis efectiva decrece en intensidad con la altura de la atmósfera. Los principales radionucleidos producto de interacciones por rayos cósmicos son el H-3, Be-7, C-14, Na-22, Ar-37, Kr-81, entre otros (UNSCEAR, 2000, p.114).

La intención de este trabajo se dirige al estudio del granito como material decorativo en interiores, y al ser extraído del suelo forma parte de las fuentes de radiación primordiales o primarias, por ello es importante conocer las cadenas de desintegración implicadas.

1.2. Principales cadenas de desintegración de fuentes primordiales

1.2.1. Cadena de desintegración del Uranio-238

En la Tabla (1-1) podemos observar la serie natural del Uranio. “El progenitor es el U-238 con un tiempo de vida media de 4.3 billones de años, casi la edad de la tierra, en esta cadena de desintegración se emiten ocho partículas alfa y seis betas junto con radiación gamma, esta serie termina en el Pb-206 estable que tiene una abundancia natural de 24.1%” (Rangacharyulu, 2013, p. 36).

Tabla 1-1: Cadena de desintegración del U-238

Elemento	Isótopo	Vida Media	Modo de decaimiento
Uranio	U-238	4.47x10 ⁹ a	alfa (100%)
Torio	Th-234	24.1 d	beta (100%)
Proactinio	234-Pa	6.70 h	beta (99.8%)
Uranio	U-234	2.46 x10 ⁶ a	alfa (100%)
Torio	Th-230	7.54x10 ⁴ a	alfa (100%)
Radio	Ra-226	1600 a	alfa (100%)
Radón	Rn-222	3.82 d	alfa (100%)
Polonio	Po-218	3.10 m	alfa (99.98%), beta (0.02%)
Plomo	Pb-214	26.8 m	beta (100%)
Bismuto	Bi-214	19.9 m	alfa (0.02), beta (99.98%)
Polonio	Po-214	164 μs	alfa (100%)
Plomo	Pb-210	22.2 a	beta (100%)
Bismuto	Bi-210	5.02 d	beta (100%)
Polonio	Po-210	138 d	alfa (100%)
Plomo	Pb-206	Estable	

Fuente: (Rangacharyulu, 2013, p. 36).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

1.2.2. Cadena de desintegración del Torio-232

En la Tabla (2-1) se observa la cadena de desintegración del Th-232, según Rangacharyulu (2013, p.34) su tiempo de vida media es de 1.4 billones de años, es decir que ha pasado por 0.32 vidas medias, su actividad y el número de átomos han sido reducidos al 80% de los valores iniciales desde la formación de la tierra. En el decaimiento se pueden observar seis partículas alfa, cuatro partículas beta y emisión de rayos gamma, decayendo finalmente en Pb-208 estable.

Tabla 2-1: Cadena de desintegración de Th-232

Elemento	Isótopo	Vida Media	Modo de decaimiento
Torio	Th-232	1.41x10 ¹⁰ a	alfa (100%)
Radio	Ra-228	5.7 a	beta (100%)
Actinio	Ac-228	6.1 m	beta (100%)
Torio	Th-228	1.9 a	alfa (100%)
Radio	Ra-224	3.6 d	alfa (100%)
Radón	Rn-220	55.6 s	alfa (100%)
Polonio	Po-216	0.14 s	alfa (100%)
Plomo	Pb-212	10.6 h	beta (100%)
Bismuto	Bi-212	61 m	alfa (36%), beta (64%)
Polonio	Po-212	0.299 μ s	alfa (100%)
Talio	Tl-208	3.1 m	beta (100%)
Plomo	Pb-208	estable	

Fuente: (Rangacharyulu, 2013, p. 34).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

1.2.3. Cadena de desintegración del Potasio-40

El K-40 forma parte de los radionucleidos que presentan una desintegración ramificada a dos isótopos estables, estos elementos radiactivos se conocen generalmente como radionucleidos de decaimiento directo o de no en serie. Según investigaciones de Froehlich el K-40 está presente en rocas usadas para extraer material de construcción como ladrillo y bloques de cemento, junto con el Rb-87 contribuyen a la dosis de exposición interna y externa con un valor en rocas cercanas a 0.07Bq/g (Froehlich, 2010; citado en Chávez, 2016, p.13).

“La forma natural del decaimiento del núcleo de K-40 a Ar-40 estable, se efectúa por dos modos de decaimiento: captura electrónica o por la emisión de una partícula β^+ (positrón) con una energía de 1.51MeV. Cabe señalar que solamente 11.2% de los átomos de K-40 se desintegran a Ar-40, el restante 88.8% de los átomos del K-40 sufren un decaimiento al isótopo radiogénico Ca-40 mediante emisión β^- ” (Vollbert, 1992, p.12). El esquema de decaimiento se puede observar en la Figura (1-1).

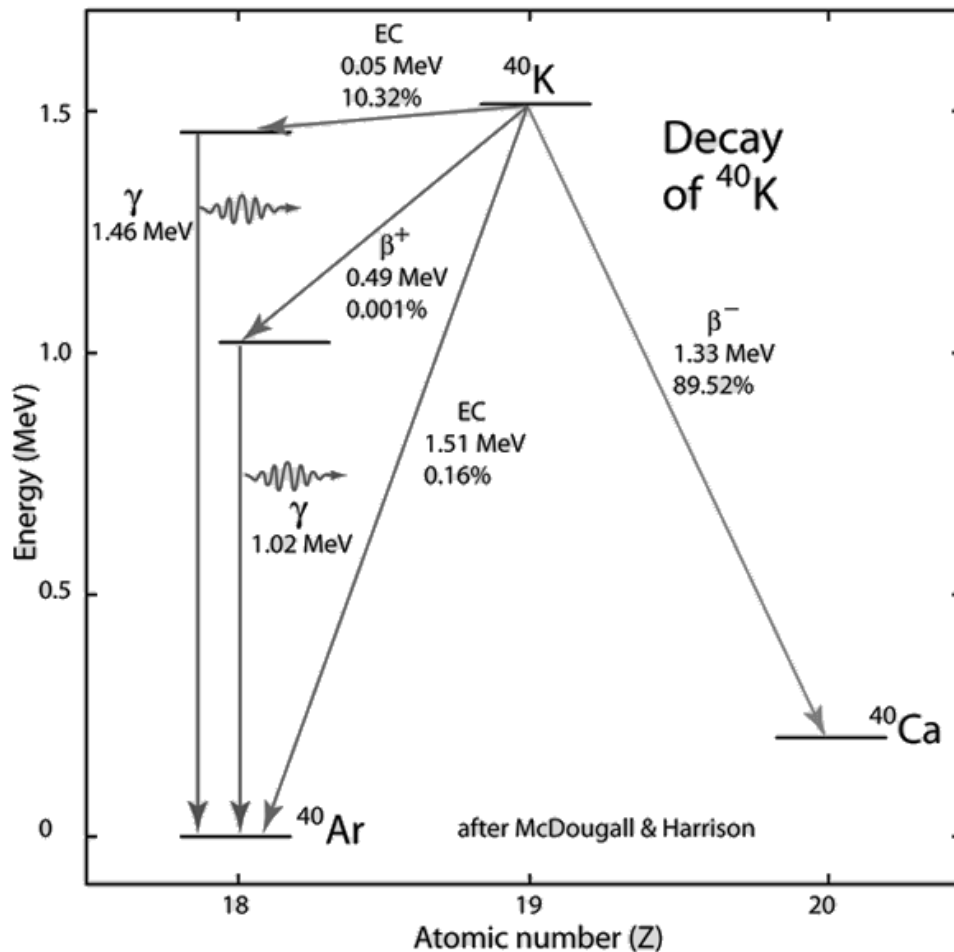


Figura 1-1: Desintegración del K-40 en Ar-40 por captura electrónica y por desintegración beta.

Fuente: (McDougall, 1989; citado en Vollbert, 1992, p. 13).

Descripción: En el esquema se muestra el decaimiento radiactivo del K-40, se observa que puede sufrir decaimiento por emisión de partículas beta, un 89.52% de ocurrencia con electrones decayendo a Ca-40 y por emisión de positrones tan solo con una ocurrencia del 0.01% quedando excitado.

1.3. Radiactividad y equilibrio secular en la muestra

La radioactividad de una muestra constituida por dos o más componentes es más complicada que una sola fuente de radiación ya sea porque: I) existe una mezcla de actividades independientes en su composición, II) posee una serie radiactiva o III) presenta un radionucleido que muestra dos tipos de decaimiento (desintegración ramificada)(Mook, 2001, p.61). En este último caso se encuentra el K-40 que decae por emisión β^+ y β^- , donde la desintegración total es simplemente la suma de sus probabilidades de decaimiento y en ese caso el periodo radiactivo total es la suma de la vida media del Ca-40 y del Ar-40. Para el caso I, si los valores del periodo radiactivo son muy diferentes es posible identificar las curvas de desintegración de las muestras, entonces se dice que la mezcla de actividades es independiente. Para analizar el caso II) es importante tomar en cuenta la presencia de series radiactivas en nuestro material de estudio, donde los núcleos productos son

también radiactivos, mientras un núcleo producto decae, el núcleo progenitor le aporta una cantidad de radionucleidos hasta un tiempo máximo donde comienza el equilibrio (Mook, 2001, pp. 61-64).

Los isótopos de largo período de decaimiento como el U-238, Th-232 y sus productos de desintegración presentan equilibrio secular, para el cual la vida media de los padres es mucho mayor que la de sus hijos, en ese caso, luego de cierto tiempo transcurrido la actividad de ambos es la misma.

Sin embargo, se debe considerar otros factores que pueden perturbar el equilibrio secular, por ejemplo, la exhalación de radón al encontrarse en estado gaseoso, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura puede liberarse o acumularse alterando las concentraciones del gas y el equilibrio secular en el suelo, a pesar de ello, se cumple que el tiempo de semidesintegración del radón es mucho mayor que el del polonio y así con sus demás hijos, puede restablecerse el equilibrio secular dando espera a unos siete periodos de semidesintegración del radón, equivalente aproximadamente a cuatro semanas (Mendoza, 2009, p.8).

1.4. Radiación Gamma

Son fotones de alta energía producto principalmente de átomos radiactivos que presentan una fase de desexcitación nuclear hasta volverse totalmente estables o por otros procesos subatómicos como la aniquilación de pares. Esta radiación electromagnética tiene la suficiente energía para ionizar la materia y, por lo tanto, generar daño celular, el efecto dañino de los rayos gamma depende de su energía, de la cantidad que se emite y de la distancia de la fuente de radiación, su intensidad disminuye exponencialmente con el aumento de la distancia (Stalter y Howarth, 2012, p.43). En la cadena del U-238 a más de la emisión de partículas alfa y beta, en la desintegración de la serie se presenta emisión de radiación gamma, por ejemplo, para el decaimiento del Ra-226 con emisión de una partícula alfa decae a Rn-222 en estado excitado emitiendo rayos gamma de una energía de 186 KeV con un porcentaje del 4% de ocurrencia. El Th-232 emite una partícula alfa desintegrándose en Ra-228 y genera radiación gamma con una energía característica de 60KeV con un porcentaje de 23% de ocurrencia, el K-40 también emite rayos gamma con energía característica de 1 461KeV. En la Tabla (3-1) se indica las energías características por emisión gamma para las series del U-238, Th-232, y K-40.

Tabla 3-1: Energías características de emisión de radiación gamma en las series de decaimiento del U-238, Th-232 y K-40, con su porcentaje de ocurrencia.

Serie del U-238			Serie del Th-232		
Elemento	Energía γ (KeV)	Ocurrencia (%)	Elemento	Energía γ (KeV)	Ocurrencia (%)
U-238	48	23	Th-232	60	23
Th-234	90	4	Ra-228	-	-
234-Pa	100	0.6	Ac-228	90	30
U-234	50	28	Th-228	80	28
Th-230	68	24	Ra-224	240	5
Ra-226	186	4	Rn-220	-	-
Rn-222	500	0.07	Po-216	-	-
Po-218	-	-	Pb-212	238	81
Pb-214	241	4	Bi-212	40	17
Bi-214	609	47	Po-212	-	
Po-214	800	0.014	Tl-208	2 620	100
Pb-210	46	81	Pb-208	Estable	
Bi-210	-	-	Decaimiento del K-40		
Po-210	800	0.001	K-40	1 461	11
Pb-206	Estable		Ar-40	Estable	

*- no presenta desintegración gamma.

Fuente: (Heath, 2002, p. 42).

Realizado por: Martínez, M.; Piedadmag, E. 2021.

Estas energías gamma características en cada emisión son el resultado de que el núcleo parece comportarse bajo las leyes de la mecánica cuántica, al tener estados cuantizados de energía, si el núcleo se excita por un proceso de decaimiento se emite energía de radiación gamma igual a la diferencia en la transición del estado inicial al estado final, completamente análogas a las transiciones observadas ópticamente en la cuantización de energía de la estructura atómica (Eisberg, 2000, p.625), y de la misma forma como se observa los espectros de absorción y de emisión producto de la desexcitación de la estructura atómica por técnicas espectroscópicas, existe la manera de observar la radiación emitida por el núcleo usando espectrometría gamma.

1.5. Espectrometría de radiación gamma

La información de un radionucleido obtenida mediante algún detector gamma da como resultado un espectro de la energía de todos los fotones que golpean el detector, su análisis puede determinar cualitativamente un radionucleido específico u otra información cuantitativa sobre la muestra en estudio. Generalmente en espectrometría gamma la variable independiente es el número de canales (o cantidades relacionadas con la energía, altura de pulso o longitud de onda) y la variable dependiente es la respuesta del detector (pulsos o cuentas)(Dunn y Mcgregor, 2012, p.414). Los

métodos de espectrometría de fotones de alta energía se pueden categorizar en dos grupos: la técnica por dispersión de energía, que trata de conservar y registrar la mayor cantidad de energía de los fotones, sus indicadores de deposición de energía incluyen emisión de luz, corriente eléctrica, cambios térmicos, entre otros, y por otro lado la técnica de dispersión de longitud de onda, que cuantifica esta magnitud para cada fotón incidente y muestra su espectro (Dunn y Mcgregor, 2012, pp. 431-432).

Al hablar de espectrometría se debe tener en cuenta que se hace referencia a todo un sistema de detección que puede variar en tipo, geometría y tamaño, sin embargo, lo que se busca a último término es encontrar la energía gamma característica para identificar cada radionucleido. A continuación, se muestran los esquemas de decaimiento (Figuras 2-1 y 5-1) y sus espectros de radiación gamma para el U-238, K-40 y Th-232 en las Figuras (3-1), (4-1) y (6-1) respectivamente.

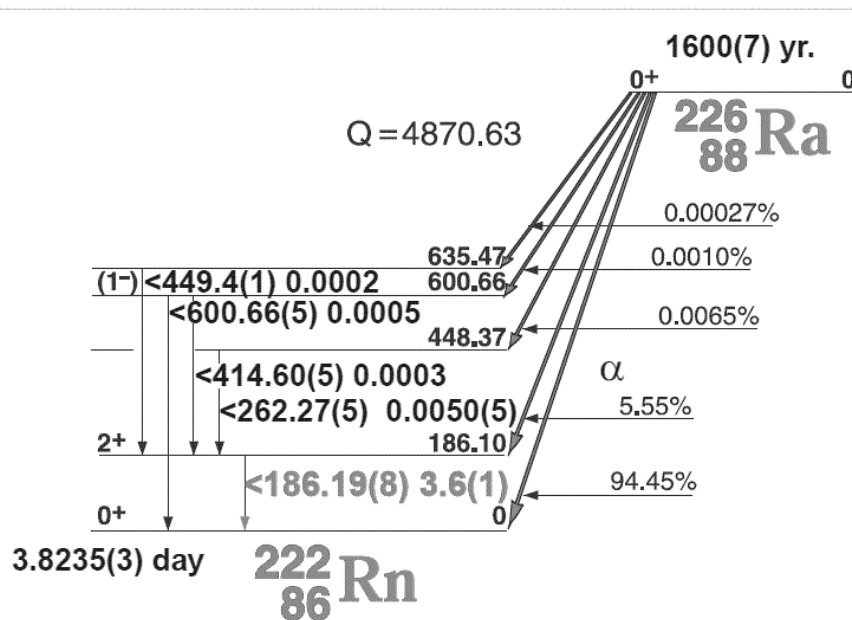


Figura 2-1: Esquema de desintegración del Ra-226 en Rn-222.

Fuente: (Heath, 2002, p. 42).

Descripción: En el esquema de la Figura (2-1) se muestra la desintegración del Ra-226 en Rn-222 donde una desexcitación del núcleo produce radiación gamma de 186.10 KeV.

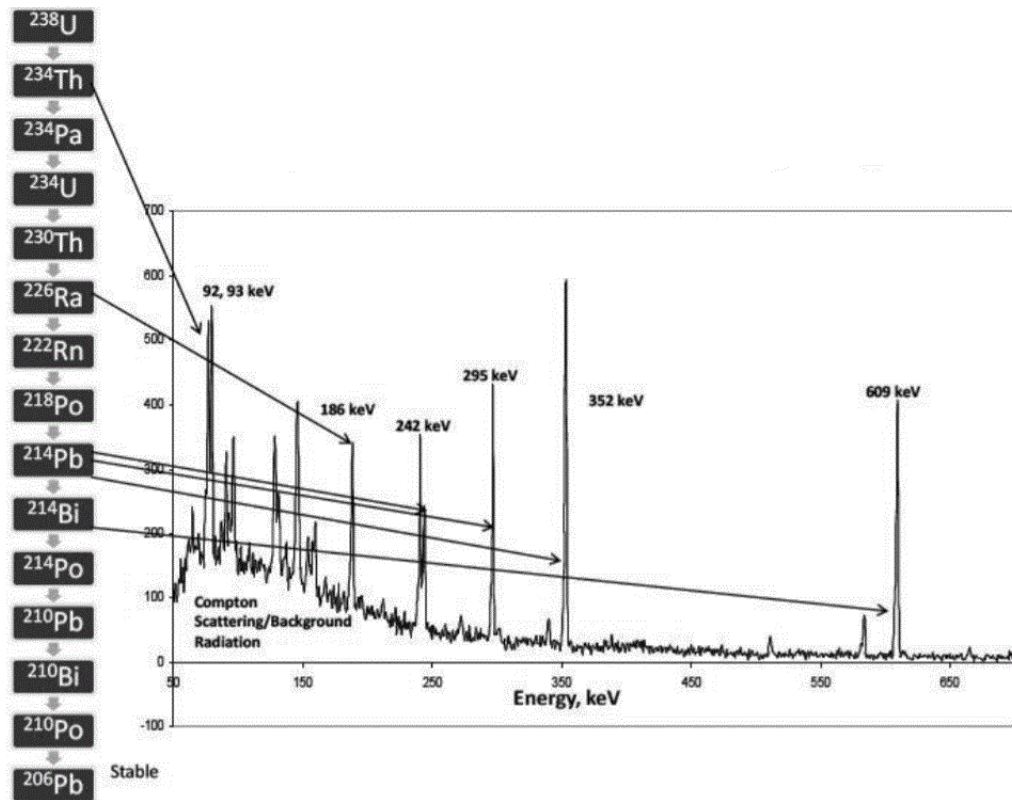


Figura 3-1: Espectro de rayos gamma del U-238 y sus productos de desintegración.

Fuente: (Rangacharyulu, 2013, p. 39).

Descripción: En la Figura (3-1) se observa un espectro gamma para el U-238 y sus productos de decaimiento, fue realizado con un típico detector semiconductor de germanio hiperpuro (HPGe), con especial interés se visualiza el Ra-226 con su fotopico de energía característica de 186KeV.

Recordando la Figura (1-1) del decaimiento del K-40 y su energía característica, se puede observar en la Figura (4-1) su espectro correspondiente, donde el análisis del fotopico es más intuitivo debido a que este isótopo no proviene de una serie radiactiva.

