



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA BIOFÍSICA

**MEDIDAS DE EXHALACIÓN DE RADÓN 222 DEL TUFO
VOLCÁNICO ECUATORIANO USADO COMO MATERIAL DE
CONSTRUCCIÓN**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar por el grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTOR: MÁXIMO JAVIER PINDUISACA SÁEZ

DIRECTOR: Dra. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDOÑEZ PhD.

Riobamba - Ecuador

2022

©2022, Pinduisaca Sáez Máximo Javier

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.

Yo, MÁXIMO JAVIER PINDUISACA SÁEZ, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 18 de marzo 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Máximo Pinduisaca Sáez', is written over a light green rectangular background. The signature is stylized and cursive.

Máximo Javier Pinduisaca Sáez




0605117092

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA BIOFÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto de Investigación, **MEDIDAS DE EXHALACIÓN DE RADÓN 222 DEL TUFO VOLCÁNICO ECUATORIANO USADO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN**, realizado por el señor: **MÁXIMO JAVIER PINDUISACA SÁEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Richard Willians Pachacama Choca MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-02-25
Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordoñez PhD. DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-02-25
Biof. Maria Fernanda Heredia Moyano MSc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-02-25

DEDICATORIA

A mis padres Luis y Ana por ser mi ejemplo de perseverancia y resiliencia, por su constante motivación y haberme inculcado lo mejor de cada uno, El apoyo incondicional en cada momento, con su ejemplo a logrado influir positivamente en mi educación tanto académica como de la vida. A mi familia en general por ser motivo de fortaleza y ejemplo de trabajo honesto, de cierta manera han aportado a lo largo de este arduo camino.

A mis maestros que han sido un gran ejemplo de superación, Dra. Jheny Orbe, por empaparame de su conocimiento forjado con constancia y experiencia, le agradezco su apoyo en la elaboración de este trabajo y en toda mi etapa como estudiante.

Javier

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios por la gracia de regalarme la vida.

A mi padre y madre por apoyarme siempre en mi formación académica y personal, por su incansable lucha y perseverancia para brindarme todo lo necesario.

A mi hermana Bárbara por ser motivo de fortaleza al cumplir mis metas.

A las autoridades, en especial al Dr. Celso Recalde decano de la Facultad de Ciencias, al Dr. Arquímedes Haro director de la escuela de Física y Matemática por haber facilitado los recursos para llevar a cabo el Trabajo de Integración Curricular.

A la Dra. Jheny Orbe por haber atendido cada una de mis inquietudes en este tiempo, por sus enseñanzas y confianza brindada en esta investigación.

Al técnico de laboratorio Biof. Gabriela Ureña por la apertura del laboratorio de técnicas nucleares y la confianza para la utilización de los equipos a mi criterio.

A los maestros que han regado sus conocimientos sobre mí durante esta larga trayectoria, que junto mis compañeros y amigos han dejado una huella imborrable en mi memoria.

A Alexandra Elbakyan por permitir el libre acceso del conocimiento a la comunidad científica dando acceso a millones de publicaciones de alto impacto.

A todos

Muchas Gracias

Javier

TABLA DE CONTENIDO

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

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Radiactividad.....	3
1.1.1. Tipos de radiación ionizante.....	3
1.1.1.1. Radiaciones directamente ionizantes o corpusculares.....	3
1.1.1.2. Radiaciones indirectamente ionizantes o electromagnéticas.....	4
1.1.2. Radiación ionizante natural NORM.....	4
1.1.3. Ley de desintegración radioactiva.....	4
1.2. Radón.....	7
1.2.1. Concentración de uranio 238 y fuentes de radón.....	8
1.2.2. Mecanismos de transporte de radón.....	9
1.2.2.1. Difusión: El Movimiento Browniano.....	10
1.2.2.2. Velocidad de difusión.....	10
1.2.2.3. Energía de activación para la difusión.....	12
1.2.2.4. Difusión por vacancia.....	12
1.2.2.5. Difusión Intersticial.....	12
1.2.3. Emanación.....	13
1.3. Mediciones de radón.....	14
1.3.1. Tasa de exhalación E.....	14
1.3.2. Radón en ambientes cerrados.....	15
1.3.3. Riesgo radiobiológico.....	15
1.3.3.1. Deposición de energía.....	16
1.3.3.2. Efectos sobre el ADN.....	16
1.3.3.3. Efectos sobre los tejidos.....	17
1.3.3.4. Efectos prenatales.....	17
1.4. Dosimetría.....	17