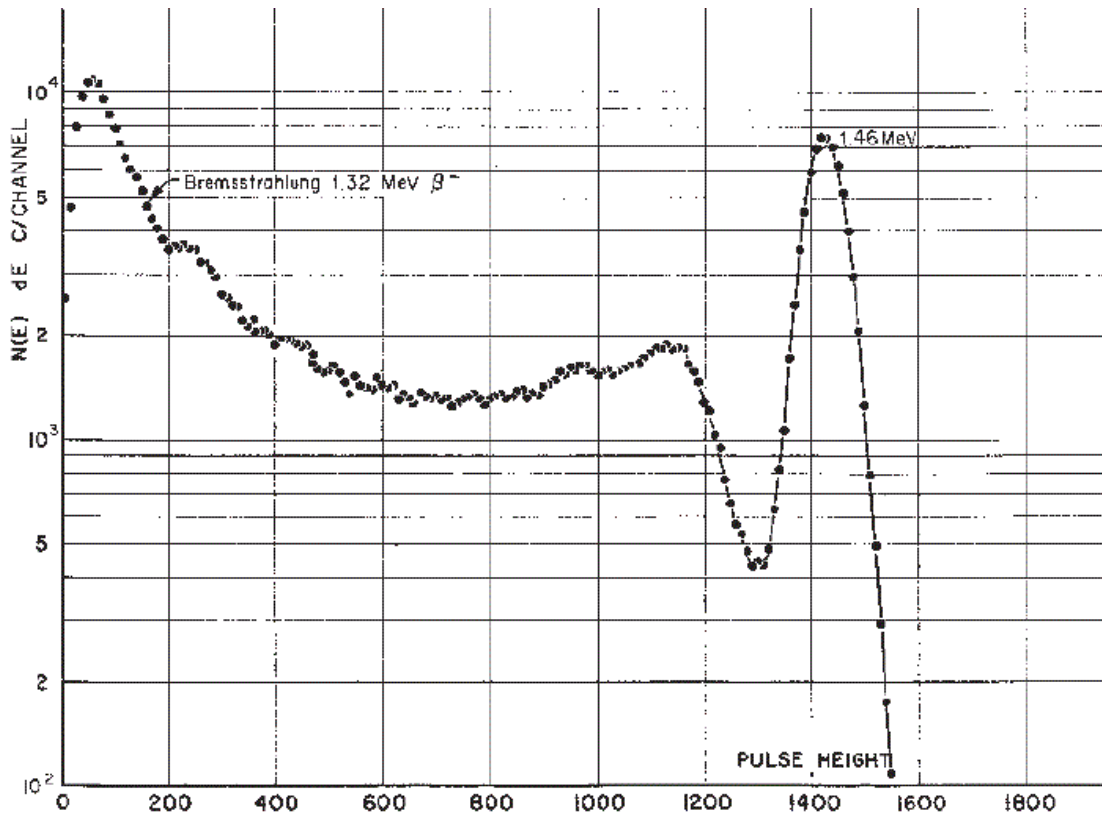


Figura 4-1: Espectro del K-40 con un detector centellador de NaI.

Fuente: (Heath, 2002, p. 42).

Descripción: La figura muestra el espectro de energía del K-40, para ello se usó un detector de centelleo de 3" x 3" de NaI, con una fuente a una distancia de aproximadamente un centímetro, donde es más evidente la forma como se maneja el espectro.

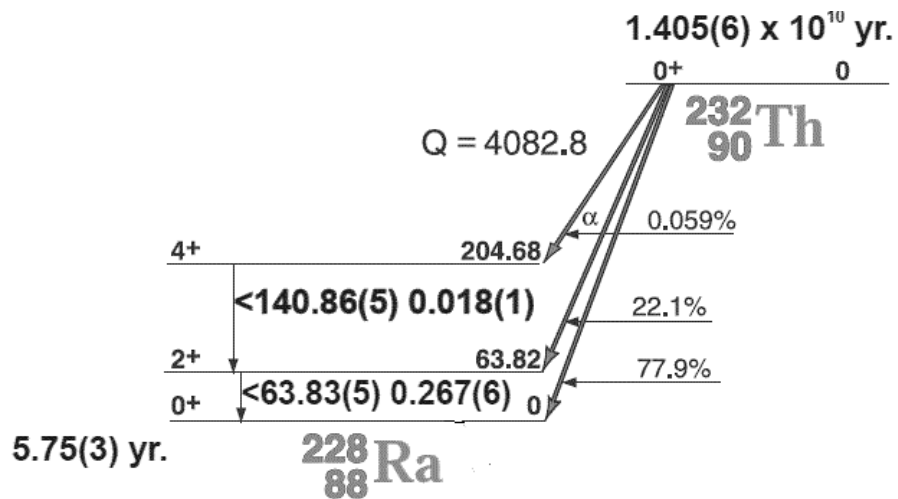


Figura 5-1: Esquema de decaimiento del Th-232 a Ra-228.

Fuente: (Heath, 2002, p. 42).

Descripción: La figura muestra un esquema de desintegración del Th-232 a Ra-228, donde en la desexcitación se emite radiación gamma menor a 63.83 KeV.

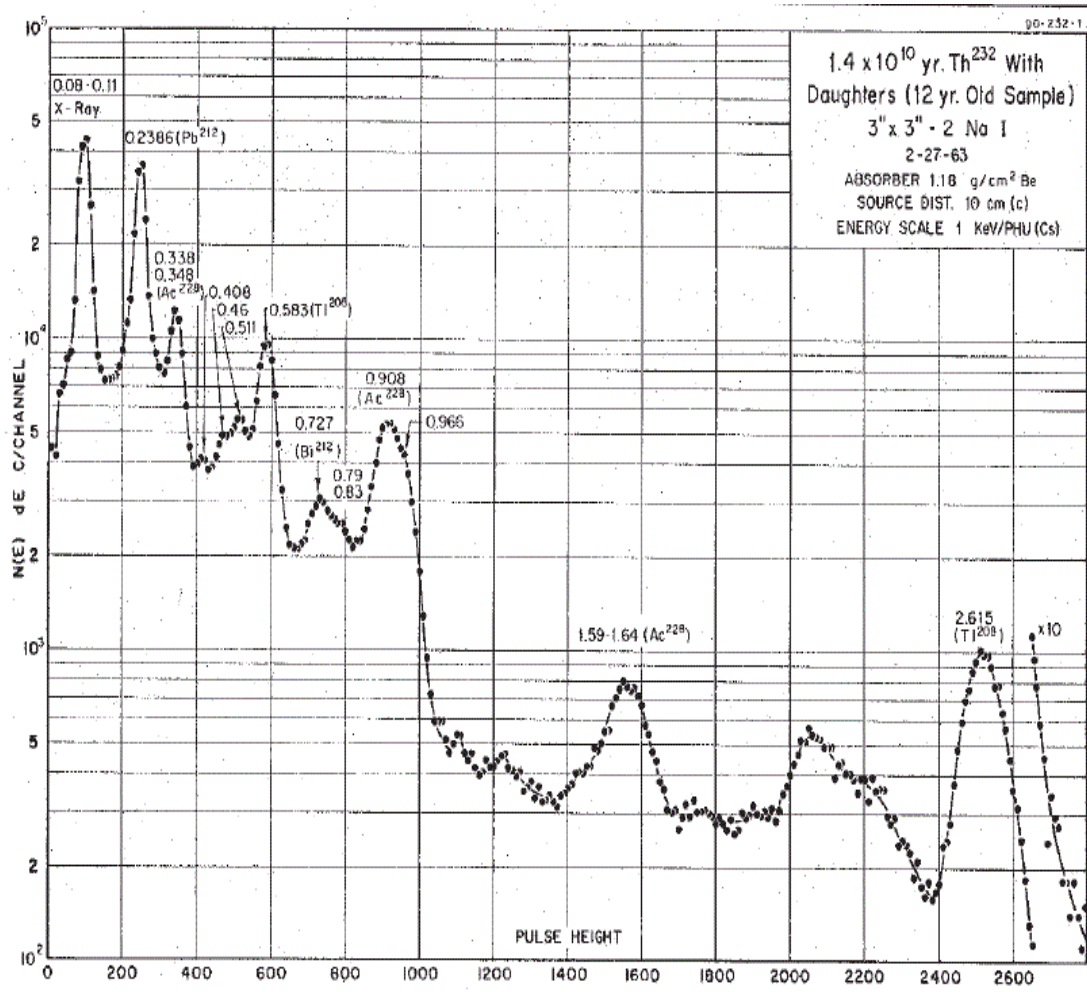


Figura 6-1: Espectro del Th-232 y sus productos de decaimiento.

Fuente:(Heath, 2002, p. 42).

Descripción: En la Figura se observa el espectro del Th-232 y sus productos de decaimiento, la gráfica fue realizada en un detector de centelleo de NaI de 3"x3".

Antes de adentrarse en el principio físico de cada uno de los equipos de detección que producen estos espectros y que se emplearán en el presente trabajo, es importante conocer características generales de la detección y de los instrumentos.

1.6. Generalidades de detectores de radiación gamma

Para hablar de los conceptos básicos de la detección de radiación gamma Dunn y McGregor sugieren lo siguiente:

Varios fotodetectores pueden proveer respuestas que son proporcionales a la energía depositada en el dispositivo, como detectores de centelleo y semiconductores donde el pulso de voltaje que recibe el detector, generalmente llamado altura de pulso es función de la energía depositada en el equipo, es decir:

$$h = f(E_d) \quad (1.1)$$

donde h es la altura del pulso y E_d es la energía depositada en el detector. (Dunn y McGregor, 2012, pp. 414-415).

Es evidente que no todos los pulsos que llegan al detector depositan la misma energía, para ello se suele usar una distribución gaussiana donde el valor medio de pulso h_0 representa la altura de pulso. Independientemente de su valor la respuesta de un detector es almacenada en canales relacionados con las magnitudes del impulso eléctrico que se quiere analizar. La información entra a este analizador multicanal (MCA), y según la energía que tenga el pulso es discriminado a un canal específico.

1.7. Resolución de detectores

La capacidad de un detector para distinguir entre energías gamma muy próximas se conoce como poder de resolución, se estima a partir de la relación entre el ancho del fotopico y su energía, si este es muy ancho, hay poco poder de resolución y no se puede distinguir un pico entre energías muy próximas (Rangel, 2017, pp.16-17). Es posible expresar la resolución del detector de la siguiente forma:

$$\text{Resolución} = \frac{FWHM}{\text{Energía}} \quad (1.2)$$

donde, FWHM es la anchura del fotopico a la mitad de su altura sobre la energía en el mismo. Heath define la anchura del fotopico como:

El resultado de los procesos físicos que producen ionización en el material y llegan al detector, se muestran como fluctuaciones estadísticas presentes en el espectro, en un detector centellador hay algunos factores que pueden afectar la amplitud de pulso observado:

- conversión de energía cinética de los primeros electrones a luz;
- eficiencia de luz recogida y transferida al fotocátodo;
- eficiencia del fotocátodo en la conversión de fotones a fotoelectrones;
- eficiencia del fototubo y del material del dinodo para ionizar electrones secundarios;
- multiplicación de electrones en el dinodo. (Heath, 2002, p. 9) .

Todos estos factores hacen que el valor de FWHM aumente en gran medida. El poder de resolución de detectores semiconductores es muy superior a los detectores de NaI (TI), permiten la separación de los rayos gamma que difieren en energías de solo unos pocos KeV (2 a 3KeV típicamente) en comparación con los grandes valores de los centelladores (Connor, 2019), en la

Figura (7-1) se muestra el espectro del Co-60, realizado tanto para un detector semiconductor de HPGe y un centellador de NaI, en él se muestra un valor típico del centellador de 75KeV de FWHM frente a los 2.35 KeV de FWHM del semiconductor.

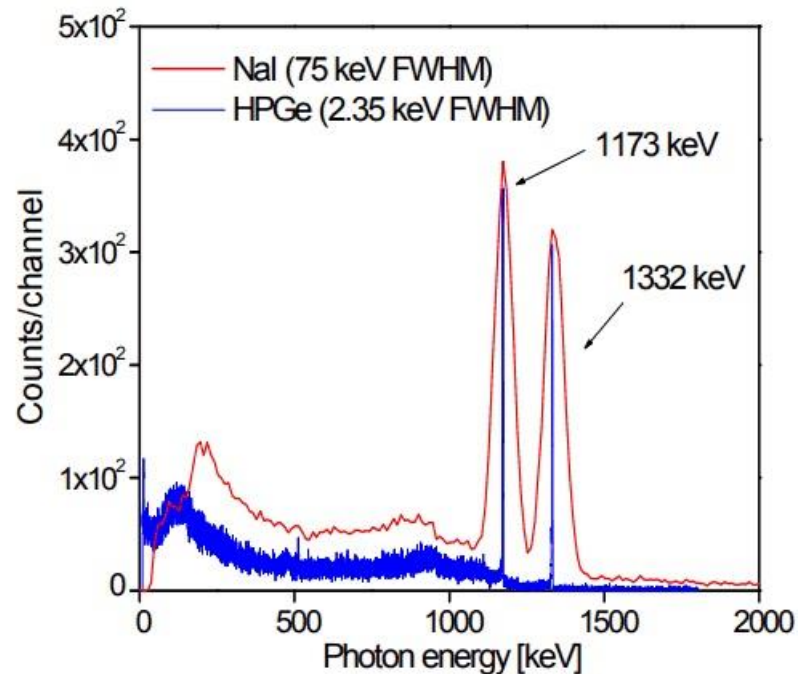


Figura 7-1: Comparación de los espectros con detectores de NaI y HPGe para el Co-60.

Fuente: (Connor, 2019).

Descripción: Se muestra el espectro del Co-60 con un detector de HPGe y NaI, en el que se evidencia el mayor poder de resolución del semiconductor con un valor de 2.35Kev de FWHM frente al centellador con 75KeV.

1.8. Eficiencia de detectores

La radiación que llega al detector es solo una fracción del total de sucesos radiactivos que se suscitan en la fuente, la eficiencia del detector depende de varios factores, naturaleza de la radiación, tipo de detector, su disposición geométrica y distancia de la fuente. En general se puede identificar dos tipos de eficiencia: la eficiencia absoluta que depende de la geometría del equipo, es decir la relación de ángulo sólido entre la fuente y el detector, y la eficiencia intrínseca que está relacionada con el equipo de detección, indica cuantos sucesos que llegaron al detector producen una señal analizable (CSN, 2014, p.9)., véase la Ecuación (1.3) y (1.4) de cada uno.

$$Eficiencia\ absoluta = \frac{Número\ de\ sucesos\ registrados}{Número\ de\ sucesos\ originados\ en\ la\ fuente} \quad (1.3)$$

$$Eficiencia\ intrínseca = \frac{Número\ de\ sucesos\ registrados}{Número\ de\ sucesos\ llegados\ al\ detector} \quad (1.4)$$

1.9. Calibración de detectores

El propósito de calibración de un detector es optimizar los resultados analizados, existen dos tipos de calibración en detectores de radiación gamma, la calibración de energía consiste en determinar una relación entre los canales del espectrómetro y la energía del rayo gamma medido, en la mayoría de detectores esta relación suele ser lineal, las fuentes de calibración estándar usadas generalmente son el Cs-137, Co-60, Ba-133 entre otras (Guarín, 2016, pp. 3-4).

La calibración en eficiencia permite cálculos de actividad adecuados, es un método para calibrar la altura de pulso, esta técnica de calibración busca una localización correcta de los fotopicos asociándoles la energía específica de cada radioisótopo según el canal en el que este sea detectado, por ello depende mucho del fabricante del equipo (Rangel, 2017, pp. 38-39).

1.10. Efectos de respuesta de detectores

En el espectro no solo se observan los fotopicos de energía de los radioisótopos, existen también otras regiones características que se pueden interpretar, estas zonas son el resultado de la interacción de la radiación con el material de detección y sus alrededores, incluso se puede observar el ruido electrónico del equipo, entre otros. Ya sean centelladores o semiconductores existen efectos que se toman en cuenta para mejorar la resolución y eficiencia en el dispositivo. Aunque los principales procesos de interacción con la materia sean el efecto fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares, la retrodispersión suele aparecer en la zona de bajas energías del espectro debido a efecto Compton suscitado con el blindaje del detector, esta protección suele recubrirse con un material de menor Z, generalmente cadmio o cobre, puesto que en el atenuador puede producirse efecto fotoeléctrico, y en el reordenamiento electrónico producción de rayos x, que pueden ser absorbidos por un material de bajo Z como los ya mencionados, es indispensable que el blindaje sea de un material de alto Z como plomo o hierro para evitar que la radiación de fondo afecte el espectro. Si la muestra radiactiva en estudio emite tanto radiación gamma como partículas beta, estas pueden ser absorbidas por los materiales que rodean al detector produciendo bremsstrahlung o radiación de frenado, en cuanto los rayos x ingresan al detector se produce una señal de energía continua que se muestra en el espectro, en algunos radionucleidos estas partículas beta tienen tanta energía (como en el Y-92) que pueden confundirse con un pico de radiación gamma. Suele usarse poliestireno o berilio para frenar estas partículas. Por último, se puede observar un efecto de detección de positrones que producen un espectro de aniquilación de 0.511MeV (Rangel, 2017, pp. 18-25).

1.11. Equipos de detección de radiación gamma

Es trascendental conocer el modo de operación de los sistemas de detección que se usan en la investigación, esto permite controlar la fiabilidad de resultados y su consistencia física, aunque se trabaja con dos detectores, un semiconductor de HPGe de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares del Ecuador, en este estudio se presta especial interés en el centellador de NaI (Tl) disponible en el Laboratorio de Técnicas Nucleares de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

1.11.1. Detectores Centelladores

Cuando la radiación gamma interactúa con la materia causa ionización y excitación en los átomos que la conforman, en ciertos materiales una fracción de esa energía se puede liberar en forma de luz visible, a estos materiales se los denomina centelladores. La Enciclopedia de la Física define al centelleo como “pequeños destellos de luz que se originan en ciertos materiales bajo el efecto de radiación ionizante” (Prokhorov, 1998; citado en Lecoq et al., 2017, p. 2). Los principales componentes de este tipo de detectores son el material centellador, el tubo fotomultiplicador y un analizador multicanal. Generalmente se busca que el material centellador ideal cumpla algunas características, entre ellas, convertir la energía cinética de las partículas incidentes en luz detectable con alta eficiencia, cuya conversión debe ser proporcional a la energía depositada, el tiempo de caída de luminiscencia inducida por el centelleo debe ser corto para que los pulsos de señal en el sistema electrónico se generen correctamente, el medio debe ser transparente para que de la propia emisión la longitud de onda no cambie y la luz sea colectada correctamente, además el índice de refracción debe ser parecido al del tubo fotomultiplicador y el fotocátodo para que en el acoplamiento no hayan pérdidas (Knoll, 2017, pp. 223).

No existe un material de centelleo que cumpla con todas estas características simultáneamente, la elección del material se hace según el propósito de uso e incluso se pueden usar en estado sólido, líquido o gaseoso, la principal clasificación que se tiene para un sinnúmero de materiales de centelleo es la división entre orgánicos e inorgánicos. Los primeros se usan generalmente en espectroscopia de partículas beta por su alto contenido de hidrógeno, en cambio los materiales inorgánicos, son a menudo más utilizados que los orgánicos para espectrometría gamma, tienen ciertas ventajas por su composición, tienden a tener más salida de luz, linealidad, y aunque los tiempos de decaimiento de luminiscencia en el centelleo sean relativamente largos, su alto número atómico le permite aumentar la probabilidad de que los rayos gamma sufran interacción con la materia (Knoll, 2017, p.223).

La fluorescencia es la emisión rápida de luz por parte de cualquier sustancia debido a estados electrónicamente excitados por algún medio externo, se diferencia de la fosforescencia por tener longitudes de onda más cortas y tiempos de decaimiento de luz más pequeños, además existe la fluorescencia retardada con un mayor tiempo muerto de caída de luz (Escudero Ballesteros, 2018, pp.3-4 ; Knoll, 2017, p.223). Para ser un buen centellador un material debe convertir la mayor cantidad de radiación incidente en fluorescencia rápida, y evitar la fosforescencia y la fluorescencia retardada.

1.11.1.1. Centellador de NaI (Tl)

El yoduro de sodio es un material inorgánico que centellea debido a su estructura cristalina, su mecanismo depende de los estados de energía de electrones de los átomos dados por la ecuación de Schrödinger en la red cristalina, la teoría de bandas es una herramienta importante que ayuda a la comprensión del movimiento electrónico para la conducción eléctrica, en la Figura (8-1) se observa un esquema típico de bandas para un cristal puro, en ella se puede apreciar la banda llena u ocupada, donde los electrones de las capas más internas no presentan movimiento alguno y están separadas de la banda de valencia por una zona llamada banda prohibida, en la banda de valencia están los electrones de la capa más externa que son los que se encuentran unidos a la red cristalina, de la misma forma esta se separa de la banda de conducción por una zona prohibida llamada brecha de energía, que representa la energía necesaria para que un electrón pueda escapar a la banda de conducción, en ella, se encuentran los electrones libres que ayudan a la conducción eléctrica (Birks, 1965, p.69).

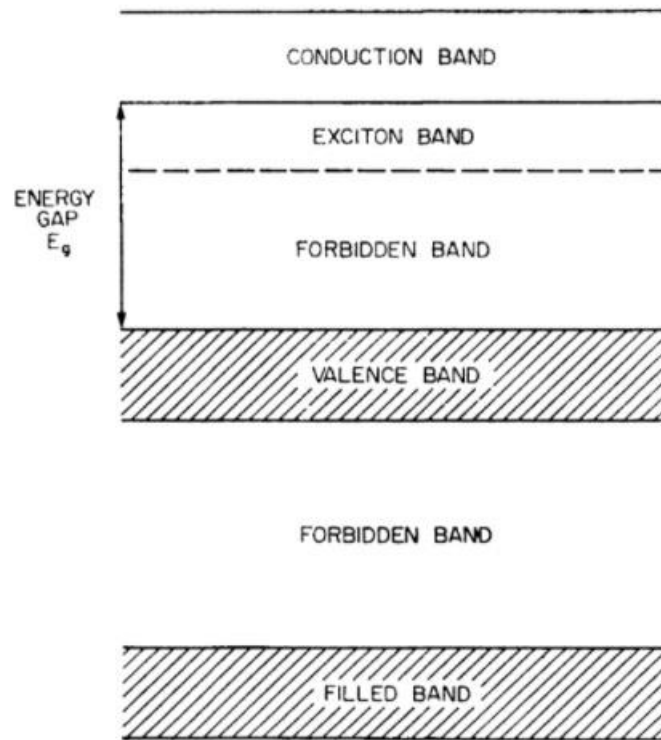


Figura 8-1: Esquema de bandas para un cristal puro típico.

Fuente: (Birks, 1965, p. 69).

Cuando los electrones de la banda de valencia son promovidos a la banda de conducción por absorción de radiación se genera un hueco en esta primera banda, la cual representa presencia de carga positiva, este sistema es conocido como excitón y se crea un vínculo electrón-hueco que pueden migrar libremente por la red cristalina, la banda de excitón se encuentra debajo de la banda de conducción y representa los electrones que han sufrido excitación (Birks, 1965, pp.69-70).

En los cristales puros generalmente el retorno de un electrón a la banda de valencia con emisión de un fotón es un proceso ineficiente, la brecha de energía para el cristal es tal que a menudo el fotón no termina en el rango del visible, para mejorar la probabilidad de emisión de luz en el proceso de desexcitación se añaden pequeñas impurezas al centellador inorgánico llamados activadores (Knoll, 2017, pp. 235-236). El trabajo de los activadores es crear espacios especiales en la banda prohibida, esto hace que existan nuevos niveles creados en la brecha de energía llamados centros de luminiscencia y al poseer valores energéticos menores que la totalidad de la zona prohibida dan lugar a un fotón en el espectro del visible. Véase la Figura (9-1).

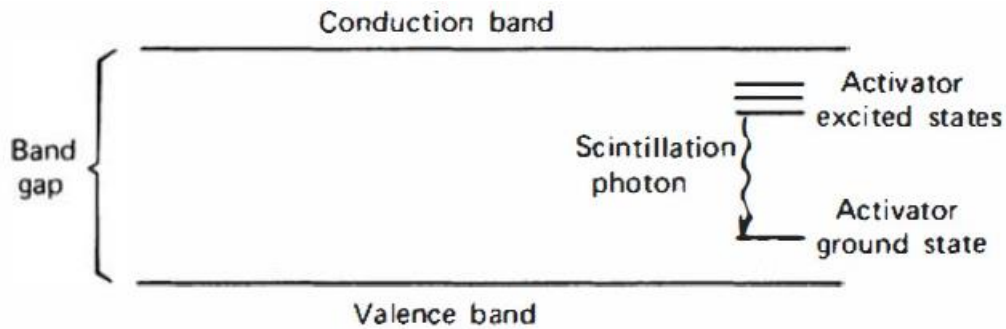


Figura 9-1: Estructura de bandas de energía de un cristal centellador activado.

Fuente: (Knoll, 2017, p. 235).

Los activadores generalmente suelen ser metales pesados como el talio, que al tener menor energía de ionización que el cristal, se ven ionizados por los huecos de la banda de conducción, los electrones libres migran por el cristal hasta encontrarse con un activador ionizado, este proceso da lugar a una configuración neutra con su propio conjunto de estados de energía excitados como se muestra en la Figura (9-1).

Para crear un electrón- hueco se necesita un promedio de 3 veces la energía de la banda prohibida y para el NaI el valor medio es de unos 20 eV, por cada MeV absorbido en el material de yoduro de sodio se crean alrededor de 5×10^4 electrones-hueco, su eficiencia se estima en un valor del 12%, es decir, que se obtendría un promedio de 12×10^5 eV de energía en luz visible. El rendimiento de luz de cristales de NaI (Tl) por rayos gamma es de aproximadamente 38 000 fotones por cada MeV de deposición de energía, con un tiempo de pulso de centelleo de 230ns (Knoll, 2017, pp. 237-239), todas estas características lo hacen un detector estándar para espectrometría gamma.

1.11.1.2. Interacción de la radiación gamma con el centellador

La radiación gamma es el medio que excita el cristal para que se produzcan los fenómenos ya antes descritos, las tres formas principales de interacción son el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares, sin embargo, Dunn y McGregor (2012, pp.418-419), muestran algunos posibles escenarios que pueden presentarse en el material por la presencia de fotones gamma:

- un fotón que ingresa en el centellador podría ser completamente absorbido por efecto fotoeléctrico tal que toda su energía es depositada en el material, o dicho fotón podría sufrir algunas dispersiones y luego ser absorbido totalmente y ceder toda su energía al detector;
- el fotón podría dispersarse una o más veces en el detector y luego escapar con una energía igual a la diferencia de energías entre el fotón y la que se deposita en el detector, lo cual se considera una pérdida;

-si la energía del fotón es mayor a 1.022MeV podría someterse a producción de pares, que luego generaría dos fotones de 0.511MeV por el proceso de aniquilación, puede ocurrir que toda esta energía sea depositada en el centellador, o a su vez que solo uno o ninguno de los fotones permanezcan en el material;

-si el fotón no interactúa con el detector la energía depositada es igual a cero.

Una vez se deposite la energía gamma en el cristal se produce el fenómeno de fluorescencia, al centellador se encuentra acoplado un tubo fotomultiplicador, sus componentes principales son un fotocátodo que convierte la salida de luz de centelleo, la cual suele ser extremadamente débil (con valores típicos de 1eV), en un pulso eléctrico de aproximadamente la misma energía. Guiados por campos eléctricos estos fotoelectrones entran a una estructura fotomultiplicadora que posee electrodos o dinodos donde estas partículas colisionan con el material depositando energía que resulta en la reemisión de más electrones desde la misma superficie, los materiales convencionales de los dinodos son el óxido de berilio (BeO), el óxido de magnesio (MgO) y el antimuro de cesio (Cs₃Sb), la relevancia de este proceso radica en multiplicar los fotoelectrones para obtener un pulso eléctrico suficientemente grande comparable con el centelleo original, un valor típico de un fotoelectrón multiplicado para centelladores es de 10^7 a 10^{10} electrones de salida (Knoll, 2017, pp. 280-281)., el análisis de los pulsos se realiza en el analizador multicanal, en este se discrimina la energía de pulsos en un canal dispuesto para cada energía particular, véase Figura (10-1), en el siguiente capítulo se verá el sistema para un radiómetro específico.

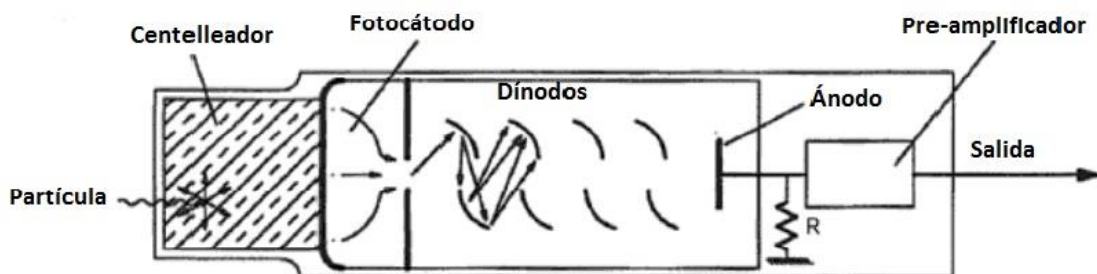


Figura 10-1: Esquema de funcionamiento de un detector centellador.

Fuente: (Dunn y McGregor, 2012, p. 436).

1.11.2. Detector semiconductor de germanio de alta pureza

Los semiconductores son sustancias cuya anchura en la región de energía prohibida es relativamente pequeña, esto es, 1 eV aproximadamente, a temperatura ambiente la energía térmica puede impulsar electrones hacia la banda de conducción, este no es un proceso típico y generalmente los electrones promovidos vuelven a caer en la banda de valencia con bastante rapidez, mientras se suscita otros son impulsados y otros regresan, esto crea que la banda de conducción este llena parcialmente en el mejor de los casos. A temperaturas muy bajas la energía

térmica no puede promover electrones y los semiconductores se comportan como aislantes (Knoll, 2017, p.366)., estado del material conveniente para la detección de fotones.

La radiación gamma o partículas cargadas que absorba el semiconductor excitan los electrones de la banda de valencia y los promueve a la de conducción, los huecos que los electrones dejan en la banda de valencia son portadores de carga positiva (Dunn y McGregor, 2012, p.439). En un semiconductor del mismo material se puede observar la existencia de un número superior de huecos frente a los electrones en la banda de conducción, es decir que los portadores de información mayoritarios serán los huecos de la banda de valencia, a estos se conocen como semiconductores tipo-p, por otro lado, cuando los portadores de información en su mayoría son electrones, son llamados tipo-n (Knoll, 2017, pp. 371-373).

La manera de crear los detectores semiconductores es tener una capa de semiconductor tipo-p y otra de tipo-n, de tal forma que se crea un diodo de unión PN separados por una región de agotamiento donde incide la radiación gamma. Una configuración de polarización inversa conduce la información para almacenarla en un condensador, la señal de pulso obtenida es analizada en un MCA. En la Figura (11-1) se muestra el proceso descrito.

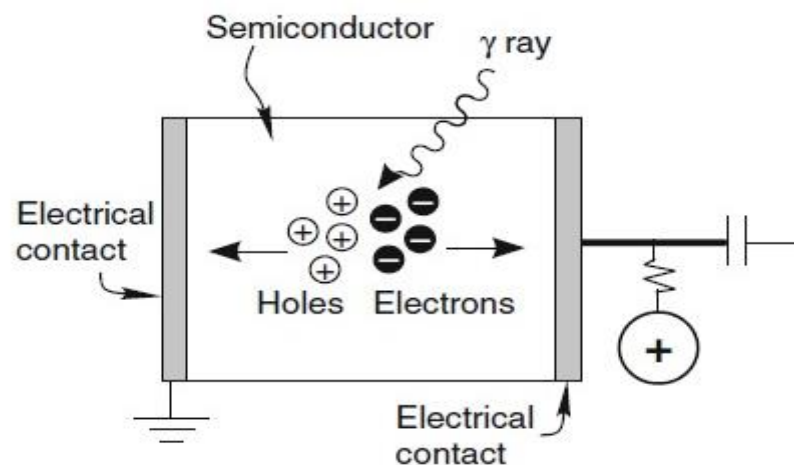


Figura 11-1: Principio físico de un detector semiconductor de HPGe.

Fuente: (Dunn; McGregor, 2012, p. 441).

Los materiales más empleados para detectores semiconductores son el germanio y silicio de alta pureza, el cadmio dopado con telurio, el yoduro de mercurio, entre otros. El detector semiconductor de germanio hiperpuro, es el espectrómetro usado por excelencia, presenta características físicas y químicas superiores a otros materiales, el poder de frenado y la probabilidad de interacción radiación-materia aumenta al presentar una densidad de 5.33 g cm^{-3} y un número atómico Z igual a 32, valores relativamente altos si comparamos con el Silicio que presenta una densidad de $2,33 \text{ g cm}^{-3}$ y un Z de 14 (Dunn y McGregor, 2012, p. 440). Los procesos químicos de elaboración del germanio con alta pureza suelen ser más eficiente que otros

materiales, alrededor de 10^9 átomos de la impureza por centímetro cúbico, comparado con los 10^{12} de refinación del Si (Knoll, 2017, p.416).

Además, los semiconductores presentan diferencias significativas con los centelladores, la movilidad de portadores de carga es tan alta que la conducción es un proceso muy eficiente, en cambio los materiales de centelleo son en su mayoría materiales aislantes que no conducen. La resolución de energía en un semiconductor es superior a otros detectores gamma, en gran medida se debe a la alta probabilidad de producir un gran número de cargas en la interacción, típicamente solo se necesita de 3 a 5 eV en la brecha de energía para producir un par electrón-hueco, comparado con los 25-40 eV de los contadores llenos de gas para producir un electrón-ion, y los 100 eV a 1KeV para producir un solo fotoelectrón desde el fotocátodo al fotomultiplicador de los detectores centelladores (Dunn y McGregor, 2012, p.440).

Una vez entendido cual es el mecanismo que rigen los sistemas de detección, se puede inferir información relevante para caracterizar la muestra en análisis a partir del espectro.

1.12. Análisis Cuantitativo de Espectros

Además de lograr la identificación de las energías características de un radionucleido específico, el espectro gamma permite hacer medidas cuantitativas, las respuestas espectrales se pueden usar para identificar el radionucleido y su concentración en la muestra, según Dunn y McGregor (2012, pp.422-423) el análisis del área bajo picos aislados en el espectro permite determinar las desintegraciones en un tiempo de monitoreo determinado para cada radionucleido, es decir, las cuentas en el tiempo.

Si se llama A_j al área neta debajo de cada uno de los j fotopicos del espectro, se puede calcular de la siguiente manera:

$$A_j = \int_{n_1}^{n_2} (r_n - Bg_n)dn \quad (1.5)$$

donde, r_n es la respuesta del detector y Bg_n es la radiación de fondo en la medición, n_1 y n_2 son los canales en los que se encuentra el pico.

Si no se superponen con otros picos se puede usar un enfoque más simple, puesto que los canales almacenan el número de pulsos, el área bajo la curva se puede obtener de forma discreta como:

$$A_j = \sum_{n=n_1}^{n_2} (r_n - Bg_n) \quad (1.6)$$

que dividido para el tiempo de medición da como resultado la tasa de recuento para la muestra, la actividad, actividad específica, dosis y otras magnitudes dosimétricas se pueden empezar a calcular partiendo de ella (Dunn y McGregor, 2012, pp. 422-423). Cabe mencionar que esta forma general

de cuantificar magnitudes dosimétricas desde el espectro es ideal, la ingeniería de la detección hace que el proceso sea mucho más complejo, sin embargo, es una primera aproximación a la información que se puede extraer de un espectro. En el capítulo 2 se verá cómo se calcula la concentración de actividad para un detector en particular (centellador de NaI (TI)).

1.13. Magnitudes dosimétricas de interés

En el campo del análisis de protección radiológica relacionada con materiales de construcción existen algunas magnitudes dosimétricas que son utilizadas para estimar el daño producido por la exposición a radiación como:

Tasa de dosis efectiva

Permite estimar la cantidad de energía ionizante depositada en el cuerpo humano tomando en cuenta el tipo de radiación impartida en un periodo de exposición determinado. En países, como Japón, China, Canadá, Estados Unidos y la Unión Europea se recomienda un límite de tasa de dosis efectiva anual de 1mSv a^{-1} , y tan sólo en circunstancias especiales de 5 mSv a^{-1} (Niu, 2011, pp. 3-10);(EURATOM, 2014, p. 39);(Nuclear Canadian Nuclear Safety, 2020); (EHSS, 2018, pp. 5-6) . Sin embargo, la UNSCEAR ha reportado que la tasa de dosis efectiva anual promedio mundial ocasionada por fuentes naturales es de 2.4 mSv a^{-1} (UNSCEAR, 2008, pp. 4).

Como parte de esta magnitud se considera también el exceso de dosis originada por la contribución de los emisores gamma presentes en la corteza terrestre (Th-232, Ra-226 y K-40). Su aporte se estima mediante la aplicación de la interacción de la radiación gamma con los materiales de construcción, utilizando un algoritmo computacional se obtiene que para los NORM, el promedio de tasa de dosis de *background* es de 50 nGy h^{-1} a 70 nGy h^{-1} , datos utilizados por la Comisión Europea para el desarrollo de sus normativas (European Commission, 1999, pp.14-15).

Tasa de dosis específica absorbida

Se define como tasa de dosis específica absorbida a la cantidad relacionada con la exposición referida en su mayoría a emisores gamma, es decir indica el potencial nivel de inhalación de la radiación ionizante de los radionucleidos presentes en los materiales de construcción para el ser humano (Markkanen, 1995, p.17)., agencias de control como la Comisión Europea considera los siguientes datos como referencia:

Tabla 4-1: Tasa de dosis específica de acuerdo con el tipo de estructuras.

Estructuras de edificios que provocan irradiación	Tasa de dosis específica absorbida [nGy h ⁻¹ por cada Bq kg ⁻¹]		
	Ra-226	Th-232	K-40
Piso, techo, paredes (todas las -estructuras)	0.92	1.1	0.08
Piso y paredes(techo de madera)	0.67	0.78	0.057
Piso (casa de madera con piso de concreto)	0.24	0.28	0.02

Fuente: (European Comission, 1999, p. 12).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Los datos han sido obtenidos mediante algoritmos basados en el factor built up y atenuación exponencial (Markkanen, 1995, p. 11). Dan información acerca del potencial aporte de la dosis de los materiales de construcción de acuerdo con la constitución de la vivienda.

1.14. Índices alfa y gamma

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la exposición a radiactividad natural por emisores gamma recae en tres radionucleidos (Ra-226, Th-232 y K-40), elementos que son componentes fundamentales de los suelos, en consecuencia, es importante cuantificar las concentraciones de actividad de cada uno. Es así como agencias internacionales de protección radiológica han desarrollado indicadores utilizados para medir el nivel de riesgo relacionado a materiales de construcción.

1.14.1. Índice alfa

Es importante señalar la contribución de radiación alfa por la exhalación de Rn-222 en interiores, ligada a la actividad específica del Ra-226 en los materiales de construcción. En el presente trabajo se determinará el índice alfa con la siguiente fórmula:

$$I_{\alpha} = \frac{A(Ra^{226})}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (1.7)$$

donde $A(Ra^{226})$ es la actividad específica del Ra-226 en Bq kg⁻¹. Es decir, si la actividad específica del Ra-226 supera 200 Bq kg⁻¹ ($I_{\alpha} > 1$) existe alta probabilidad que los materiales de construcción exhale Rn-222 a un nivel comparable de 200 Bq m⁻³ el cual es considerado perjudicial para la salud (Righi y Bruzzi, 2006, pp. 161); (The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, 2000, pp. 28-30).

1.14.2. Índice gamma

En 1999 la Comisión Europea publicó un escrito denominado “*Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials*”, en el cual se propone un indicador referente a radiactividad gamma de materiales de construcción en función de la actividad específica de las fuentes primordiales de radiación natural (European Commission, 1999, p.8), definido de la siguiente manera:

$$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{A'(Ra^{226})} + \frac{A(Th^{232})}{A'(Th^{232})} + \frac{A(K^{40})}{A'(K^{40})} \quad (1.8)$$

donde $A(Ra^{226})$, $A(Th^{232})$ y $A(K^{40})$ son las actividades específicas de Ra-226, Th-232 y K-40 de los materiales estudiados medidas en $Bq\ kg^{-1}$. Mientras que los denominadores $A'(Ra^{226})$, $A'(Th^{232})$ y $A'(K^{40})$ son obtenidos tomando en cuenta el criterio de tasa de dosis efectiva anual (\dot{D}_{eff}), de esta manera:

$$\dot{D}_{eff} = (k_n A'(n) - Bg) t \cdot d \quad (1.9)$$

donde k_n es la tasa de dosis específica absorbida, $A'(n)$ la actividad específica del radionucleido, Bg es tasa de background, t el tiempo de exposición y del factor de conversión de dosis ($0.7\ Sv\ Gy^{-1}$) (European Commission, 1999, pp.14-16).

Entonces, se puede obtener un índice gamma por cada criterio de dosis, así:

Tabla 5-1: Índice gamma de acuerdo con el criterio de dosis.

Tasa de dosis efectiva anual	Índice gamma
$0.5\ mSv\ a^{-1}$	$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{100\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A(Th^{232})}{100\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A(K^{40})}{1\ 000\ Bq\ kg^{-1}}$
$1\ mSv\ a^{-1}$	$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{300\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A(Th^{232})}{200\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A(K^{40})}{3\ 000\ Bq\ kg^{-1}}$
$3\ mSv\ a^{-1}$	$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{700\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A(Th^{232})}{600\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A(K^{40})}{8\ 000\ Bq\ kg^{-1}}$

Fuente: (European Commission, 1999, p. 14); (The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, 2000, p. 20); (UNSCEAR, 2000, p. 92).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Descripción: Los índices de la Tabla (5-1) son obtenidos con diferentes criterios de dosis: $0.5\ mSv\ a^{-1}$ corresponde a la dosis promedio de los países nórdicos; $1\ mSv\ a^{-1}$ dosis recomendada por entidades reguladoras como ICRP y Comisión Europea; y $3\ mSv\ a^{-1}$ ponderado de dosis a nivel mundial.