1.4.1.	<i>Límites y niveles de exposición de Radón</i>	18
1.4.2.	<i>Dosis límite permitida para personas ocupacionalmente expuestas a la</i>	18
1.4.3.	<i>Unidades de radiación</i>	19
1.5.	Clasificación de las rocas volcánicas	21
1.5.1.	<i>Clasificación basada en las relaciones de campo</i>	21
1.5.2.	<i>Clasificación basada en la mineralogía de las rocas volcánicas</i>	21
1.5.2.1.	<i>Cuarzos</i>	21
1.5.2.2.	<i>Feldespatos</i>	22
1.5.2.3.	<i>Feldespatoides</i>	22
1.5.2.4.	<i>Micas</i>	22
1.5.2.5.	<i>Minerales ferromagnesianos</i>	22
1.5.3.	<i>Clasificación basada en la composición química</i>	23
1.5.3.1.	<i>Saturación en Sílice</i>	23
1.5.3.2.	<i>Saturación de Aluminio</i>	23
1.5.4.	<i>Clasificación en base a la textura</i>	23
1.5.4.1.	<i>Rocas magmáticas</i>	24
1.5.4.2.	<i>Rocas volcanoclasticas</i>	24
1.5.5.	<i>Depósitos de corrientes piroclásticas</i>	25
1.6.	Toba o Tufo volcánico	26
1.6.1.	<i>Tipos de fragmentos tobaceos</i>	27
1.6.2.	<i>Radioactividad en Toba</i>	28

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	29
2.1.	Área de estudio	29
2.2.	Características geológicas y geográficas de los puntos de muestreo	30
2.2.1.	<i>Volcán Chimborazo</i>	30
2.2.2.	<i>Volcán Cotopaxi</i>	31
2.2.3.	<i>Volcanes Sagoatoa-Chinibano</i>	32
2.2.4.	<i>Volcán Pululahua</i>	32
2.3.	Protocolo de muestreo del tufo volcánico	33
2.4.	Procedimiento para determinar la densidad y porosidad de las muestras de tufo	34
2.4.1.	<i>Densidad</i>	34
2.4.2.	<i>Porosidad</i>	34
2.5.	Descripción de la técnica de cámara cerrada	35

2.5.1.	<i>Cámara cerrada</i>	35
2.5.2.	<i>Detector: Celda de Lucas (modelo 600P)</i>	36
2.5.3.	<i>Data Logger Ecowitt</i>	37
2.5.4.	<i>Monitor Pylon AB7</i>	37
2.5.5.	<i>Procedimiento para determinar la tasa de exhalación de radón-222 del tufo volcánico</i>	39
2.5.6.	<i>Dosis Efectiva Anual</i>	41

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	43
3.1.	Características geológicas y geográficas de los puntos de muestreo	43
3.2.	Caracterización de la cámara cerrada	45
3.2.1.	<i>Tasa de fuga de la cámara</i>	45
3.2.2.	<i>Temperatura y humedad relativa dentro la cámara</i>	46
3.2.3.	<i>Fondo radón dentro de la cámara</i>	48
3.3.	Tasas de exhalación de Tufo volcánico	47
3.3.1.	Resultados de la tasa de exhalación másica de radón	50
3.3.2.	Resultados de la tasa de exhalación superficial	51
3.4.	Dosis anual por inhalación de radón	51
	CONCLUSIONES	52
	RECOMENDACIONES	53

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Principales características físicas y químicas del isótopo ^{222}Rn	7
Tabla 2-1:	Propiedades relevantes del isótopo radioactivo radón 222	8
Tabla 3-1:	Concentración promedio de Uranio en varios tipos de roca	9
Tabla 4-1:	Límites de dosis efectiva para radiación ionizante en Ecuador	19
Tabla 5-1:	Medidas radiométricas, unidades SI y conversiones usadas generalmente.....	19
Tabla 6-1:	Factores de ponderación según el tipo de radiación ionizante incidente.	20
Tabla 7-1:	Factores de ponderación para la radiosensibilidad de cada tipo de tejido.....	21
Tabla 8-1:	Denominación y clasificación de material piroclástico según su tamaño.	27
Tabla 1-2:	Especificaciones del detector de centelleo o celda de Lucas Pylon 600P.....	38
Tabla 2-2:	Especificaciones generales del monitor Pylon AB7	41
Tabla 1-3:	Características geográficas y geológicas de las canteras	43
Tabla 2-3:	Caracterización de las muestras de tufo volcánico estudiadas.....	44
Tabla 3-3:	Tasas de exhalación másica de las muestras de tufo volcánico	49
Tabla 4-3:	Dosis anual por inhalación de radón proveniente del tufo CEST03	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	La cadena de desintegración del radón. Una flecha apuntando hacia abajo indica desintegración por emisión de partículas alfa; una flecha apuntando hacia la derecha indica desintegración por emisión de partículas beta	6
Figura 2-1:	Fenómeno de difusión estado inicial y final	10
Figura 3-1:	Fenómeno de emanación de radón-222	14
Figura 4-1:	Morfología de una Toba volcánica	16
Figura 1-2:	Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de tufo volcánico.....	29
Figura 2-2:	Mapa geográfico del volcán Chimborazo. (1:5000)	30
Figura 3-2:	Mapa geográfico del volcán Cotopaxi (1:5000)	31
Figura 4-2:	Mapa geográfico de los volcanes Sagoatoa-Chinibano (1:5000).....	32
Figura 5-2:	Mapa geográfico del volcán Pululahua (1:5000)	33
Figura 6-2:	Esquema monitor Pylon AB7–Cámara Cerrada	35
Figura 7-2:	Detector de centelleo pasivo Celda de Lucas Modelo 600P	36
Figura 8-2:	Monitor Pylon AB7	38

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Concentración de radón en función del tiempo dentro de la cámara	45
Gráfico 2-3:	Temperatura en el laboratorio y dentro de la cámara	47
Gráfico 3-3:	Humedad en el laboratorio y en el interior de la camara cerrada	47
Gráfico 4-3:	Concentración de radón de fondo en función del tiempo, dentro de la cámara ...	48
Gráfico 5-3:	Curva de crecimiento de concentración de radón 222 dentro de la cámara en la muestra CEST01 Pilahuin-Tungurahua.....	48
Gráfico 6-3:	Concentración de radón en función del tiempo, muestra CPP01.....	49

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1:	Desintegración Radioactiva.....	5
Ecuación 2-1:	Tiempo de vida media.....	5
Ecuación 3-1:	Densidad de flujo efectiva.....	5
Ecuación 4-1:	Ecuación de continuidad	5
Ecuación 5-1:	Ecuación de difusión.....	5
Ecuación 6-1:	Ley de Fick	12
Ecuación 7-1:	Ecuación de difusión de ^{222}Rn	12
Ecuación 1-2:	Densidad de las Muestras.....	34
Ecuación 2-2:	Tasa de exhalación superficial	39
Ecuación 3-2:	Tasa de exhalación másica	39
Ecuación 4-2:	Tasa de intercambio de aire de la cámara.....	40
Ecuación 5-2:	Pendiente de decaimiento teórica	40
Ecuación 6-2:	Concentracion a partir de la tasa de exhalacion superficial	41
Ecuación 7-2:	Energia potencial alfa.....	42

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
ICRP	International Commission on Radiological Protection
OIEA	International Atomic Energy Agency
OMS	Organización Mundial de la Salud
Bq/m³	Bequerelio por metro cubico
λ_{Rn}	Constante de desintegración del radón
λ_l	Tasa de fuga
λ_{eff}	Constante de decaimiento efectiva
C_{Bg}	Concentración de Background, Fondo Radioactivo
235 U	Uranio 235
238U	Uranio 238
222 Rn	Radón 222
226 Ra	Radio 226

RESUMEN

Este trabajo de integración curricular se relacionó con la radioactividad natural, específicamente con la cuantificación de las tasas de exhalación de radón-222 de siete muestras de tufo volcánico, usado como material de construcción, las muestras fueron recolectadas en canteras de material pétreo, ubicadas en las provincias de Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y Pichincha. Las muestras se analizaron con la técnica de la cámara cerrada, cuya configuración experimental consistió en un detector de centelleo (Celda de lucas), incorporado al monitor Pylon AB, y una cámara de vidrio templado de 125 litros. Los experimentos realizados para caracterizar la cámara del laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, mostraron que presenta una baja tasa de fuga, no está aislada térmicamente y presenta un fondo radón compatible con el laboratorio. Las tasas de exhalación másica de las siete muestras de tufo presentaron valores bajo el nivel de detección de la técnica, excepto las tres muestras de la cantera El Salvador que exhalaban en el rango de 0,041 a 0,050 Bq/kg h. Para una de las muestras de la cantera El Salvador se determinó la tasa de exhalación superficial ($1,27 \pm 0,028$ Bq/kg h) que equivale a una dosis de (0.15 mSv/y), valor inferior al recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) (1 mSv/y). Se recomienda el análisis de muestras de origen volcánico ya que existe una alta probabilidad de radioactividad en este tipo de materiales.