De acuerdo con *The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden*. los materiales de construcción considerados como fuentes de radiación gamma no deberían exceder la siguiente inequación (The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden 2000, pp. 63-64).

$$I_{\gamma} < 1 \quad (1.10)$$

El valor del índice de concentración de actividad igual a 1 puede utilizarse como una herramienta de selección conservadora para identificar los materiales que pueden hacer que se supere el nivel de referencia. La Comisión Europea recomienda a sus países miembros implementar normativas guiadas por las publicaciones realizadas, es así que se puede observar los países que lo han incorporado a su legislación de protección radiológica:

Tabla 6-1: Regulaciones nacionales propias con respecto a los NORM empleados como materiales de construcción.

País	Normativa	Niveles de referencia (Bq kg ⁻¹)
Alemania	“Nuclear Law”.2000. “Radiation Protection Ordinance”.2001.	$A(Ra^{226})=200$ (en equilibrio)
Austria	“Radiation Protection Act”.2002. “Radiation Protection Ordinance”.2005.	$\frac{A(K^{40})}{10\,000} + \frac{A(Ra^{226})(1 + 0.15\epsilon\rho d)}{1\,000} + \frac{A(Th^{232})}{10\,000} < 1$
Eslovenia		$A(Ra^{226}) + 1.25A(Th^{232}) + 0.086A(K^{40}) < 370$
España	Real Decreto 783/2001 Reglamento de Protección Sanitaria contra radiaciones Ionizantes.2001.	$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{300} + \frac{A(Th^{232})}{200} + \frac{A(K^{40})}{3000} < 1$
Letonia		Interior de Viviendas $\frac{A(Ra^{226}) + A(Th^{232})}{170} < 1$ y $A(K^{40}) < 1\,500$ Exterior de viviendas. industrias. calles $\frac{A(Ra^{226}) + A(Th^{232})}{250} < 1$ y $A(K^{40}) < 2\,000$ Exterior de Industrias. carreteras $\frac{A(Ra^{226}) + A(Th^{232})}{300} < 1$ y $A(K^{40}) < 2\,500$
Lituania		Materiales de construcción

		$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{300} + \frac{A(Th^{232})}{200} + \frac{A(K^{40})}{3000} < 1$
		Materiales en calles y carreteras
		$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{700} + \frac{A(Th^{232})}{500} + \frac{A(K^{40})}{8000} < 1$
Luxemburgo	“Regulations of the Grand Duchy”	$A(Ra^{226}) = 350 \quad A(Th^{232}) = 250 \quad A(Ra^{40}) = 5000$
Noruega		$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{700} + \frac{A(Th^{232})}{500} + \frac{A(K^{40})}{8000} < 1$
Polonia		$I_{\gamma} = 0.0027A(Ra^{226}) + 0.0043A(Th^{232}) + 0.0027A(K^{40}) < 1$ $A(Ra^{226}) < 185$
República Checa		$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{300} + \frac{A(Th^{232})}{200} + \frac{A(Ra^{40})}{3000} < 0.5$ (usados en gran cantidad) o 1 (usados en menor cantidad)
Rusia		Edificios nuevos $A_{eff} = A(Ra^{226}) + 1.25 A(Th^{232}) + A(K^{40}). \quad A_{eff} = 370$ Construcciones industriales y carreteras de ciudades $A_{eff}=740$
Suecia	“Radiation Protection Act(1988/293)”. “Radiation Protection Ordinance (1988/293)”	$I_{\gamma} = \frac{A(Ra^{226})}{300} + \frac{A(Th^{232})}{200} + \frac{A(K^{40})}{3000} < 0.5$

Fuente : (Piedecausa García et al., 2011, p. 52).

Realizado por: Martínez, M.; Piedemag, E. 2021.

Descripción: Países de la Comunidad Europea que han implementado normativas respecto a la radiación gamma en NORM utilizados como materiales de construcción con sus propios niveles de referencia en función de la concentración de actividad específica (C_{Ra} , C_{Th} , C_K)* ϵ , emanación de energía * ρ densidad del material* d espesor

1.15. Efectos causados por exposición a radiación natural

La radiación ionizante a la que el ser humano está expuesto de manera constante puede causar afecciones a la salud si se exceden los niveles considerados por los entes reguladores. Se pueden tomar en cuenta dos criterios según el daño biológico.

La exposición interna está relacionada directamente con la inhalación de radón (Rn-222 y Rn-220) debido a que éste es un gas noble, puede moverse con libertad por los poros del material de

construcción y así llegar al aparato respiratorio del ser humano. Se han realizado estudios alrededor del mundo para determinar el potencial daño a la salud por la presencia de este radionucleido en el aire, como el realizado por Darby et al., en 2004 que tiene por objetivo determinar el riesgo de cáncer de pulmón asociado con la exposición en el hogar a los productos de desintegración radiactiva del gas radón natural, mediante un diseño colaborativo con análisis individual de 13 estudios con grupos de control en 9 países europeos. En él se comprueba que por cada 100 Bq m⁻³ de Rn-222 que excede el nivel recomendado (~200 Bq m⁻³) aumenta un 16% la probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón (Darby et al., 2004, pp. 4-5). Además, según la OMS su inhalación es la segunda causa de este tipo de cáncer en el mundo, tan solo después del tabaquismo (OMS, 2021).

En cambio, la exposición externa debido a materiales de construcción está ligada directamente a los emisores de radiación gamma como el K-40, Ra-226 y Th-232. Por ende, se debe considerar los riesgos a la salud de cada uno de ellos (UNSCEAR, 2000, pp.89-92). De acuerdo con Brugge y Buchner cuando la dosis de Ra-226 excede 100 Sv, del 30 al 50% de personas desarrollan cáncer en huesos, mientras que en dosis menores el riesgo es mínimo. La peligrosidad de la presencia de Ra-226 en materiales de construcción está ligada a su progenie en su mayoría (Brugge y Buchner, 2012, p.10).

En cuanto a los efectos biológicos causados por la presencia del Th-232 es conveniente indicar que una de las vías de ingreso de este radionucleido al cuerpo humano es por medio de la piel, para después entrar al torrente sanguíneo y posteriormente depositarse en los huesos, donde en promedio permanece alrededor de 800 días (Washington State Department of Health, 2002, pp.1-3). De acuerdo con ATSDR las personas que han estado expuestas a grandes cantidades de Th-232 desarrollan cáncer de páncreas y pulmón (ATSDR, 1990, pp. 1-5).

1.16. Granito

Antes de conceptualizar al granito como tal es importante conocer definiciones puntuales utilizadas en petrología. El estudio del suelo desde el punto de vista geológico comprende tanto minerales como rocas, los minerales son sustancias sólidas inorgánicas de origen natural con una estructura química definida, generalmente cristalinos y homogéneos, esto le da características fisicoquímicas particulares (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016, p.1). Por otra parte, las rocas son el conjunto de varios minerales sólidos que se agrupan de forma natural con una composición química no específica mediante procesos geológicos de formación. En esta clasificación se encuentran las rocas sedimentarias que se definen como el resultado de la acumulación de sedimentos líquidos que se han petrificado por meteorización, erosión, transporte, deposición o diagénesis (Soto, 2005, p. 100). También se encuentran las rocas ígneas plutónicas o intrusivas que son el producto del enfriamiento lento del material rocoso caliente y móvil (magma) a

profundidades considerables en el manto, debido a la rapidez de este procedimiento las agrupaciones minerales se cristalizan y forman grandes yacimientos de granito, los cuales se diferencian en textura y porcentajes de minerales (Toselli, 2010, p.188). El último grupo de rocas en esta clasificación son las metamórficas, corresponden a la transformación de rocas ya formadas (ígneas plutónicas o sedimentarias) mediante procesos que involucran grandes magnitudes de temperatura y presión además de fluidos termales (Rodríguez, González y Giner, 1970, p.57). La abundancia de estas formaciones minerales se puede observar en el Gráfico (1-1).

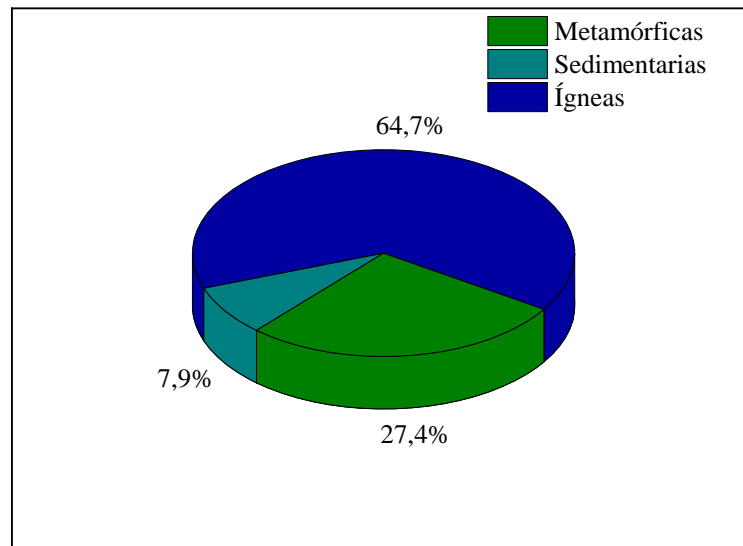


Gráfico 1-1: Abundancia de las rocas en la corteza terrestre.

Fuente: (Varela, 2014, p.46).

Descripción: Rocas: ígneas plutónicas 64.7%, metamórficas 27.4% y sedimentarias 7.9%.

De acuerdo con Varela (2014, pp.51-52) en el área de la geología para determinar el tipo de roca ígnea es utilizado el diagrama AQFP, como se observa en la Figura (12-1), presenta una forma geométrica de rombo, en los vértices correspondientes a su diagonal mayor se encuentran diametralmente opuestos el cuarzo y el feldespatoide, mientras que en los dos vértices sobrantes se encuentran feldespatos alcalinos y plagioclasa, en el área del paralelogramo se encuentran los distintos tipos de rocas ígneas, así:

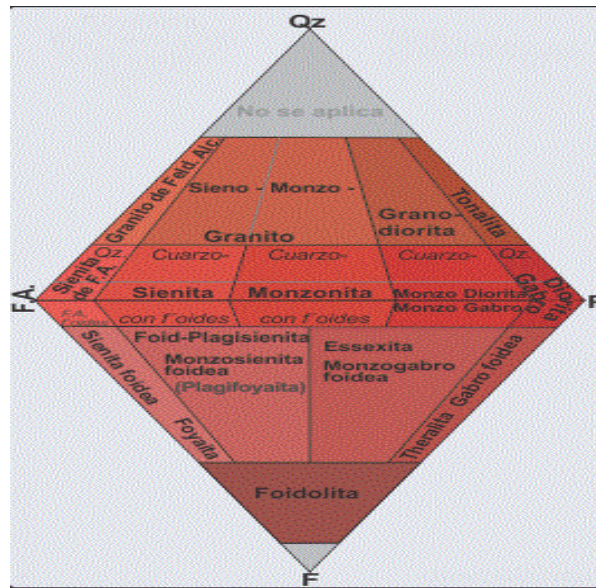


Figura 12-1: Diagrama QAFP para la determinación de tipos de rocas ígneas intrusivas.

Fuente: (Griem, 2015).

Para la clasificación de estas rocas se debe primero cuantificar porcentualmente la composición de los tres principales componentes (cuarzo, feldespatos alcalinos, feldespatoides y/o plagioclasa), después ubicar en la región correspondiente a su tipo (Varela, 2014, pp.51-52).

Es así como se puede definir al granito como una roca ígnea plutónica holocristalina, es decir que entre sus componentes principales en términos de volumen predominan los cristales en un 90% (Rodríguez, González y Giner, 1970. p. 49). Los elementos esenciales del granito son el cuarzo que es la forma cristalina del SiO_2 y el feldespato que corresponde a silicatos de aluminio de sodio o potasio; por lo general el porcentaje de estos minerales en el granito suelen ser del 10 al 70% y del 30 al 60% respectivamente, siendo sus principales componentes. Los diversos colores, dureza y brillo de este material son debido a las diferentes combinaciones posibles de concentración de cuarzo, feldespato y micas (Soto, 2005, pp. 75); (Rodríguez et al., 1970, p.2)., además el tamaño de los cristales depende de la temperatura del magma, la profundidad a la cual comenzó el proceso de enfriamiento y el tiempo que conllevó (Pinzón, 2017, p.10).

De acuerdo con Pinzón (2017, p.26) la composición química del granito antes mencionada, da lugar a las siguientes propiedades físicas como:

- Aislante de humedad.
- Resistente a cambios bruscos de temperatura.
- De largo tiempo de envejecimiento.
- Baja porosidad superficial.

Este material es muy utilizado para revestimiento de paredes, pisos y mesones como elemento decorativo, de esta manera se aprovecha al máximo sus características físicas dentro o fuera de cualquier tipo de edificación.

Aunque en el país existen formaciones graníticas ricas en cuarzo ubicadas en Tres Lagunas, Sigsig, Papallacta, entre otros (Litherland et al., 1994, pp. 16), en Ecuador estos yacimientos rocosos no están siendo explotados, es decir los granitos utilizados en la construcción o decoración son en su totalidad importados de países como Brasil, Argentina, Turquía, China, India, España, Italia, etc.,(Pinzón, 2017, p. 26).

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que en el campo de la construcción y decoración en muchas ocasiones se suele comercializar como “granito” a rocas que no cumplen necesariamente con las características geológicas antes mencionadas.

1.16.1. Radiactividad del granito

Como se ha mencionado en apartados anteriores los elementos provenientes del suelo suelen estar enriquecidos con las cadenas radiactivas de U-238 y Th-232 además de tener niveles considerables de K-40. Es por esta razón que es importante analizar la potencial radiactividad de materiales como el granito. En la Tabla (7-1) se puede observar valores de actividad específica de diferentes rocas graníticas utilizadas en construcciones de viviendas de algunos países alrededor del mundo:

Tabla 7-1: Recopilación de resultados de actividad específica de los radionucleidos presentes en el granito con su procedencia.

Muestra/nombre comercial	U-238 (Bq Kg ⁻¹)	Ra-226 (Bq Kg ⁻¹)	Th-232 (Bq Kg ⁻¹)	K-40 (Bq Kg ⁻¹)	País de origen	Publicación de referencia
Granito verde	N.E.	57	49	560	Italia	Righi y Bruzzi, 2006.
Granito rojo	N.E.	153	360	1600	Italia	
Granito rosado	N.E.	147	200	1200	Italia	
Granito rosado	N.E.	33	44	1000	Italia	
Granito rosado	N.E.	61	79	1200	Italia	
Granito blanco	N.E.	37	42	830	Italia	
Verte Brazil	5	N.E.	121	1200	Brasil	Tzortzis et al., 2003.
Red Africa	57	N.E.	113	1360	África	
Café Brown	588	N.E.	906	1606	Brasil	
Rosso Balmoral	162	N.E.	490	1540	Holanda	
Santa Cecilia	45	N.E.	85	1435	Brasil	
Blue Paradise	15	N.E.	85	1246	Brasil	
Tropical Japorana	13	N.E.	17	1048	Brasil	
Verte Eukaliptos	45	N.E.	26	1522	Brasil	
Baltic Brown	102	N.E.	136	1520	Brasil	
Giallo Penere	31	N.E.	82	1230	Brasil	
Saint Tropez	8	N.E.	40	1021	Brasil	
Kiwa	58	N.E.	101	1168	Brasil	
Capao Bonito	84	N.E.	190	1313	Brasil	
Juparana	35	N.E.	265	1446	Brasil	

Jacaranda	68	N.E.	147	1031	Brasil	
Colibri	53	N.E.	155	1365	Brasil	
Astudo	18	N.E.	32	254	Brasil	
Granito 1	N.E.	19.1	24.3	642	China	Lu y Zhang, 2008.
Granito 2	N.E.	21.2	26.3	731.1	China	
Granito 3	N.E.	21.3	20.2	700.1	China	

Fuente: (Righi y Bruzzi, 2006, p. 164); (Tzortzis et al., 2003, p. 226); (Lu y Zhang, 2008, p.79).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Descripción: *Radionucleido no examinado en el estudio (N.E.). En la Tabla (7-1) se puede constatar la presencia de las cadenas radiactivas de U-238 y Th-232, además de la presencia de K-40 en granitos provenientes de diferentes partes del mundo.

La concentración de actividad promedio de estas investigaciones para el Ra-226, Th-232 y K-40 son de 61.06, 147.53 y 1144.93 Bq Kg⁻¹ respectivamente, valores típicos para rocas ígneas.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Población de estudio

A fin de desarrollar el trabajo de investigación se tomó en cuenta como población de estudio todos los tipos de granitos que se comercializan en la ciudad de Riobamba. La utilización de estos materiales ha tenido un auge de hace aproximadamente 12 años, por ello el mercado local no se ha extendido mucho.

2.2. Método de muestreo

Las muestras fueron obtenidas de distribuidores locales de granito, quienes proporcionaron información a través de una entrevista sobre los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba. Un dato importante es el hecho de que no se comercializa granito nacional y que los más utilizados son cinco tipos provenientes de China, Brasil y la India. Los resultados de la entrevista también muestran que los granitos chinos suelen ser menos duraderos, pero son los más cotizados en el mercado local debido a su costo accesible en comparación a los de origen brasileño o hindú independientemente del color del material.

Las muestras fueron codificadas con la sigla inicial G haciendo referencia a granito, para los siguientes caracteres se usó la primera letra del nombre comercial y su país de origen, como se muestra en la Tabla (1-2):

Tabla 1-2: Codificación de las muestras de granito analizadas.

Nombre comercial	País de origen	Código
Verde Ubatuba	Brasil	GVUB
Rojo	India	GRI
Negro Galaxy	India	GNGI
Violet	China	GVC
Gris beige	China	GGBC

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

2.3. Preparación de las muestras

Las muestras de granito fueron adquiridas en planchas, tal cual son comercializadas e instaladas en las casas y edificios. Las muestras escogidas poseen tonos oscuros (Negro Galaxy y Verde Ubatuba), grisáceo (Violet), rojizo (Rojo) y beige (Gris Beige), como se muestra en la Figura (1-2). La técnica de Espectrometría Gamma requiere un proceso de preparación de las muestras, mismo que se detalla a continuación:

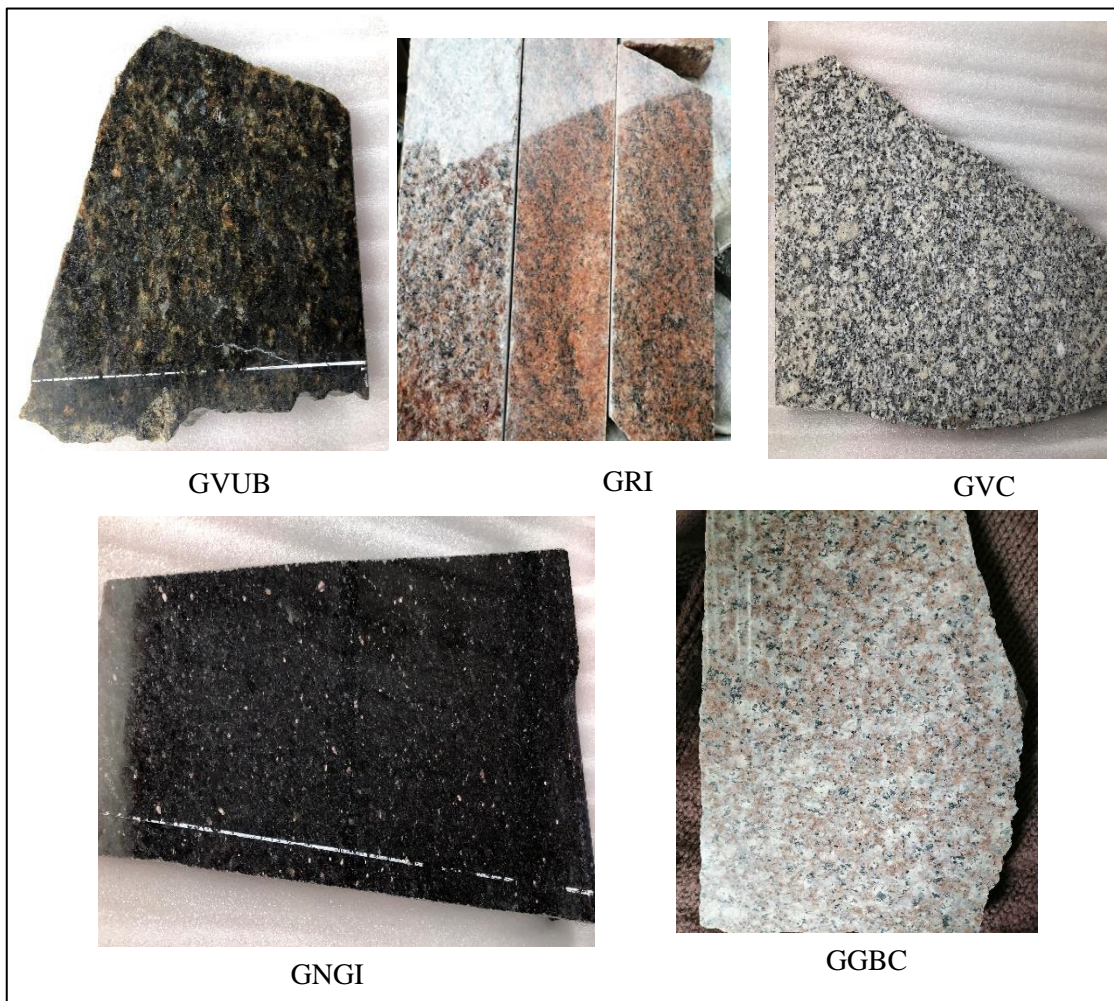


Figura 1-2: Muestras de cinco clases de granito más usados en la ciudad de Riobamba.

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Fase 1: Trituración y pulverización

Las muestras se colocaron en un recipiente rectangular de hierro y se trituraron usando un combo metálico. La Figura (2-2) ilustra el procedimiento, posteriormente se procedió a empaquetar, pesar y codificar las muestras. Cada paquete con un mínimo de 2.5 Kg.



Figura 2-2: Proceso de trituración y pulverización de las muestras de granito.

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

En el proceso de trituración se pudo observar claramente la diferencia del tamaño de los cristales en cada granito, por ejemplo, en las muestras GVUB, GNGI y GRI se podía apreciar los minerales de composición con cierto brillo y de proporción notable, mientras que en los granitos de procedencia china estos elementos eran menos evidentes.

Fase 2: Proceso de secado

Las muestras se colocaron en recipientes de aluminio para ser secadas en hornos disponibles en el laboratorio de Biotecnología Industrial de la Facultad de Ciencias, a una temperatura de 105°C durante 4 horas, de esta manera se evapora la humedad presente en la muestra.

Fase 3: Tamizado y empaquetado

Las muestras de granito se tamizaron a una granulometría de 1mm. Una parte de cada muestra (1.5 Kg) fueron empaquetadas en bolsas plásticas, selladas herméticamente, codificadas y enviadas a la SCAN para ser analizadas, usando el *Espectrómetro Gamma GCD-40180X*. Aproximadamente el 1 Kg restante de cada muestra siguió el mismo proceso de empaquetamiento

y sellado para posterior análisis en el Laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH, usando el *Espectrómetro Gamma Rug 91-2*. Cabe señalar que todas las muestras reposaron durante 4 semanas en una superficie plana para alcanzar el equilibrio secular.

2.4. Instrumentación utilizada para evaluar los índices alfa y gamma

2.4.1. Espectrómetro Gamma GCD-40180X

El Espectrómetro Gamma modelo GCD-40180X con el que cuenta el Laboratorio de Vigilancia Ambiental Radiactiva de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares del Ecuador, según el fabricante puede ser utilizado para monitorear elementos medioambientales en el campo de energía nuclear, productos de la industria, agricultura, medicina, entre otros (Baltic Scientific Instruments, 2015, p.3). Los componentes principales del sistema de espectrometría son los siguientes:

- Unidad de detección de rayos gamma basado en un *detector coaxial tipo-p de germanio hiperpuro (HPGe)*.
- Criostato vertical con nitrógeno líquido para enfriar el semiconductor.
- Recipiente Dewar 30l.
- Monitor del nivel de nitrógeno líquido con sensor.
- Equipo de espectrometría digital MCA-527.
- Software SpectralLineGP.
- Software Nuclide Master Plus.
- Escudo de plomo con mesa de apoyo.
- Cables y conectores.

Las características técnicas del espectrómetro se muestran en la Tabla (2-2).

Tabla 2-2: Características técnicas del espectrómetro GCD-40180X.

No	Parámetro	Valor
1	Rango de energías gamma detectables, en KeV	5-10 000
2	Resolución de energía, para valores de energía del radionucleido, en KeV	
	Menor a 122KeV	<0.875
	Menor a 1332KeV	<1.8
3	Especificaciones de la unidad de detección	
	Área sensible:	
	Diámetro, en mm	61.4

	Profundidad, en mm	61.4
	Espesor de contactos frontales en μm	~ 0.3
4	Voltaje óptimo de operación del SCD (HV)	1 000 – 4 000
5	Tiempo de enfriamiento en horas no más de:	8
6	Periodo de recarga de nitrógeno líquido en días	15
7	Dimensión MCA-527 en mm	164x11x145

Fuente: (Baltic Scientific Instruments, 2015, p. 3).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

El software spectralLineGP posee una variedad de funciones para resolver tareas propias del procesamiento de datos optimizando la calidad del espectro obtenido. Entre sus principales funciones esta la localización de información en secciones del espectro, identificación y cálculo de picos, identificación de radionucleidos en determinada ventana, cálculo de actividad, calibración de eficiencia y energía mediante gráficos, entre otras. Además destaca la facilidad que ofrece para desplegarse entre canales (LSMR, 2011, pp. 1-15).

2.4.2. Radiómetro ADANI Rug 91-2

El sistema de espectrometría del laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH es un radiómetro marca ADANI modelo Rug 91-2, fabricado para medir la actividad específica de emisión gamma de los radionucleidos de Cs-134, Cs-137 y K-40 en muestras de productos vegetales, animales y suelos contaminados con estos radioisótopos. El material de detección que usa es un *centellador de yoduro de sodio activado con talio*, acoplado a un tubo fotomultiplicador y un microcontrolador como principales elementos del equipo. El rango de medidas detectables para el K-40 en una muestra con una densidad de 1g cm^{-3} es de 50 a 20 000 Bq kg^{-1} con un error límite máximo permisible de $\pm 20\%$. Las energías que puede registrar tienen un rango establecido de 50 a 3 000 KeV y son acumuladas y medidas en 1 024 canales, cuyo análisis se realiza desde el canal 17. El tiempo de ajuste del modo de operación es de 5 minutos y el de funcionamiento continuo es de hasta 24 horas. Su peso fuera del contenedor es de aproximadamente 52kg y de 62Kg dentro de él (ADANI, 2013, pp.7-8).



Figura 3-2: Espectrómetro Rug 91-2.

1.Carcasa 2. Estructura de transporte 3. Cubierta giratoria
4. Panel frontal 5. Módulos electrónicos.

Fuente: (ADANI, 2013, p. 7).

El espectrómetro tiene dimensiones de 255 mm de largo, 360 y 300 mm de ancho y alto respectivamente y contiene varios elementos. Ver Figura (3-2):

-Carcasa protectora recubierta de plomo, dentro de ella se encuentra el espacio para insertar el marinelli con la muestra a analizar y en el centro del orificio el detector cilíndrico de centelleo de NaI (TI) de 40 mm tanto de diámetro como de alto;

-Estructura de transporte, sirve para trasladar el equipo;

-Cubierta giratoria, está revestida de plomo y es el elemento que rota para abrir la cubierta protectora e insertar el marinelli;

-Panel frontal, consiste en una pantalla y un teclado usado para operar el equipo y mostrar los resultados de los análisis; y

-Módulos electrónicos, que es la unidad de procesamiento de datos utilizada para recibir, almacenar y enviarlos al software.

Además, el sistema consta de cinco unidades principales como se indica en la Figura (4-2), mientras se analiza la información de un pulso eléctrico, el sistema de procesamiento no detecta otro fotoelectrón.

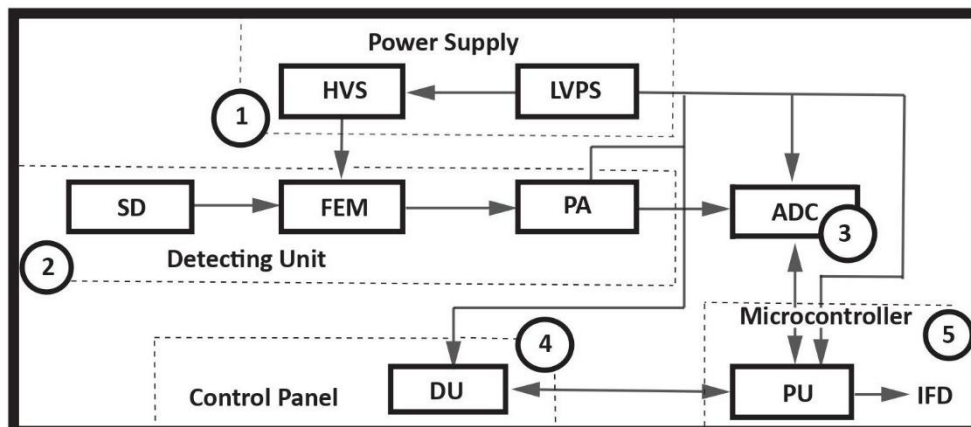


Figura 4-2: Espectrómetro Rug 91-2. Esquema general del espectrómetro Rug 91-2.

Realizado por: (ADANI, 2013, p. 14).

Las funciones específicas de las unidades del radiómetro son las siguientes:

-Unidad de fuente de alimentación: consta a su vez de una fuente de alimentación de baja tensión (LVPS) usada para rectificar filtrar y regular el voltaje necesario para la operación de los componentes del radiómetro y de una fuente de alto voltaje (HVS) usado para aplicar energía al tubo fotomultiplicador (FEM).

-Unidad de detección: Es el lugar donde se localiza el detector de centelleo (CD), que convierte los cuantos de rayos gamma en fotones de luz visible para ser llevados a la FEM como impulsos de corriente. Existe además un amplificador preliminar (PA) que convierte los impulsos de corriente generados por el fotomultiplicador en impulsos de voltaje.

-Convertor analógico digital (ADC): convierte los impulsos de voltaje en un código digital.

-Panel de control: consiste en un monitor y teclas usado para los ajustes del modo de operación del radiómetro.

-Microcontrolador: consta de una unidad de procesamiento (PU) usada para recibir, almacenar y enviar datos. Además de la interfaz del dispositivo (IFD) para intercambiar datos con equipos externos.

El funcionamiento del radiómetro cubre el registro y análisis de la distribución de amplitud de los pulsos de fotones generados en el detector, para mejorar el registro se coloca *la probeta marinelli de 0.5 litros* instalada en las paredes de plomo. Los destellos de luz producidos en el centellador entran al fotocátodo del fotomultiplicador y se transforman en pulsos eléctricos que se amplifican para luego entrar en el convertidor analógico-digital y distribuir los pulsos en los *1 024 canales*, la unidad de procesamiento analiza la distribución de amplitudes y calcula la actividad del radionucleido, en el panel de control se van mostrando los resultados en tiempo real de las mediciones. El monitor presenta la tasa de conteo de rayos gamma, *la temperatura del*

fotomultiplicador, el tiempo actual del temporizador y la *actividad específica* en Bq Kg⁻¹ con su error asociado.

Para operar el radiómetro se debe asegurar que el lugar donde sea instalado tenga una temperatura mayor a 10° C, caso contrario el cuarto debe ser calentado. Además, el equipo solo puede asegurar la precisión de medición indicada si el marinelli de 0.5 litros está lleno, si la muestra a medir es homogénea (el equipo requiere una inexactitud de homogeneidad y de medición de masa menor al 2%) y si la calibración fue realizada con una muestra de KCl con actividad de al menos 16 KBq. La medida de *Background* solo es necesaria si existen cambios significativos en las condiciones de medición de la actividad específica de las muestras o de la temperatura del radiómetro, se recomienda usar una muestra no radiactiva (agua destilada) y un tiempo de medición de al menos 1 200 segundos. Uno de los objetivos de medir el Background es probar la estabilidad del sistema de detección y de la electrónica asociada, es decir que esta radiación de fondo sirve como un indicador de evaluación del desempeño del equipo (L'Annunziata, 2003,p.897). El procedimiento de medición de muestras puede efectuarse desde el Software Rug 91-2 en el ordenador, en la Tabla (3-2) se muestran algunos requerimientos técnicos necesarios para el funcionamiento del software del instrumento.

Tabla 3-2: Requerimientos técnicos del software para el ordenador.

Procesador	Al menos Pentium 4.1GHz
Disco duro	Al menos 4GB
RAM	Al menos de 512MB
Monitor	Al menos 1024 x 600
Tarjeta gráfica	Al menos 32MB
Sistema operativo	Windows XP (32 bit) o Windows 7 (64bit)
Browser	Internet explorer 7.0 o más
USB	Puerto USB 2.0

Fuente: (ADANI, 2013, p. 19).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Toda esta información puede ser encontrada en los manuales de usuario que proporciona el fabricante del equipo.

En la interfaz del programa se puede encontrar un menú principal desde el cual los parámetros de medición pueden ser ingresados, en la siguiente sección se mostrará a detalle el procedimiento de medición de la actividad específica de los radionucleidos. En la Figura (5-2) se observa la interfaz gráfica del programa Rug 91-2.

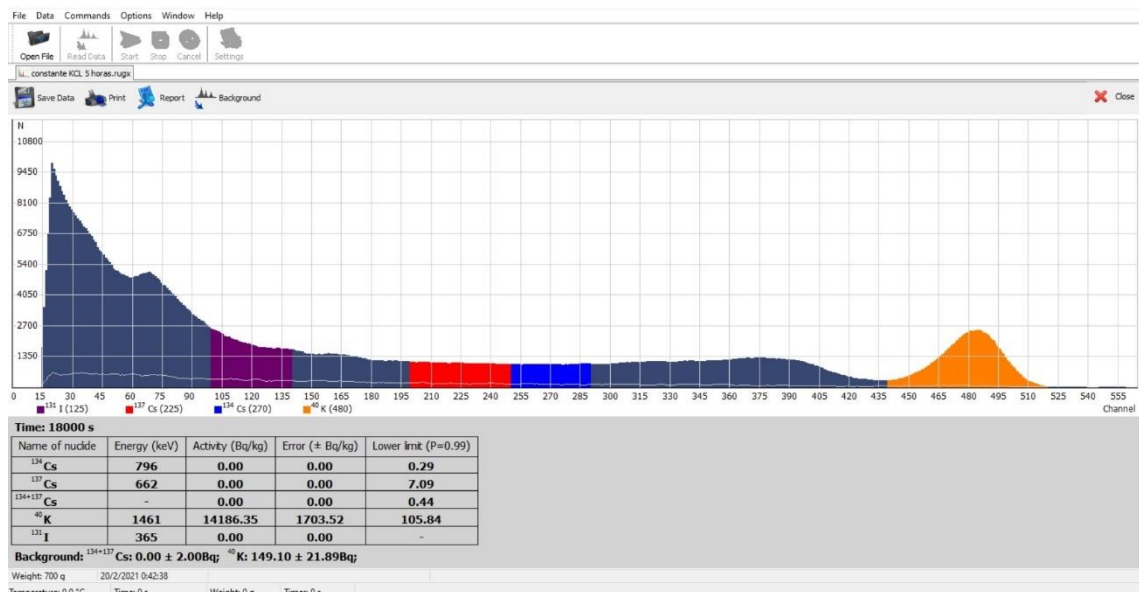


Figura 5-2: Interfaz gráfica del Rug 91-2.

Fuente: (ADANI, 2013)

Los resultados de la medición de la concentración de actividad pueden ser guardados en tres extensiones principalmente:

-*.rugx* , permite visualizar la interfaz del software donde se tiene información específica de la muestra analizada como el espectro gamma, tabla de concentración de actividad de los radionucleidos detectados, masa, tiempo de adquisición de datos, entre otros. Ver figura (5-2)

-*.txt* , muestra un reporte detallado del análisis, en él se puede observar datos particulares del background como las la tasa de conteo de cada radioisótopo, además de una tabla de resultados similar a la observada en la extensión anterior.(ANEXO B)

-*.dat*, otorga una visualización en un archivo en formato de cálculo donde se encuentra el resultado del estudio dado en función de los canales y sus correspondientes pulsos en la primera y segunda columna respectivamente. (Ver ANEXO A);

Estos datos permiten realizar el cálculo de la actividad específica de manera manual con el algoritmo del radiómetro.

2.4.2.1. Algoritmo del sistema Rug 91-2

La distribución de energías se descompone en ventanas específicas para cada radionucleido, donde los picos de energía del Cs-134 son de 605 y 796 KeV, el pico del Cs-137 es de 662 KeV y el pico de K-40 es 1461 KeV, los canales dispuestos en el equipo de detección para el Cs-137 son del (200 al 240), para el Cs-134 es del (240 al 290), y para el K-40 es del (420 a 520). De esta manera podemos encontrar la tasa de conteo de la siguiente forma:

$$n_X = \sum_i^p \frac{N_i}{T} \left[\frac{\text{Pulsos}}{\text{segundos}} \right] \quad (2.1)$$

Donde X representa un radioisótopo particular, n_X es la tasa de conteo del radionucleido en análisis, N_i es el valor en el i -ésimo canal, y T el tiempo de adquisición de datos para medir la actividad de la muestra. En el presente trabajo, se requiere de la utilización de la tasa de conteo del K-40, es decir:

$$n_{K^{40}} = \sum_{i=420}^{520} \frac{N_i}{T} \left[\frac{\text{Pulsos}}{\text{segundos}} \right] \quad (2.2)$$

La actividad específica de K-40, Cs-137 y Cs-134 se determina de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$A(K^{40}) = \frac{(n_{K^{40}} - nBg_{K^{40}}) \cdot T \cdot K(K^{40})}{Q} \quad (2.3)$$

$$A(Cs^{137}) = \frac{[(n_{Cs^{137}} - nBg_{Cs^{137}}) - 1.1(n_{Cs^{134}} - nBg_{Cs^{134}})] \cdot T \cdot K(Cs^{137})}{Q} \quad (2.4)$$

$$A(Cs^{134}) = \frac{[(n_{Cs^{134}} - nBg_{Cs^{134}}) - 0.16(n_{K^{40}} - nBg_{K^{40}})] \cdot T \cdot K(Cs^{134})}{Q} \quad (2.5)$$

donde Q es la masa de la muestra en kg, $nBg_{K^{40}}$, $nBg_{Cs^{134}}$, $nBg_{Cs^{137}}$ son la tasa de cuentas de Background de cada radionucleido indicado y $K(K^{40})$, $K(Cs^{137})$ y $K(Cs^{134})$, son los coeficientes de sensibilidad en (Bq impulsos⁻¹) correspondientes a cada radioisótopo, estos coeficientes son determinados experimentalmente con muestras certificadas metrológicamente. Se debe mencionar que el fabricante no revela los valores de los coeficientes y recomienda usar el KCl para obtener una buena aproximación a la sensibilidad interna del instrumento.

Varios experimentos independientes se realizaron para evaluar el coeficiente de sensibilidad para el K-40, usando la muestra de cloruro de potasio (KCl), los resultados obtenidos se presentan en la Sección (3-1).

El cálculo del error de la actividad específica se lleva a cabo de acuerdo con el algoritmo estándar. La estimación del error estadístico relativo esta dado por la expresión:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{n_{muestra}}{t_{muestra}} + \frac{n_{Bg}}{t_{Bg}}}}{n_{muestra} - n_{Bg}} \quad (2.6)$$

donde $n_{muestra}$ y n_{Bg} , son la tasa de conteo de la muestra y del background en los correspondientes rangos de energías (ventana), y $t_{muestra}$, t_{Bg} , son los tiempos de medida de la muestra y background respectivamente.

Las fórmulas para determinar el error estadístico relativo del $\sigma_{K^{40}}$ y del $\sigma_{Cs^{134}+Cs^{137}}$ son las siguientes:

$$\sigma_{K^{40}} = \frac{\sqrt{\frac{n_{K^{40}}}{t_{muestra}} + \frac{n_{BgK^{40}}}{t_{Bg}}}}{n_{K^{40}} - n_{BgK^{40}}} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{Cs^{134}+Cs^{137}} = \frac{\sqrt{\frac{n_{Cs^{134}} + n_{Cs^{137}}}{t_{muestra}} + \frac{n_{BgCs^{134}} + n_{BgCs^{137}}}{t_{Bg}}}}{(n_{Cs^{134}} + n_{Cs^{137}}) - (n_{BgCs^{134}} + n_{BgCs^{137}})} \quad (2.8)$$

Por último, el error absoluto para la actividad específica de los radionucleidos viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$\Delta A(K^{40}) = A(K^{40})\sqrt{\sigma_{K^{40}}^2 + 0.0144} \quad (2.9)$$

$$\Delta A_{Cs} = A_{Cs} \sqrt{\sigma_{Cs}^2 + \left(0.01 \frac{A(K^{40})}{A_{Cs}} + 0.0144\right)} \quad (2.10)$$

donde $A(K^{40})$ y $A_{Cs} = A(Cs^{134}) + A(Cs^{137})$, son las actividades específicas de los radioisótopos en $Bq\ kg^{-1}$.

El algoritmo que se muestra en esta sección no consta en el manual de usuario del equipo, esta información fue proporcionada por la empresa *Adani Systems* a través del gerente de proyectos Alen Kazlouski, quien muy amablemente nos ayudó a resolver las dudas sobre el instrumento.