Palabras clave: <CELDA DE LUCAS>, <CONCENTRACIÓN DE RADON 222>, <RADIOACTIVIDAD NATURAL>, <TASA DE EXHALACIÓN MÁSCICA>, <TASA DE EXHALACIÓN SUPERFICIAL>, <TÉCNICA DE CÁMARA CERRADA>, <TOBA VOLCÁNICA>, <TUFO VOLCÁNICO>.

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por
LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN):
o=EC, o=BANCO CENTRAL DEL
ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-
ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA
NUSTE
Fecha: 2022.04.19 10:44:15 -05'00'



0718-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

This curricular integration work is related to natural radioactivity, specifically with the quantification of radon-222 exhalation rates of seven samples of volcanic tuff, used as construction material, the samples were collected in quarries of stone material, located in the provinces of Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, and Pichincha. The samples were analysed with the closed chamber technique, whose experimental setup consisted of a scintillation detector (Lucas cell), incorporated into the Pylon AB monitor, and a 125-litre tempered glass chamber. Experiments performed to characterise the chamber in the Nuclear Techniques laboratory of the ESPOCH Science Faculty showed that it has a low leak rate, is not thermally insulated, and has a radon background compatible with the laboratory. The mass exhalation rates of the seven tuff samples presented values below the detection level of the technique, except for the three samples from the El Salvador quarry that exhaled in the range of 0.041 to 0.050 Bq/kg h. For one of the samples from the El Salvador quarry, the surface exhalation rate was determined (1.27 ± 0.028 Bq/m² h), which is equivalent to a dose of (0.15 mSv/y), a value lower than that recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) (1 mSv/y). The analysis of samples of volcanic origin is recommended as there is a high probability of radioactivity in this type of material.

Keywords: <LUCAS CELL>, <RADON 222 CONCENTRATION>, <NATURAL RADIOACTIVITY>, <MASS EXHALATION RATE>, <SURFACE EXHALATION RATE>, <CLOSED CHAMBER TECHNIQUE>, <VOLCANIC TOBA>,<VOLCANIC TUFF>.

CARMITA
EULALIA
ROJAS CASTRO

Digitally signed by
CARMITA EULALIA
ROJAS CASTRO
Date: 2022.04.20
12:14:07 -05'00'

INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales radiactivos en las montañas Erz en Europa oriental fue la primera ocupación asociada con un mayor riesgo de cáncer de pulmón. Ya en el siglo XVI, se describió una mortalidad excepcionalmente alta por enfermedades respiratorias en los mineros de esta región. El peligro de cáncer de pulmón fue reconocido por primera vez en 1879 por Harting y Hesse (Cossio Enrique, 2021: p.6). Un informe proporcionó descripciones clínicas y de autopsia de neoplasias intratorácicas en mineros, que clasificaron como linfosarcoma. A principios del siglo XX, la revisión histopatológica de una serie de casos estableció que la malignidad prevalente entre los mineros de las montañas Erz era un cáncer primario de pulmón. No se llevaron a cabo estudios epidemiológicos formales de los mineros de Schneeberg y Joachimsthal (Minas de las montañas Erz), pero los informes publicados documentaron que alrededor del 50% de una fuerza laboral de 650 hombres finalmente murió de cáncer de pulmón. (Greenberg, M; Selikoff, 1991: p. 13). A partir del final de la década de 1940, la industria del uranio estadounidense tuvo un gran crecimiento en la meseta de Colorado, el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos (PHS) comenzó a investigar las minas y molinos de uranio en la región de Colorado. La investigación combinó una encuesta de higiene industrial con un estudio médico de los trabajadores para determinar la relación del radón con muertes por cáncer pulmonar. El comité de investigación dio una estimación, que de 11000 muertes por cáncer de pulmón en personas no fumadoras alrededor de 2100 a 2900 fueron a causa de la inhalación de radón (BEIR, 1999: p. 4).