2.5. Procedimiento de medición de actividad específica de las muestras

El procedimiento para evaluar las actividades específicas de los radionucleidos presentes en las muestras tiene tres etapas: a) Calibración, b) Background y c) Análisis de muestra. Previamente se debe realizar la instalación del software proporcionado por el fabricante, poniendo en modo de prueba el sistema operativo Windows y ejecutando sus drivers. El espectrómetro se conecta al computador vía USB.

a) Calibración

1. Abrir la cubierta giratoria.
2. Colocar la muestra de KCl proporcionada por el fabricante dentro del espectrómetro.
3. Cerrar la cubierta giratoria.
4. Presionar *MENU*, ubicado en el teclado del panel frontal.
5. Elegir la opción *CALIBRATION* y esperar que en la pantalla del panel frontal se genere el mensaje de *CALIBRATION COMPLETE*.

6. Una vez terminado este procedimiento sacar la muestra de calibración del espectrómetro. Este procedimiento es automático y puede durar entre 120 a 600 segundos.

b) Background

1. Verter agua destilada en el marinelli y llenarlo.
2. Asegurarse se tapar correctamente el marinelli.
3. Insertar el marinelli dentro del espectrómetro y cerrar la cubierta giratoria.
4. Ir a *MENU* desde el panel frontal.
5. Elegir la opción *TIME* y programar el tiempo de medición en segundos de Background.
6. Seleccionar *WEIGHT* y escribir la masa en gramos de agua destilada del marinelli.
7. Elegir la opción *BACKGROUND*.
8. Extraer el marinelli con agua destilada una vez finalizado el procedimiento.

c) Análisis de muestra

1. Llenar el marinelli con una masa conocida Q de la muestra a analizar y cerrarlo bien.
2. Colocar el marinelli dentro del espectrómetro y cerrar la cubierta giratoria.
3. Desde el software ir a *SETTINGS* y rellenar los parámetros *Weight* y *Time*.
4. Dar clic *Write parameters*, elegir si el espectro de respuesta se desea observar en términos de canales o energía y salir de la ventana emergente.
5. Seleccionar la opción *START* para iniciar el procedimiento de análisis.
6. Una vez terminado el análisis los datos generados por el instrumento se guardan en los formatos descritos en la Sección (2.4.2).

En el presente trabajo se realizó un background con un tiempo de adquisición de datos de 1800 segundos, con una masa de agua destilada de (412 ± 1) g dando como resultado un rango de tasa de conteo de background para el K-40 de 0.26 a 0.34 impulsos segundos⁻¹. Para las muestras de granito se ocupó un tiempo de adquisición de datos de 18 000 segundos y la masa de las distintas muestras se ilustran en la Tabla (4-2).

Tabla 4-2: Masa de las muestras de granito analizadas.

	GVUB	GRI	GNGI	GVC	GGBC
<i>Masa (g)</i> <i>(Q ± ΔQ)</i>	729 ± 1	722 ± 1	791 ± 1	709 ± 1	736 ± 1

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos en la investigación sobre la radiactividad natural de cinco clases de granito comúnmente utilizados en viviendas y edificios de la ciudad de Riobamba; en primer lugar, se muestra los resultados del coeficiente de sensibilidad del espectrómetro Rug 91-2 para el cálculo de la actividad específica del K-40, mediante un método manual, usando diferentes tiempos de adquisición de datos. Se realizó una comparación de las concentraciones de actividad del K-40 en los granitos, calculadas mediante el *Método Manual* y usando el *Software Rug 91-2*. Además, se llevó a cabo la comparación de los resultados de la actividad específica del K-40 de muestras de granito, usando un detector de yoduro de sodio dopado con talio NaI (Tl) y un detector de germanio hiperpuro (HPGe). Finalmente, se calculó los índices de riesgo alfa y gamma asociados a los granitos usando los resultados reportados por la SCAN, obtenidos con el espectrómetro GCD-40180X.

3.1. Cálculo del coeficiente de sensibilidad para el K-40 del radiómetro Rug 91-2

Para determinar el coeficiente de sensibilidad para el K-40 se llevaron a cabo varios experimentos independientes, usando la muestra de cloruro de potasio (proporcionado por el fabricante) y diferentes tiempos de adquisición de datos para medir la actividad específica del K-40. Mediante la Ecuación (2.3) se obtuvo los resultados que se presentan en la Tabla (1-3).

Tabla 1-3: Coeficiente de sensibilidad del K-40 para diferentes tiempos de adquisición de datos.

Tiempo de adquisición de datos (horas)	Constante de sensibilidad K(K-40) (Bq impulsos ⁻¹)
0.5	0.98 ± 0.12
1	0.49 ± 0.10
1.5	0.33 ± 0.04
2	0.25 ± 0.03
2.5	0.19 ± 0.02
3	0.16 ± 0.02
3.5	0.14 ± 0.02
4	0.13 ± 0.02
4.5	0.10 ± 0.01
5	0.098 ± 0.01

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

El Gráfico (1-3) muestra los datos detallados en la Tabla (1-3) y evidencia que el coeficiente de sensibilidad para el K-40 no es constante, sino decrece a medida que el tiempo de adquisición de datos aumenta. Para tiempos de adquisición mayores a 3 horas se puede decir que el coeficiente se estabiliza.

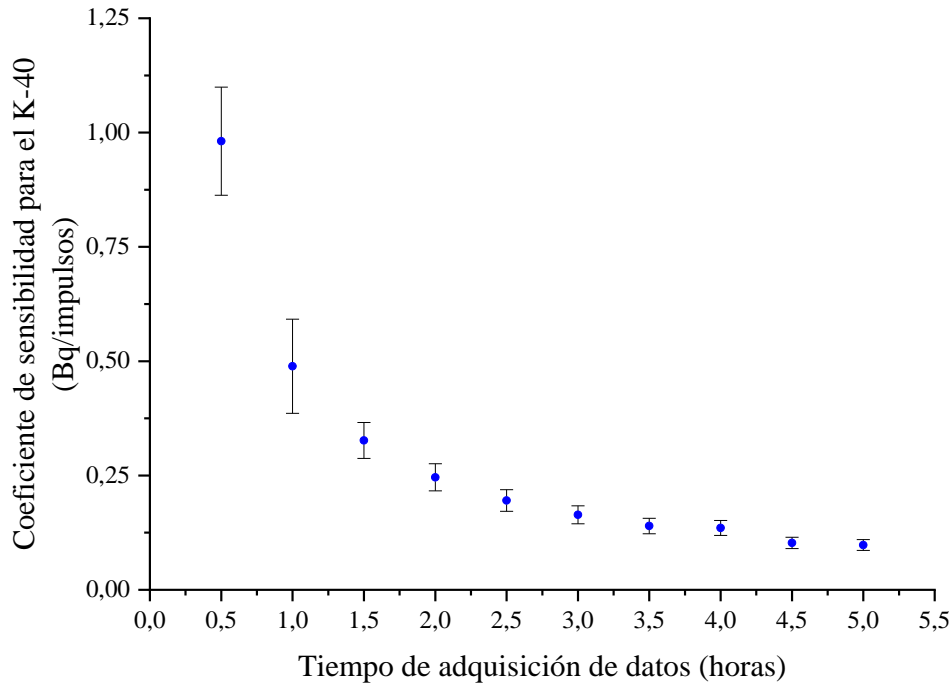


Gráfico 1-3: Coeficiente de sensibilidad del K-40 en función del tiempo de adquisición de datos.

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Para el tiempo de adquisición de datos de 1 hora *se realizó diez medidas repetidas*, con el fin de observar la variabilidad del coeficiente de sensibilidad del K-40. El valor medio fue de 0.49 Bq impulsos⁻¹ con una desviación estándar de 0.02, es decir una dispersión del 4% respecto a la media.

3.2. Medidas de radiactividad natural de las muestras de granito con el espectrómetro

Rug 91-2

Del análisis de los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba, con el espectrómetro Rug 91-2, se encontraron valores de actividad específica para el K-40 desde 253.02 Bq Kg⁻¹ (Granito Negro Galaxy) hasta un máximo de 1560.22 Bq Kg⁻¹ (Granito Gris Beige). En la Tabla (2-3) se observa los resultados de la concentración de actividad con su error absoluto, proporcionadas de forma automática por el software del equipo.

Tabla 2-3: Concentración de actividad del K-40 para las muestras de granito estudiadas, usando el radiómetro Rug 91-2.

Nombre comercial	País de origen	Código	Actividad específica del K-40 (Bq Kg⁻¹)	Error absoluto del K-40 (Bq Kg⁻¹)
Gris Beige	China	GGBC	1560.22	192.04
Negro Galaxy	India	GNGI	253.02	47.92
Rojo	India	GRI	1370.32	170.56
Violet	China	GVC	1448.7	180.23
Verde Ubatuba	Brasil	GVUB	1504.26	185.42

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Con el propósito de entender el funcionamiento del espectrómetro y como el Software Rug 91-2 realiza la cuantificación de la concentración de actividad del K-40 con su error asociado de forma automática, se realizó el cálculo manual usando las Ecuaciones (2.2) (2.3) y (2.9) de la Sección (2.4.2.1). Las tasas de conteo del radionucleido y background fueron obtenidas del reporte que permite descargar el espectrómetro, la masa de las muestras de granito están detalladas en la Tabla (4-2) y el coeficiente de sensibilidad $K(K^{40})$ para el tiempo de adquisición de datos de 18 000 segundos fue de 0.098 Bq impulso⁻¹ (Ver Tabla 1-3).

Tabla 3-3: Valores de la concentración de actividad para el K-40, calculados manualmente.

Nombre comercial	País de origen	Código	Tasa de conteo (imp s⁻¹)	Tasa de conteo de background (imp s⁻¹)	Actividad específica (Bq Kg⁻¹)	Error asociado a la actividad específica (Bq Kg⁻¹)
Gris beige	China	GGBC	1.00	0.27	1753.30	213.18
Negro Galaxy	India	GNGI	0.43	0.26	375.27	53.52
Rojo	India	GRI	0.94	0.30	1574.88	192.41
Violet	China	GVC	1.03	0.34	1649.11	201.46
Verde Ubatuba	Brasil	GVUB	0.94	0.26	1649.01	200.77

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

La Tabla (3-3) muestra las concentraciones de actividad para el K-40, calculadas manualmente y el Gráfico (2-3) presenta la comparación de los resultados obtenidos con el Software Rug 91-2 y el *Método Manual*, es evidente que para la mayoría de las muestras los resultados obtenidos con los dos métodos son compatibles dentro de los errores experimentales, excepto para la muestra GNGI donde se puede apreciar que el valor obtenido por el Software Rug 91-2 es menor que el calculado con el Método Manual, esto implica que el coeficiente de sensibilidad $K(K^{40})$ utilizado en el cálculo manual es cercano al valor usado por el fabricante y evidentemente por el software del espectrómetro.

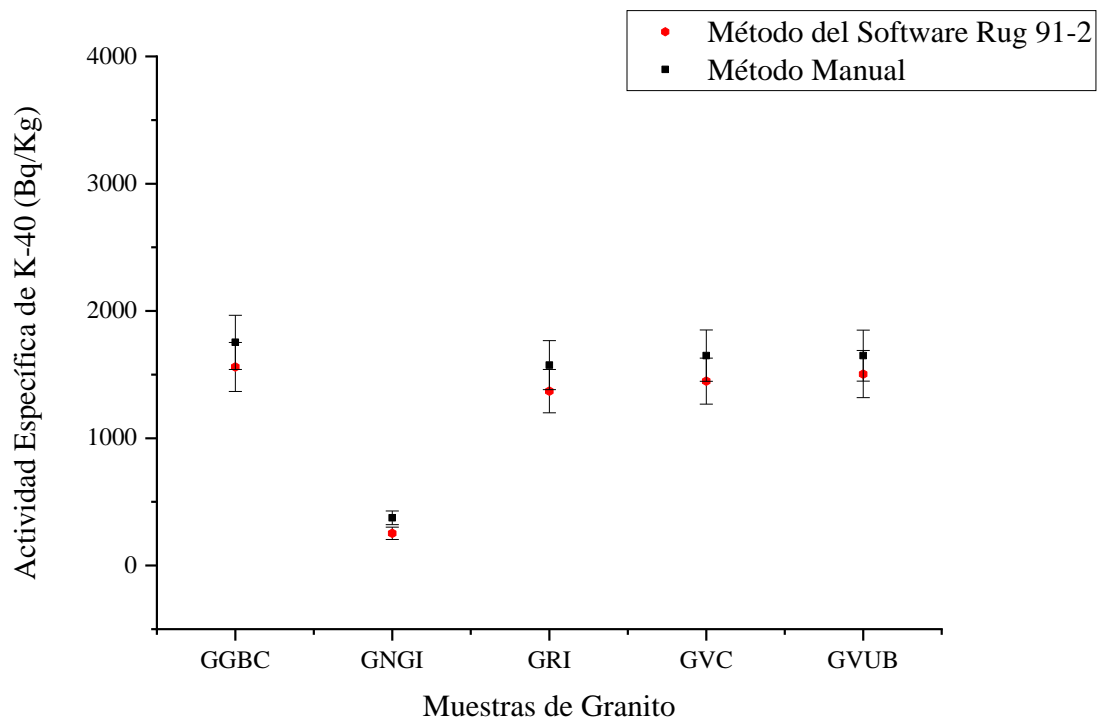


Gráfico 2-3: Comparación de la concentración de actividad del K-40, calculada usando el Software Rug 91-2 y el Método Manual.

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

3.3. Medidas de radiactividad natural de las muestras de granito mediante el espectrómetro GCD-40180X

El reporte realizado por la SCAN sobre la concentración de actividad de los radioisótopos Ra-226, Th-232 y K-40 de las diferentes muestras de granito se muestran en la Tabla (4-3), se pudo evidenciar la presencia de K-40 en todas las muestras, con un rango de valores de 130 a 1070 Bq Kg⁻¹. En el análisis de actividad específica de Ra-226, solo una muestra se encontró bajo el valor mínimo detectable por el espectrómetro, mientras que el valor más alto encontrado es de 160 Bq Kg⁻¹. El Th-232 fue encontrado con abundancia singular en la muestra GVC, con una

concentración específica de 1200 Bq Kg^{-1} , este granito presenta una mezcla de colores donde predomina el gris.

A diferencia de otros trabajos donde se encontraron altas concentraciones de actividad de Ra-226 y Th-232 en granitos rojos, (Righi y Bruzzi, 2006) por ejemplo, en la presente investigación no se observó correlación entre estos parámetros, por el contrario la muestra de color rojo GRI no reporta valores detectables de Th-232 y presenta uno de los valores más bajos de Ra-226 (véase la Tabla 4-3). En cuanto al origen, los valores más altos de concentración de actividad de Ra-226 corresponden a los granitos de procedencia china (GVC) e hindú (GNGI). Estos resultados evidencian que la radiactividad natural de los granitos, usados como material de construcción y decoración, depende de la geología del lugar donde son extraídos.

Tabla 4-3: Actividades específicas del Ra-226, Th-232 y K-40 de las muestras de granito, reportadas por la SCAN.

Nombre comercial	País de origen	Código	Actividad específica	Error asociado	Actividad específica	Error asociado	Actividad específica	Error asociado
			del Ra-226	del Ra-226	del Th-232	Del Th-232	del K-40	del K-40
			(Bq Kg ⁻¹)	(Bq Kg ⁻¹)	(Bq Kg ⁻¹)	(Bq Kg ⁻¹)	(Bq Kg ⁻¹)	(Bq Kg ⁻¹)
Verde Ubatuba	Brasil	GVUB	20	8	<V.D.	<V.D.	1290	90
Rojo	India	GRI	30	9	<V.D.	<V.D.	910	60
Negro Galaxy	India	GNGI	160	60	<V.D.	<V.D.	1070	70
Violet	China	GVC	90	10	1200	360	1260	90
Gris Beige	China	GGBC	<V.D.	<V.D.	<V.D.	<V.D.	130	10

* <V.D. menor al valor mínimo detectable.

Fuente: (SCAN, 2021).

Realizado por: Martínez, M.; Piedadmag, E. 2021.

En el Gráfico (3-3) se muestra una comparación entre las actividades específicas del K-40 de las muestras de granito, medidas con los Espectrómetros Gamma GCD-40180X y ADANI Rug 91-2, mismos que tienen incorporado un detector de germanio hiperpuro (HPGe) y un detector de yoduro de sodio dopado con talio NaI (TI) respectivamente. Los resultados son concordantes para los granitos GVUB y GVC, para los granitos GGBC y GRI se observa una concentración de actividad medida con el centellador mayor que aquella medida con el detector semiconductor, por ejemplo, para la muestra GRI con el semiconductor de HPGe se obtuvo un valor de $910 \pm 60 \text{ Bq Kg}^{-1}$, mientras que con el centellador un valor de $1370.32 \pm 170.56 \text{ Bq Kg}^{-1}$, que representa aproximadamente 1.5 veces lo obtenido con el detector semiconductor, en el caso de granito

GNGI se observa lo opuesto; es decir, la concentración de actividad medida con el centellador es menor que aquella medida con el detector semiconductor. Debido a la heterogeneidad de los resultados, nuevos estudios de los granitos GGBC, GRI GNGI con espectrometría gamma en la SCAN y la ESPOCH-SCA y técnica de cámara cerrada están planificados, en el marco del proyecto de investigación “Evaluación de elementos radiactivos de la serie del Uranio 238 en el ambiente en pacientes con cáncer” ejecutado por el Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC).

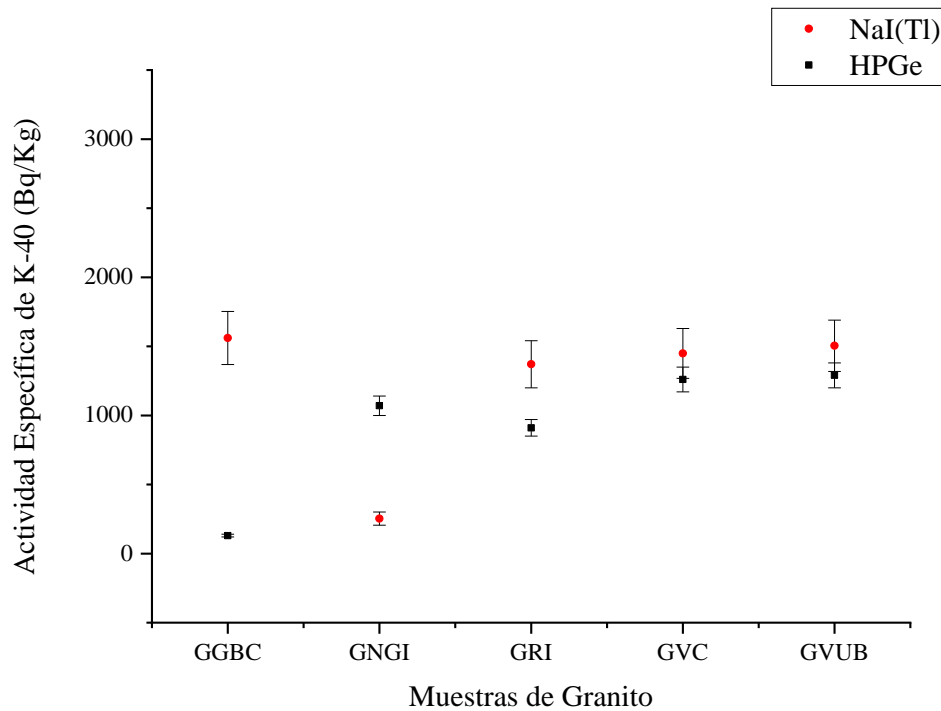


Gráfico 3-3: Comparación de los resultados de la actividad específica del K-40 de muestras de granito, usando un detector de yoduro de sodio dopado con talio NaI (TI) y un detector de germanio hiperpuro (HPGe).

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

3.4. Cálculo de índices alfa y gamma

Los índices de riesgo radiactivo por emisores alfa y gamma, asociados al granito comercializado en la ciudad de Riobamba, han sido calculados con los resultados reportados por la SCAN con el detector semiconductor de germanio (HPGe).

3.4.1. Índice gamma

El índice gamma para los granitos analizados se calculó con la Ecuación (1.8) con un criterio de dosis de 1 mSv a⁻¹(ver Tabla 5-1), con las actividades específicas de K-40, Th-232 y Ra-226 detalladas en la Tabla (4-3). Los resultados se pueden visualizar en la Tabla (5-3), el granito GVC muestra un índice gamma de 6.72, valor que excede exorbitantemente el nivel de referencia de la *Comunidad Europea de Energía Atómica*, Directiva EURATOM 2013/59 ($I_\gamma = 1$), es decir un índice menor a uno corresponde a una dosis efectiva anual menor o igual a 1mSv, este granito podría considerarse un material nocivo desde el punto de vista de la protección radiológica, el mayor contribuyente al índice gamma del granito GVC es la actividad específica del Th-232.

Tabla 5-3: Índices Gamma de los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba.

Nombre comercial	País de origen	Código	Índice gamma	Error asociado al índice gamma
Verde Ubatuba	Brasil	GVUB	0.50	0.04
Rojo	India	GRI	0.40	0.04
Negro Galaxy	India	GNGI	0.89	0.20
Violet	China	GVC	6.72	1.80
Gris Beige	China	GGBC	0.04	0.003

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

Las otras cuatro muestras de granito presentan índices gamma de 0.04 a 0.89, lo que implica que estos materiales al ser usados en casas y edificios no contribuirán a superar el nivel de referencia (1 mSv por año) (EURATOM 2013/59) de la exposición externa debida la radiación gamma en interiores emitida por los materiales de construcción.

3.4.2. Índice alfa

El índice alfa se ocupa de la evaluación de la exposición interna a la radiación alfa debida a la inhalación de radón procedente de materiales de construcción. Este índice fue calculado usando la Ecuación (1.7), considerando la concentración de actividad de Ra-226 de las muestras de granito de la Tabla (4.3).

Tabla 6-3: Índice alfa de los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba.

Nombre comercial	País de origen	Código	Índice alfa	Error asociado al índice alfa
Verde Ubatuba	Brasil	GVUB	0.10	0.03
Rojo	India	GRI	0.15	0.03
Negro Galaxy	India	GNGI	0.80	0.20
Violet	China	GVC	0.45	0.03
Gris Beige	China	GGBC	-	-

* - no presenta índice

Realizado por: Martínez, M.; Piedmag, E. 2021.

La Tabla (6.3) muestra que los índices alfa de los granitos analizados varían entre 0.10 y 0.80 (menores que la unidad); en consecuencia, como las concentraciones específicas de Ra-226 en todas las muestras no exceden el valor de 200 Bq Kg⁻¹, es poco probable que la exhalación de radón de estos granitos cause concentraciones de radón en interiores superiores a 200 Bq m⁻³, por lo tanto, no representan un riesgo para la salud de la población.

CONCLUSIONES

Los resultados del coeficiente de sensibilidad $K(K^{40})$ del espectrómetro Rug 91-2 para el cálculo de la actividad específica del K-40, mediante un Método Manual, mostraron que este parámetro decrece a medida que el tiempo de adquisición de datos aumenta, los valores llegan a ser compatibles a partir de 3 horas, por lo que se deduce que el tiempo de adquisición de datos recomendable debe ser mayor o igual a 3 horas.

La comparación de las concentraciones de actividad para el K-40 en los granitos, calculados con el Software Rug 91-2 y el Método Manual (coeficiente de sensibilidad obtenido con un tiempo de adquisición de datos de cinco horas) muestra que, para la mayoría de los granitos, los valores obtenidos con los dos métodos son compatibles dentro de los errores experimentales, excepto para la muestra de Granito Negro Galaxy donde se puede apreciar que el valor calculado manualmente es mayor que el proporcionado por el Software Rug 91-2, esto implica que el coeficiente de sensibilidad $K(K^{40})$ utilizado en el cálculo manual es cercano al valor usado por el software del espectrómetro.

La comparación de las actividades específicas del K-40 en las muestras de granito, medidas con los Espectrómetros Gamma GCD-40180X de la SCAN y ADANI Rug 91-2 de la ESPOCH, mismos que tienen incorporado un detector de germanio hiperpuro (HPGe) y un detector de yoduro de sodio dopado con talio NaI (TI) respectivamente, muestra que los resultados son concordantes para los granitos Verde Ubatuba y Violet, para los granitos Gris Beige y Rojo se observa una concentración de actividad medida con el centellador mayor que aquella medida con el detector semiconductor, en el caso de granito Negro Galaxy se observa lo opuesto; es decir, la concentración de actividad medida con el centellador es menor que aquella medida con el detector semiconductor, lo que lleva a concluir que los dos sistemas de detección tienen eficiencias diferentes y por tanto presentan resultados heterogéneos.

Los valores del índice gamma para los granitos estudiados, calculados con las actividades específicas de K-40, Th-232 y Ra-226, reportadas por la SCAN, evidencian que el granito Violet presenta un valor de 6.72, mientras que los otros cuatro granitos presentan valores de 0.04 a 0.8, de estos resultados se puede deducir que el granito Violet de procedencia china puede considerarse un material nocivo desde el punto de vista de la protección radiológica y usado en viviendas contribuirá a superar el nivel de referencia de la exposición externa debida la radiación gamma en interiores (1 mSv por año).

Los índices alfa de los granitos más comercializados en la ciudad de Riobamba variaron entre 0.10 y 0.80, en consecuencia, como las concentraciones específicas de radio-226 en todas las muestras no exceden el valor de 200 Bq kg^{-1} , se puede deducir que es poco probable que la exhalación de radón de estos granitos cause concentraciones de radón en interiores superiores a 200 Bqm^{-3} y no constituyen un riesgo para la población.

RECOMENDACIONES

Es importante que en el laboratorio de Técnica Nucleares de la ESPOCH se siga fortaleciendo el conocimiento del espectrómetro Rug 91-2 como herramienta sensible para la estimación de medidas de radiación natural, queda por conocer los coeficientes de sensibilidad del Cs-134 y Cs-137 que no se usaron en este trabajo, además de seguir mejorando el coeficiente de sensibilidad de K-40 usando muestras metrológicamente certificadas.

Al ser el primer trabajo para determinar los indicadores de riesgo radiactivo en granitos como material de construcción, es conveniente extender la información obtenida sobre radiación natural de este material usando técnicas de espectrometría gamma.

Se recomienda realizar otros trabajos que ratifiquen la información que se presenta usando diferentes técnicas de medición, por ejemplo, la determinación de la tasa de exhalación de radón en las rocas ígneas con altos niveles de Ra-226. Si se corrobora es prudente rastrear el lugar exacto de procedencia de estos materiales y alertar de su potencial nocivo.

GLOSARIO

Fotopico: es una formación tipo gaussiana que refleja la interacción fotoeléctrica de la radiación gamma en el espectro.

Ventana: conjunto de canales que contienen las energías más cercanas al radioisótopo que se busca, discriminando otras menores.

Poliestireno: material obtenido por un proceso de polimerización de un hidrocarburo conocido como estireno.

Plagioclasa: es un feldespato con abundante con sodio y calcio en su composición.

Feldespatoideos: feldespatos con un tercio menos de silicatos en su composición.

Analizador multicanal (MCA): Sistema electrónico utilizado en detectores de radiación para realizar el proceso de discriminación de energías características de los radioisótopos.

FWHM (Full width at half maximum): corresponde al ancho a media altura del fotopico de emisión, dado en canales o energía.

NORM (Naturally-Occurring Radioactive Materials): se conocen como los materiales radiactivos que se producen de forma natural y donde las actividades humanas aumentan la exposición de las personas a las radiaciones ionizantes.

AQFP: A- Cuarzo, Q-Feldespato alcalino, F-feldespatoideos, P-plagioclasa.

Radionucleidos

U-238, isótopo radiactivo del uranio con 238 nucleones.

Th-232, isótopo radiactivo del torio con 232 nucleones.

K-40, isótopo radiactivo del potasio con 40 nucleones.

U-235, isótopo radiactivo del uranio con 235 nucleones.

Rb-87, isótopo radiactivo del rubidio con 87 nucleones.

Sm-147, isótopo radiactivo del samario con 147 nucleones.

Lu-176, isótopo radiactivo del lutecio con 238 nucleones.

H-3, es un isótopo del hidrógeno con 3 nucleones, es conocido como tritio.

Be-7, isótopo radiactivo del berilio con 7 nucleones.

C-14, isótopo radiactivo del carbono con 14 nucleones.

Na-22, isótopo radiactivo del sodio con 22 nucleones.

Ar-37, isótopo radiactivo del argón con 37 nucleones.

Kr-81, isótopo radiactivo del kriptón con 81 nucleones.

Y-92, es un radioisótopo del itrio con 92 nucleones.

Unidades de medida

eV: energía cinética necesaria para que un electrón se traslade un potencial de 1 voltio, en el sistema internacional esta cantidad es $1.6 \times 10^{-19}\text{J}$.

Bq: es la unidad de medida de la radiactividad, se define como la cantidad de desintegraciones de un radionucleido por segundo.

Bq Kg⁻¹: conocido como actividad específica o concentración de actividad, son las desintegraciones por segundo en una unidad de masa.

Sv: unidad de medida de protección radiológica de dosis efectiva, ayuda a la estimación de los efectos estocásticos de la radiación ionizante en el cuerpo humano.

Gy: es la unidad de medida de la dosis absorbida, es decir corresponde a la energía ionizante que un cuerpo absorbe un tejido medido en el S.I. en J/Kg .

BIBLIOGRAFÍA

ADANI. *Operation Manual Rug.* 2013. pp. 91-92.

ALONSO, M. & FINN, E.J. *Volumen II: Fundamentos Cuánticos y Estadísticos.* Washington, D.C.: Addison-Wesley Publishing Company, 1986. pp. 340.

ANJOS, R.M.; VEIGA, R.; SOARES, T.; SANTOS, A.M.A.; AGUIAR, J.G.; FRASCÁ, M.H.B.O.; BRAGE, J.A.P.; UZÊDA, D.; MANGIA, L.; FACURE, A.; MOSQUERA, B.; CARVALHO, C. & GOMES, P.R.S. “Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites”. *Radiation Measurements*, n° 39 (2005), (Brazil) pp. 245-253. ISSN 13504487. DOI 10.1016/j.radmeas.2004.05.002.

ATSDR. “RESUMEN SALUD PÚBLICA- Torio” [en línea], 1990. Atlanta: pp. 1-5. [Consulta: 20 enero 2021]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs149.html.

BALTIC SCIENTIFIC INSTRUMENTS, B. Manual de Usuario del Espectrómetro Gamma GCD-40180X. 2015.

BIRKS, J.B. The Theory and Practice of Scintillation Counting. *Physics Today* [en línea], 1965. p. 69-70. [Consulta: 5 enero 2021]. ISSN 0031-9228. DOI 10.1063/1.3047620. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=bNIgBQAAQBAJ&pg=PA16&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false.

BRUGGE, D. & BUCHNER, V. “Radium in the environment: Exposure pathways and health effects”. *Reviews on Environmental Health*, n°27 (2012). pp. 10. ISSN 00487554. DOI 10.1515/reveh-2012-0001.

CHÁVEZ, E. CARACTERIZACIÓN DE RADIONUCLEIDOS PRESENTES EN DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO Y ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES DE RIESGO ASOCIADOS PARA LA POBLACIÓN [en línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado).: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Física y Matemática, Riobamba, Ecuador. 2016. pp. 13 [Consulta: 5 enero 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6185/1/86T00035.pdf>

CONNOR, N. *What is Gamma Spectroscopy - Definition*. [en línea]. 2019. [Consulta: 15 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-gamma-spectroscopy-definition/>.

CSN. “Detección y medida de la radiación”. *Curso de Supervisores de instalaciones radiactivas*, (2014), (España). pp.9.

DARBY, S.; et al. “Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies”. *British Medical Journal*, (2004). pp. 4-5. ISSN 09598146. DOI 10.1136/bmj.38308.477650.63.

DUNN, W.L. & MCGREGOR, D.S. *Gamma-Ray Detectors*. Manhattan-United States: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, pp. 422-440.

EHSS. “The DOE Ionizing Radiation Dose Ranges Chart”. *Information Brief*, (2018), (United States of America) pp.5-6.

EISBERG, R. *FUNDAMENTOS DE FÍSICA MODERNA*. Santa Barbara, California: Jon Wiley & Sons, 2000. ISB N 968-18-0418-X, p. 625.

EL-HUSSEIN, A. “A study on natural radiation exposure in different realistic living rooms”. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 79 (2005), (Egypt) pp. 355-367. ISSN 0265931X. DOI 10.1016/j.jenvrad.2004.08.009.

ESCUDERO BALLESTEROS, L.A. *Principios de Fluorescencia (Trabajo de titulación)*. (Pregrado) Universidad Complutense, Facultad de Farmacia, Madrid, España. 2018. pp. 3.

EURATOM. “Basic Safety Standards Directive”. *Official Journal of the European Union*, (2014) pp. 31-39.

EUROPEAN COMMISSION. “Radation Protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials”. [en línea], 1999, pp. 6-16. [Consulta: 10 de noviembre 2020] Disponible en: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/112.pdf>.

GRIEM, W. El diagrama Streckeisen o QAPF. [blog]. 2015. [Consulta: 21 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap04a.htm>.

GUARÍN, L. Calibración de espectrómetro gama en eficiencia absoluta con el programa Hypermet-PC (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Nacional de Cuyo. 2016. pp. 3-4.

HEATH, R.L. *Scintillation spectrometry gamma-ray spectrum catalogue*. 2ª ed.: 2002, pp. 9.

ICRP. *Publicación 103: Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Madrid-España: Senda Editorial S.A., 2007. ISBN: 978-84-691-5410-G, pp. 45-49.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUAREZ. “Hojas Técnicas: Los minerales”. [en línea], 2016. pp. 1-2. [Consulta: 15 de diciembre 2020] Disponible en: http://www.uacj.mx/ICB/UEB/Documents/Hojas_tecnicas/Minerales.pdf.

KNOLL, G.F. *Radiation Detection and Measurement*. 4ª ed. Michigan- United States of America: John Wiley & Son, Inc., 2017. ISBN 9780470131480, pp. 223-416.

LECOQ, P.; GEKTIN, A. & KORZHIK, M. *Scintillation and Inorganic Scintillators*.: 2017. pp. 2. ISBN 9783319455228.

LITHERLAND, M.; ASPDEN, J. & JEMIELITA, R. *The Metamorphic Belts of Ecuador*. Nottingham-England: NERC, 1994. ISBN 0852722397. pp. 16.

LSMR. Algorithmic base – functions of spectrum information processing. 2011. pp. 1-15.

LU, X. & ZHANG, X. “Natural radioactivity measurements in rock samples of Cuihua Mountain National Geological Park, China”. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 128, n° 1 (2008), p. 77-82. ISSN 01448420. DOI 10.1093/rpd/ncm236.

L’ANNUNZIATA, M. *Solid scintillation analysis*. California-United States of America: Elsevier Inc., 2003. ISBN 9780080495057 DOI 10.1016/B978-012436603-9/50016-8, pp.897.

MARKKANEN, M. *Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity* [en línea]. Helsinki-Finland: 1995. ISBN 9517120796. [Consulta: 5 de enero 2021] Disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/021/28021209.pdf.

MENDOZA, E. Determinación de ²³²Th, ²³⁸U y ⁴⁰K en suelos de diferentes zonas de Colombia a través de espectroscopía de rayos gamma (Trabajo de titulación). (Pregrado)

Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Bucaramanga, Colombia. 2009. pp. 8.

MOOK, W. “Ecuaciones de Desintegración y Acumulación Radioactiva. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico” [en línea], 2001. pp. 61-64. [Consulta: 29 de enero 2021] Disponible en: [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO ISOTOPOS/PDF Isotopos-I/Seccion 6.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO_ISOTOPOS/PDF_Isotopos-I/Seccion_6.pdf).

NIU, S. *Radiation protection of workers*. Geneva, Switzerland: International Labour Organization, 2011. ISBN 9789221249573, pp. 3-10.

NUCLEAR CANADIAN NUCLEAR SAFETY. *Radation doses* [en línea]. Canada: 2020. [Consulta: 1 febrero 2021]. Disponible en: <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/radiation-doses.cfm>.

OMS. *El radón y sus efectos en la salud* [en línea]. 2021. [Consulta: 15 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.

OMS. *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección* [en línea]. 2016. [Consulta: 1 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>

PIEDECAUSA GARCÍA, B.; et al. “Radiactividad natural de los materiales de construcción”. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*, n° 945 (2011), (España). pp. 34-50. ISSN 0008-8919. pp. 51.

PINZÓN, J. Propiedades físico-mecánicas de las principales rocas ornamentales de la provincia de Loja y su aplicación en acabados de vivienda (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador. 2017. pp. 10-26.

RANGACHARYULU, C. *Physics of Nuclear Radiations Concepts, Techniques and Applications.*: Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 9788578110796, pp. 34-36.

RANGEL, J. Estudio de nuevos detectores para espectrometría de radiación gamma [en línea] (Trabajo de titulación).c(Pregrado) Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de

Ingeniería Nuclear, Madrid, España. 2017. pp. 16-39. [Consulta: 5 febrero 2021]. Disponible en: http://oa.upm.es/49203/1/TFG_JORGE_RANGEL_SANZ.pdf.

RIGHI, S. & BRUZZI, L. “Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings”. *Journal of Environmental Radioactivity*, n°39 (2006), (Italy) pp. 158-170. DOI 10.1016/j.jenvrad.2006.01.009.

RODRIGUEZ, M.; GONZÁLEZ, J. & GINER, J. *Geología Práctica*. Madrid-España: Pearson, 1970. ISBN 84-205-3908-2003, pp. 2-57.

SCAN. Informe de análisis de Contenido Radiactivo en muestras de granito. 2021.

SOTO, M. *Texto universitario de Petrología*. Puno-Perú: Universidad Nacional del Altiplano. 2005. pp. 75-100.

STALTER, R. & HOWARTH, D. “Gamma Radiation. Gamma Radiation” [en línea]. (2012), (New York) pp. 43. [Consulta: 6 enero 2021] DOI 10.5772/34856. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/221929415>.

THE RADIATION PROTECTION AUTHORITIES IN DENMARK, FINLAND, ICELAND, NORWAY AND SWEDEN. *Recommendations in the Nordic Countries :Naturally Occurring Radioactivity in the Nordic Countries.*: 2000. ISBN 9189230000, pp. 28-64.

TOSELLI, A. “Miscelánea 18: Elementos Básicos de petrología ÍGNEA”. *Journal of Chemical Information and Modeling*,(2010), (Argentina). pp. 188. ISSN 1098-6596.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H.; CHRISTOFIDES, S. & CHRISTODOULIDES, G. “Gamma radiation measurements and dose rates in commercially-used natural tiling rocks (granites)”. *Journal of Environmental Radioactivity*, n° 70 (2003), (Cyprus). pp. 223-235. ISSN 0265931X. DOI 10.1016/S0265-931X(03)00106-1.

UNSCEAR. *Volume I: Sources and Effects and Risks of Ionizing Radiation. Radiation Research*. New York-United States of America: 2008. ISBN 978-92-1-142274-0, pp. 4.

UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation*. New York-United States of America: 2000. ISBN 9789211422740. pp. 89-114.

VARELA, R. *Miscelánea 21: Manual de geología*. San Miguel de Tucumán-Argentina: Instituto Superior de Correlación Geológica, 2014. ISBN 9781787284395, pp. 26-52.

VOLLBERT, M. FECHAMIENTO GEOLÓGICO POR EL MÉTODO: 40 Ar- 39 Ar (Trabajo de titulación). (Pregrado)Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. México D.C.-México. 1992. pp. 12.

ANEXO B: FORMATO DE GUARDADO DE DATOS EN EXTENSIÓN .TXT

GNU: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Title

Name of analyst

Address

Sample name

Location

Client

Sample number

Classification

Comment

Measurement date 18/02/2021 14:30:12

Measurement time (sec) 18000

Background measurement date

Background measurement time (sec) 1200

Background CPS 134Cs: 0.31; 137Cs: 0.47; 134Cs+137Cs: 0.77; 40K: 0.26;

Background measurement result 134Cs+137Cs: 0.00 ± 3.00; 40K: 132.06 ± 21.85;

Measuring instrument name ADANI RUG 91-2 (SN: 030, NaI[Tl])

Data ID 21_2021-02-18_09-15-38

Calibration date

Place of measurement

Name of nuclide	Activity (Bq/kg)	Lower limit (P=0.99)	CPS	Detection	Energy (keV)
-----------------	------------------	----------------------	-----	-----------	--------------

134Cs	0.10 ± 2.53	0.32	0.07 (1243)	ND	761-883
-------	-------------	------	-------------	----	---------

137Cs	2.96 ± 2.63	7.51	0.11 (1926)	ND	609-761
-------	-------------	------	-------------	----	---------

134Cs+137Cs	3.06 ± 2.61	0.47	0.18 (3169)	Detected	609-883
-------------	-------------	------	-------------	----------	---------

40K	253.02 ± 47.92	110.71	0.12 (2165)	Detected	1339-1583
-----	----------------	--------	-------------	----------	-----------

131I	0.09 ± 0.03	-	0.23 (4225)	Detected	304-426
------	-------------	---	-------------	----------	---------

Comment

ANEXO C: IMPULSOS CORRESPONDIENTES A LOS CANALES PARA EL K-40.