El radón es un gas radiactivo inodoro e incoloro que tiene una vida media de 3.8 días procedente de la cadena de desintegración del ^{238}U se encuentra principalmente en minas de uranio, carbón, cuevas túneles, estaciones de tren, bodegas, sótanos debido a su acumulación también lo encontramos en rocas y suelos de diferentes ambientes. El radón-222 al ser un gas inerte se deposita en las vías respiratorias, a medida que decaen en radioisótopos sólidos de corta duración. La existencia de uranio en el material de construcción significa la posibilidad de gas radón difundándose en el ambiente interior, y hay un peligro potencial para la salud pública. Por tanto, es necesario comprender sus propiedades radiactivas que han sido objeto de numerosas investigaciones. Cualquier roca que contenga uranio o radio, puede emitir radón. En ambiente volcánico, al contener más uranio las rocas diferenciadas como ígneas, presentan mayores emisiones de radón que los demás materiales pétreos (Righi y Bruzzi, 2006: p.11).

El radón-222 y sus derivados se pueden inhalar en el sistema respiratorio; decaen en nuestros pulmones emitiendo partículas alfa que pueden dañar nuestro tejido pulmonar. La OMS clasifica al radón como la primera causa de cáncer de pulmón para los no fumadores y como segunda causa para los fumadores. Múltiples investigaciones epidemiológicas alrededor del mundo han

demostrado un aumento estadísticamente significativo del riesgo de cáncer de pulmón debido a la exposición prolongada al radón y su progenie en ambientes interiores. (Lubin et al., 1997: p.3).

Para el desarrollo de políticas públicas sobre radón en interiores, se deben caracterizar los riesgos que implica el radón-222 en toda la gama de exposiciones residenciales recibidas por la población. Por ejemplo, en los Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en el año 1992 ha pedido la medición voluntaria de la concentración de radón en interiores en residencias unifamiliares y la mitigación del radón en hogares con concentraciones anuales promedios superiores a 148 Bq m^{-3} (4 pCiL^{-1}) (BEIR, 1999: p. 6).

Diversos estudios como el realizado por Dempsey, Lyons y Nolan coinciden con investigaciones previas, al relacionar una alta probabilidad de cáncer de pulmón en ambientes interiores donde el nivel promedio de radón supere los límites permisibles 300 Bq m^{-3} . En donde del 10% al 20% de los hogares reportados estaban por encima del nivel de referencia llegando a valores como 800 Bq m^{-3} en donde existía de 2 a 3 veces mayor probabilidad de diagnosticar un cáncer de pulmón en personas que residían en esa área (Dempsey et al., 2018: p.17).

En ambientes cerrados (radón *indoor*) este gas se acumula. En estas situaciones, las concentraciones pueden alcanzar valores incluso superiores a 1000 Bq m^{-3} (OMS, 2016: p.16). Una fuente importante de radón en las viviendas, la constituyen los materiales de construcción. La tasa exhalación de radón depende de la composición (contenido de radio) y las características físicas y químicas del material en cuestión. Lo antes mencionado, evidencia la importancia de evaluar la tasa de exhalación de radón-222 en materiales usados en la industria de la construcción e identificar los niveles de radiación de interés desde el punto de vista de la protección radiológica. Esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto de investigación denominado **“Evaluación de elementos radiactivos de la serie del Uranio 238 en el ambiente en pacientes con cáncer”**, ejecutado por el Grupo de Investigación GIDAC-ESPOCH, y tiene como objetivo determinar los coeficientes de exhalación másico de ^{222}Rn de tufo volcánico ecuatoriano usado como material de construcción, para esto se recurrió a la búsqueda de fuentes idóneas de este material mediante el uso de cartas geológicas de la región interandina que revelan los depósitos de agregados pétreos y el tipo de material que se encuentra en la zona hallando así los lugares que fueron tomados en cuenta para su estudio, las muestras fueron extraídas de diferentes canteras, mismas que procesan el material con diferente granulometría de acuerdo a las necesidades específicas de los constructores. También se usó programas de geolocalización para determinar su ubicación geográfica exacta. Una vez seleccionadas las muestras se caracterizaron según la densidad, porosidad y color de tufo.

Se utilizó la técnica de cámara cerrada, cuyo set-up experimental consiste en un detector de centelleo activo en el interior de una cámara de vidrio templado de 125 litros, y un data logger para medir la temperatura y humedad relativa dentro de la cámara.

CAPÍTULO I

1. Marco Teórico

1.1. Radioactividad

La radioactividad se puede clasificar en dos principales categorías: ionizante y no ionizante, dependiendo de la capacidad de ionizar la materia. Es necesaria una mínima energía para ionizar un átomo, el rango va de pocos eV para elementos alcalinos a 24.5 eV para el helio (Podgorsak, 2003, p. 5).