Canales	GGBC	GNGI	GRI	GVUB	GSBC	GVC
420	146	67	153	153	242	135
421	132	50	121	111	236	110
422	122	52	138	95	226	123
423	135	61	118	112	219	124
424	119	67	125	114	230	111
425	128	60	118	121	232	126
426	115	58	121	102	218	129
427	112	68	113	104	197	127
428	120	44	120	104	186	132
429	113	52	119	100	204	120
430	138	70	110	77	197	121
431	120	67	100	87	223	108
432	123	52	102	82	226	98
433	118	73	109	98	222	110
434	102	59	97	88	185	108
435	100	60	118	88	189	115
436	97	50	90	89	190	95
437	98	45	114	94	190	110
438	109	70	121	82	213	107
439	111	67	96	81	188	122
440	129	60	108	88	180	108
441	122	77	117	92	200	107
442	103	63	107	77	205	102
443	125	71	113	100	195	109
444	109	68	117	95	225	111
445	122	64	109	94	190	134
446	118	73	120	86	207	105
447	127	80	125	96	213	114
448	142	73	124	85	235	110
449	116	90	127	97	268	124
450	123	84	146	111	197	124
451	126	80	124	121	246	135

452	154	99	126	112	216	116
453	133	82	132	114	231	126
454	159	84	138	116	246	122
455	158	90	168	143	249	138
456	162	99	148	127	271	165
457	183	100	150	159	294	165
458	193	90	157	155	306	166
459	198	107	149	149	290	166
460	208	111	173	166	317	158
461	195	106	172	165	287	185
462	201	116	200	185	324	181
463	224	123	201	188	303	174
464	229	126	195	186	336	201
465	239	114	216	196	361	204
466	261	123	213	190	354	224
467	234	123	218	202	343	198
468	239	102	230	208	340	241
469	285	138	216	254	356	233
470	252	146	253	236	380	254
471	263	132	229	262	370	285
472	254	111	259	277	401	258
473	295	149	270	266	409	261
474	297	111	286	306	438	270
475	284	123	254	281	411	291
476	316	122	293	268	431	274
477	289	143	242	322	426	270
478	331	123	294	288	435	312
479	301	128	285	313	429	332
480	360	135	271	319	458	337
481	336	109	306	373	455	313
482	306	115	291	324	460	353
483	352	106	290	318	437	334
484	293	101	270	332	417	326
485	291	123	290	340	400	366
486	321	94	274	341	438	356

487	311	104	257	329	434	310
488	334	90	300	293	410	336
489	316	102	285	339	450	380
490	285	74	292	329	384	305
491	269	80	245	303	357	337
492	320	78	249	303	372	299
493	264	86	254	295	337	306
494	244	55	215	289	358	268
495	246	65	214	255	320	286
496	222	59	187	251	319	294
497	218	60	214	258	321	253
498	199	64	176	234	254	251
499	154	47	159	216	271	226
500	172	40	166	221	255	220
501	144	43	139	186	273	205
502	153	46	144	152	250	190
503	137	48	157	146	233	177
504	113	33	126	136	203	162
505	123	37	144	116	182	170
506	114	40	121	124	187	164
507	112	32	107	94	157	157
508	103	33	104	123	180	102
509	75	31	104	82	146	135
510	81	20	117	75	149	111
511	83	23	123	65	151	96
512	73	21	85	65	159	90
513	70	30	98	68	171	93
514	66	29	89	53	138	79
515	76	31	88	55	133	64
516	60	27	86	47	150	84
517	73	22	85	40	156	61
518	69	35	85	30	138	59
519	69	28	93	36	134	62
520	64	17	96	34	134	54

ANEXO D: REPORTE DE ESPECTROMETRÍA GAMMA DE LAS MUESTRAS DE GRANITO REALIZADO POR LA SCAN.



LABORATORIO DE ANALISIS DE RADIATIVIDAD

INFORME DE ANALISIS DE CONTENIDO RADIACTIVO Código de Laboratorio: ARAD-2021-006

La Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares perteneciente al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable realizó el Análisis de Contenido Radicativo en muestras de material de petróleo.

Cliente:
PUEDMAG FUENTES CARMEN EMILIA
Baquerizo Moreno 40-26 y Francisco Rosales
Riobamba - Ecuador

Fecha de ingreso a laboratorio: 05/02/2021
Muestreado por: PUEDMAG FUENTES CARMEN EMILIA
Fecha de muestreo:

RADIONUCLIDOS DETERMINADOS EN LAS MUESTRAS CON SU ACTIVIDAD E INCERTIDUMBRE ASOCIADA

CÓDIGO LABORATORIO	INFORMACION DE LA MUESTRA		ACTIVIDAD DE LA MUESTRA									
	IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Bi-214 Bq/g	Pb-214 Bq/g	Ra-226 Bq/g	Cd-109 Bq/g	Ac-228 Bq/g	Pb-212 Bq/g	Th-232 Bq/g	U-235 Bq/g	Pb-210 Bq/g	K40 Bq/g
ARAD-2021-006.01	GVUB	Granito brasileño	0,10±0,008	0,09±0,007	0,02±0,008	<0,01	0,03±0,002	0,03±0,003	<0,01	<0,01	<0,01	1,29±0,09
ARAD-2021-006.02	GRI	Granito indú	0,13±0,009	0,13±0,009	0,03±0,009	<0,01	0,27±0,02	0,28±0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,91±0,06
ARAD-2021-006.03	GSBC	Granito chino	2,37±0,12	1,78±0,14	0,55±0,22	0,46±0,11	0,39±0,02	0,40±0,03	3,3±0,53	0,01±0,002	0,25±0,04	1,44±0,10
ARAD-2021-006.04	GNGI	Granito indú	0,52±0,03	0,39±0,03	0,16±0,06	<0,01	0,16±0,01	0,16±0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,07±0,07
ARAD-2021-006.05	GVC	Granito chino	0,49±0,03	0,37±0,03	0,09±0,01	<0,01	0,12±0,007	0,13±0,01	1,2±0,36	<0,01	<0,01	1,26±0,09
ARAD-2021-006.06	GGBC	Granito chino	<0,01	0,03±0,003	<0,01	<0,01	0,01±0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,13±0,01

Fecha de Análisis Instrumental: 05/02/2021-09/02/2021

Técnica de medición empleada para el análisis de la muestra: Determinación de radionúclidos emisores gamma por espectrometría gamma.

Los valores reportados seguidamente del signo "<" corresponden a la Actividad Mínima Detectable (AMD) calculada para un 95 % de confianza. Para estos valores no se calcula ni reporta incertidumbre expandida. Nivel máximo permisible (1 Bq/g) para cadenas de desintegración de Uranio, Torio y (10 Bq/g) para K-40, según niveles para NORM recomendados en las Normas Básicas de Seguridad del OIEA (GSR Parte 3).

Dado en Quito, el 18/02/2021

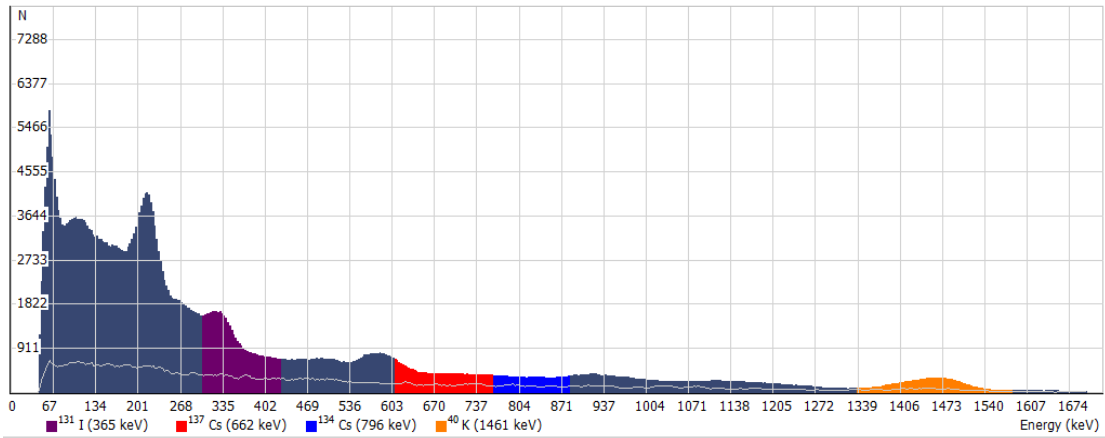
Los resultados que aparecen en este certificado se refieren solamente a las muestras objeto de ensayo.
Este informe no será reproducido sin la aprobación escrita del laboratorio.

Av. República de El Salvador N36-64 y Suecia
Telf.: (593) 337-6000
Quito-Ecuador
Director: ruth.ayabaca@recursosyenergia.gob.ec



Firmado digitalmente por:
CLAUDIA MARCELA
SANGURIMA
VALAREZO

ANEXO E: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GGBC.



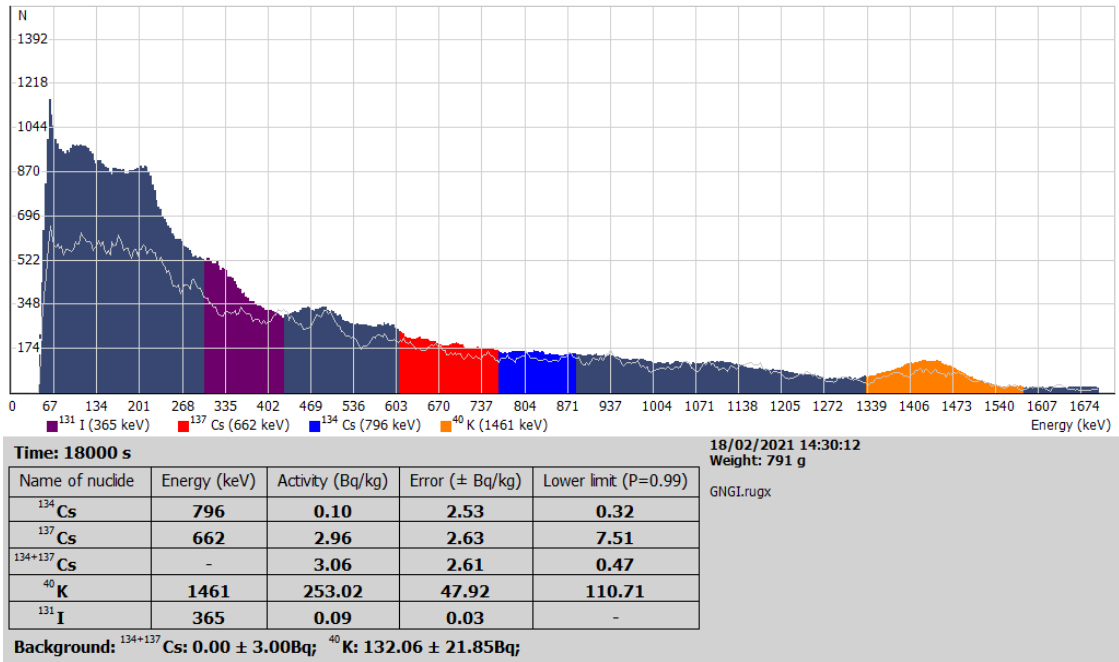
Time: 18000 s **19/02/2021 19:23:34**
Weight: 736 g

Name of nuclide	Energy (keV)	Activity (Bq/kg)	Error (\pm Bq/kg)	Lower limit (P=0.99)
¹³⁴ Cs	796	1.75	15.60	0.28
¹³⁷ Cs	662	23.78	15.87	6.74
¹³⁴⁺¹³⁷ Cs	-	25.52	15.91	0.42
⁴⁰ K	1461	1560.22	192.04	100.66
¹³¹ I	365	0.81	0.27	-

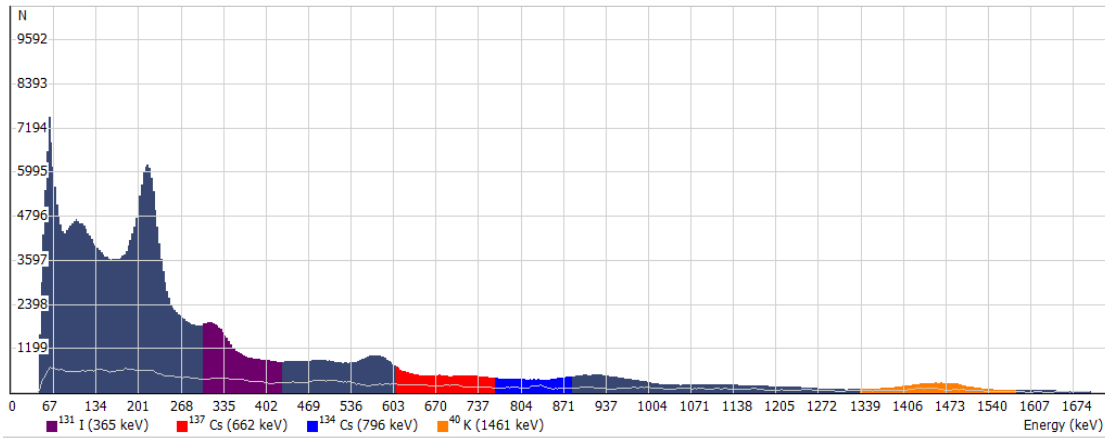
GGBC.rugx

Background: ¹³⁴⁺¹³⁷Cs: 0.00 ± 2.00 Bq; ⁴⁰K: 149.10 ± 21.89 Bq;

ANEXO F: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GNGL.



ANEXO G: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GRI



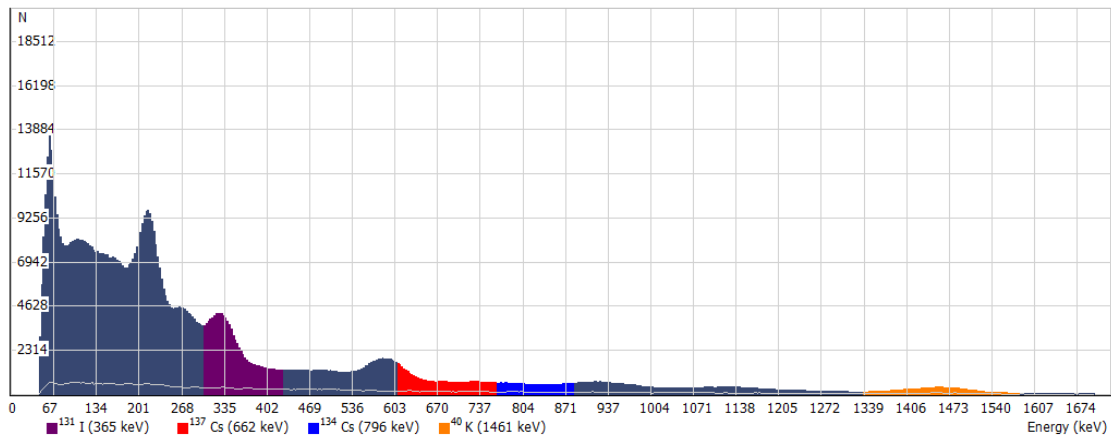
Time: 18000 s **17/02/2021 14:19:36**
Weight: 722 g

Name of nuclide	Energy (keV)	Activity (Bq/kg)	Error (\pm Bq/kg)	Lower limit (P=0.99)
¹³⁴ Cs	796	2.67	13.71	0.35
¹³⁷ Cs	662	20.89	13.94	8.67
¹³⁴⁺¹³⁷ Cs	-	23.56	14.00	0.54
⁴⁰ K	1461	1370.32	170.56	130.54
¹³¹ I	365	0.89	0.26	-

GRI.rugx

Background: ¹³⁴⁺¹³⁷Cs: 0.00 ± 3.00 Bq; ⁴⁰K: 201.64 ± 30.20 Bq;

ANEXO H: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GVC



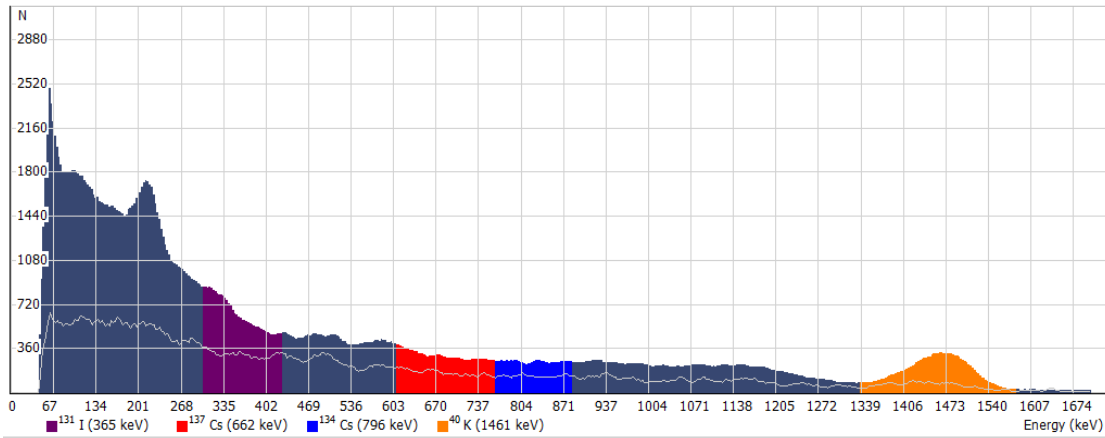
Time: 18000 s **19/02/2021 14:01:39**
Weight: 709 g

GVC.rugx

Name of nuclide	Energy (keV)	Activity (Bq/kg)	Error (\pm Bq/kg)	Lower limit (P=0.99)
^{134}Cs	796	5.00	27.83	0.29
^{137}Cs	662	74.80	29.25	7.00
$^{134+137}\text{Cs}$	-	79.80	29.44	0.44
^{40}K	1461	2782.51	337.08	104.50
^{131}I	365	3.05	0.88	-

Background: $^{134+137}\text{Cs}$: $0.00 \pm 2.00\text{Bq}$; ^{40}K : $149.10 \pm 21.89\text{Bq}$;

ANEXO I: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA GVUB



Time: 18000 s **18/02/2021 20:15:35**
Weight: 729 g

Name of nuclide	Energy (keV)	Activity (Bq/kg)	Error (± Bq/kg)	Lower limit (P=0.99)
¹³⁴ Cs	796	0.48	15.04	0.34
¹³⁷ Cs	662	6.91	15.07	8.15
¹³⁴⁺¹³⁷ Cs	-	7.40	15.07	0.51
⁴⁰ K	1461	1504.26	185.42	120.13
¹³¹ I	365	0.10	0.08	-

GVUB.rugx

Background: ¹³⁴⁺¹³⁷Cs: 0.00 ± 3.00Bq; ⁴⁰K: 132.06 ± 21.85Bq;

ANEXO J: ENTREVISTA A PROVEEDORES DE GRANITO EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA

PROVEEDOR A

DETERMINACIÓN DE INDICES ALFA Y GAMMA DE GRANITOS COMUNMENTE UTILIZADOS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION EN LA CIUDAD RIOBAMBA

Saludo y agradecimiento

¿Cuál es el nombre de su empresa?

Mármoles y Mármoles ubicado en la Av. Canónigo Ramos frente a la puerta de medicina de la ESPOCH.

¿Desde hace cuanto tiempo usted comercializa granitos en la ciudad?

Desde hace 12 años.

¿Qué granitos distribuye en su empresa? ¿Conoce la procedencia de los granitos que usted distribuye?

Los granitos que se comercializan en el negocio son procedentes de :China, Brasil, Italia e India.

¿Cuáles son los granitos que mas se comercializa (los que mas vende) en su distribuidora y su procedencia ?

Verde ubatuba-Brasil

Rojo-India

PROVEEDOR B

DETERMINACIÓN DE INDICES ALFA Y GAMMA DE GRANITOS COMUNMENTE UTILIZADOS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION EN LA CIUDAD RIOBAMBA

Saludo y agradecimiento

¿Cuál es el nombre de su empresa?

Mármoles Riobamba, ubicada en el Barrio Perimetro de las Industrias, vía Cerro Negro. Calles Hermanos AraujoChiriboga y Valencia.

¿desde hace cuanto tiempo usted comercializa granitos en la ciudad?

Desde hace 12 a 15 años.

¿Qué granitos distribuye en su empresa? ¿Conoce la procedencia de los granitos que usted distribuye?

Se distribuyen los granitos principalmente de tres países: China(50%colores claros), Brasil(50%colores claros) e India(colores oscuros)

¿Cuáles son los granitos que mas se comercializa (los que mas vende) en su distribuidora y su procedencia ?

Negro Galaxy- India

Violet-China

Gris beige-China



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 16 / 09 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Carmen Emilia Piedmag Fuentes Marlon Stalin Martínez López</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Física</i>
Título a optar: <i>Físico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, o=BANCO
CENTRAL DEL ECUADOR, ou=UNIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-EC/BCI,
l=QUITO, serialNumber=000021485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.09.16 11:35:02 -05'00'



1801-DBRA-UTP-2021