- Radiación no ionizante (no puede ionizar la materia)
- Radiación ionizante (puede ionizar la materia directa o indirectamente)
 - Radiación directamente ionizante (partículas cargadas: Electrones, protones, partículas alfa, iones pesados)
 - Radiación indirectamente ionizante (partículas neutras: Fotones (rayos x, rayos gamma), neutrones)

1.1.1. Tipos de radiación ionizante

Las radiaciones ionizantes pueden ser de tipos corpusculares y electromagnéticas:

1.1.1.1. Radiaciones directamente ionizantes o corpusculares

La radiación directamente ionizante deposita energía en el medio mediante interacciones coulombianas entre la partícula cargada directamente ionizante y los electrones orbitales de los átomos del medio.

Partículas alfa (α):

Las partículas alfa son núcleos de Helio (He), están estructuradas por cuatro unidades de masa y dos unidades de carga eléctrica positiva, son partículas pesadas que son emitidas con mayor energía. Este tipo de radiación es poco penetrante y puede ser detenida por una hoja de papel; no ejercen daño si las sustancias que las emiten no ingresan en el cuerpo por inhalación o por ingestión, pero si se llegasen a introducir pueden generar daños significativos (Bushong Stewart, 2009, p. 101).

Partículas Beta (β):

Este tipo de partículas se generan a partir de la transformación de un protón en un neutrón o viceversa; estas pueden propagarse en el aire unos pocos metros y unos cuantos centímetros en plásticos o tejidos, esta propagación va a depender esencialmente de la energía de las partículas.

1.1.1.2. Radiaciones indirectamente ionizantes o electromagnéticas

La radiación indirectamente ionizante deposita energía en el medio mediante dos pasos: en primer lugar, una partícula cargada se libera en el medio, esta partícula liberada deposita su energía en el medio (Podgorsak, 2003, p. 5)

Rayos Gamma:

Los rayos gamma se originan mediante transiciones que se dan en el interior del núcleo atómico tras emitir una partícula alfa o beta; su característica principal radica en la cantidad de energía que posee la misma que puede llegar a decenas de kev hasta miles de kev.

Rayos X:

Poseen menor energía que los rayos gamma; sin embargo, esa energía es capaz de atravesar las estructuras del cuerpo humano para la realización de estudios médicos; al tener contacto con los tejidos de los órganos estos rayos pueden provocar alteraciones o cambios en las células.

Neutrones:

Los neutrones son partículas cuatro veces inferiores a las partículas alfa y sin carga por lo que poseen una gran energía y a su vez son muy penetrantes por lo que no sufren cambios al atravesar la materia. Solo pueden ser detenidos por el agua, parafina, plomo o grandes estructuras de hormigón (Bushong Stewart, 2009, p. 102).

1.1.2. Radiación ionizante natural NORM

La radiación ionizante en el ambiente se puede dar de formas natural y artificial, es examinada periódicamente por el comité científico de las naciones unidas para el estudio de los efectos de las radiaciones ionizantes UNSCEAR. Este tipo de radiaciones se encuentran en el medio que nos rodea, se puede generar como consecuencia de la presencia de los materiales radioactivos que están en la corteza terrestre, cabe destacar que el nivel de radiación natural presente en el planeta va a depender de la zona estudiada, un ejemplo claro es la India donde la radiación es diez veces mayor en comparación con la media europea, esto se debe básicamente a las arenas de la India las cuales tienen alto contenido en torio, que es un elemento radioactivo natural (CSN, 2018, p. 4).

1.1.3. Ley de desintegración radioactiva

Esta ley se basa en la desintegración de un isotopo radiactivo en función del tiempo (vida media); dentro del proceso existe una constante de desintegración radiactiva la cual tiene medidas de tiempo inversas en donde sus unidades será s^{-1} , min^{-1} , h^{-1} , etc. Así mismo está el inverso de la

constante de desintegración radioactiva $\tau = 1/\lambda$ la cual tiene dimensiones de tiempo y es la vida promedio. Por otro lado, está el tiempo promedio de Semi-desintegración o semivida ($t_{1/2}$) que es el tiempo que tardan el número de núcleos existentes en reducirse a la mitad. A continuación, la expresión matemática de la desintegración y semidesintegración radiactiva.

Desintegración:

$$-dN = \lambda N dt$$

Ecuación 1-1: Desintegración Radioactiva

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Fuente: (Bushong Stewart, 2009, p. 98).

Donde:

N (t)= número de núcleos radiactivos en un instante t

dN= número de desintegraciones en el tiempo

N= número de núcleos que quedan sin desintegrar

N_0 = número de núcleos iniciales

λ = constante de desintegración

Semi-Desintegración

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Ecuación 2-1: Tiempo de vida media

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Fuente: (Bushong Stewart, 2009, p. 98).

Donde:

$T_{1/2}$ = tiempo promedio de semidesintegración o semivida

Existen tres tipos de series radiactivas naturales, la del uranio-238 (^{238}U), uranio-235 (^{235}U) y torio-232 (^{232}Th), en donde las emisiones alfa algunas veces se alteran con emisiones beta y se genera o acaban en un isotopo estable de plomo $Z=82$ (IAEA, 2010, p.18).

La Figura 1-1 Muestra el esquema de descomposición de la serie del uranio en base a su número atómico Z y numero másico A

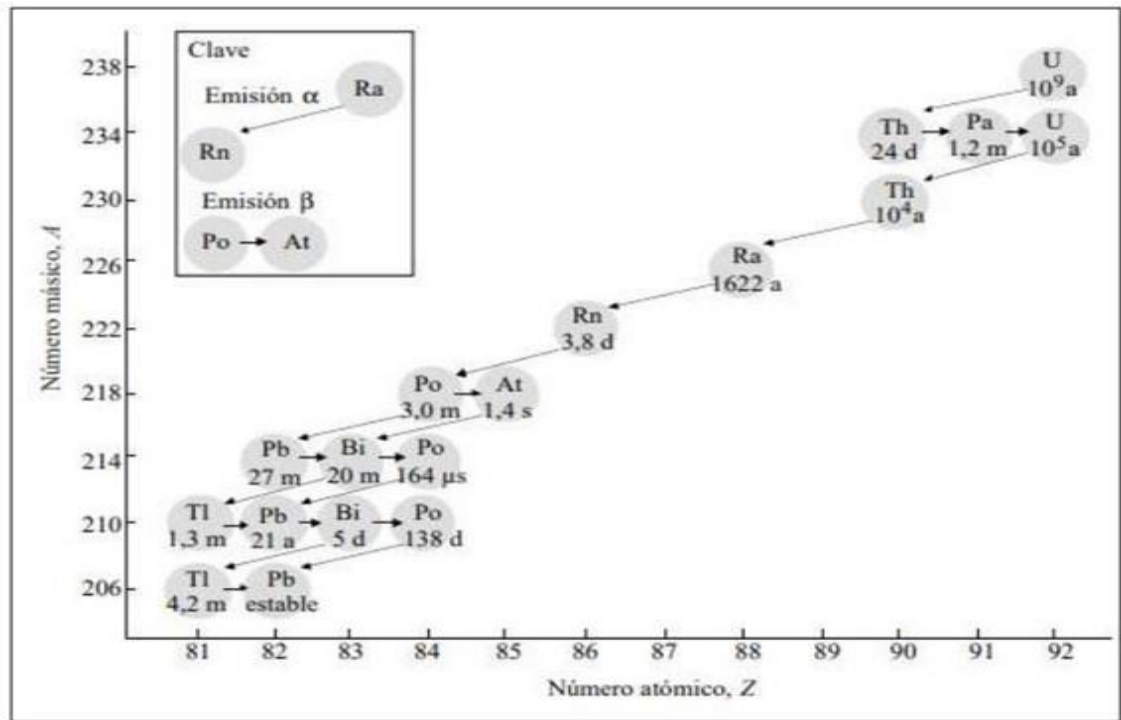


Figura 1-1: Cadena de desintegración del ^{238}U . Una flecha apuntando hacia abajo indica desintegración por emisión de partículas alfa; una flecha apuntando hacia la derecha indica la desintegración radioactiva por emisión de partículas beta.

Fuente: (Aguilar, 2018, p. 13).

El uranio de número másico 238 es el isótopo más abundante (99,2830 %), el uranio natural, es un emisor alfa, de periodo muy largo (4.5×10^9 años). Se trata de un elemento químico que forma parte de numerosos minerales, entre ellos, las rocas graníticas. No es fisionable por los neutrones térmicos, pero sí por los rápidos, aunque con pequeña sección eficaz. Mediante la emisión de una partícula alfa (dos protones y dos neutrones) se obtiene el ^{234}Th de periodo de semidesintegración de 24.10 días, luego de una desintegración beta (electrón y positrón) se obtiene el ^{234}Pa con vida media de (6.75 horas), tras otra desintegración beta el ^{234}U de periodo muy largo (2.45×10^5 años). Después de una desintegración alfa se obtiene el ^{230}Th de periodo de desintegración (8.00×10^4 años), el cual emite una partícula alfa transformándose en ^{226}Ra de vida media (1600 años) luego decae en ^{222}Rn con periodo de vida media (3.824 días). Sus descendientes de vida media corta son: polonio ^{218}Po , plomo ^{214}Pb , bismuto ^{214}Bi y polonio ^{214}Po , hasta que después de varias desintegraciones alfa y beta se estabiliza en plomo ^{206}Pb (IAEA, 2010, p. 24).

1.2. Radón

El gas radón es muy radiactivo, cada isótopo de radón da lugar a una serie de productos radiactivos secundarios que conducen a un isótopo estable. Se considera que el radón-222 es la causa principal de daño al organismo, esto se debe a la alta transferencia lineal de energía (LET) asociada con las partículas alfa, en comparación con las partículas beta u otra radiación, y la mayor efectividad de las radiaciones de alta LET para inducir la alteración y la muerte celular (IAEA, 2010, p. 38). Se libera de las rocas y tierra puede movilizarse al aire y el agua subterránea y de superficie.

La progenie del radón son partículas sólidas que pueden ser atrapadas en la tierra o, en el aire cuando el radón se desintegra, pueden adherirse a partículas de polvo o a otras partículas y ser inhalados. La progenie del radón que se adhiere al polvo puede ser eliminada por filtros de aire (Zeeb et al., 2015: p.16).

Las características físico-químicas del gas radón 222 como densidad, punto de fusión, punto de ebullición, entalpía de solución se muestran a continuación en la Tabla (1-1), mientras las demás propiedades como tiempo de vida media, constante de decaimiento y actividad específica se muestran en la Tabla (2-1).

Tabla 1-1: Principales características físicas y químicas del isotopo radón-222

CARACTERISTICAS	VALOR
Punto de Ebullición	-62 °C
Punto de Fusión	-71 °C
Temperatura crítica	104.5 °C
Presión Crítica	62.4 atm
Entalpía de solución	
A 0°C	28.0 kJ mol ⁻¹
A 35°C	19.7 kJ mol ⁻¹
Densidad de gas a temperatura y presión estándar	9.73 g l ⁻¹
Densidad de fase líquida	0.005-0.006 g l ⁻¹
Selección transversal atómica	0.37nm
Viscosidad a 0°C	0.021 Pa.s
Tensión Superficial	2.9mN cm ⁻¹

Fuente: (Zeeb, Shannoun y OMS, 2015: p.14).

Tabla 2-1: Propiedades relevantes del isótopo radioactivo radón 222

Parámetros	Símbolo	Radón-222 (Actinon)
Vida Media	$t_{1/2}$	3.8232 (8) d
Constante de decaimiento	λ	2.098 $* 10^{-6} s^{-1}$
Energía media de retroceso en la formación	E_r	86 keV
Actividad Especifica	A_m	$5.69 * 10^{15} Bq g^{-1}$
Coefficiente de difusión en aire	D_a	$1 * 10^{-5} m^2 s^{-1}$
Energía Alfa	Q^α	5590.3 keV

Fuente: (Zeeb, Shannoun y OMS, 2015: p.18).

Al aire libre, el radón se diluye rápidamente, tiene concentraciones muy bajas y no suele representar ningún problema. La concentración media de radón al aire libre varía de $5 Bq m^{-3}$ a $15 Bq m^{-3}$. En cambio, en espacios cerrados, las concentraciones de radón son más elevadas, en especial en lugares como minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas, donde se registran los niveles más altos. En edificios (como viviendas, escuelas y oficinas), las concentraciones de radón varían de $<10 Bq m^{-3}$ hasta más de $10.000 Bq m^{-3}$ (OMS, 2016, p. 24).

1.2.1. Concentración de uranio 238 y fuentes de radón

El uranio-238 siguiendo un proceso en cadena pasa a formar plomo no sin antes crear 13 elementos entre los cuales encontramos el radio, precursor directo del radón. El radón al ser radioactivo da origen a otros elementos y al hablar de los peligros del radón deben ser considerados tanto la actividad del radón como de su progenie.

El radón debido su periodo de semidesintegración 3.8 días necesita continuamente ser formado a partir de otros elementos, El radón-222 al ser progenie del uranio-238 será más fácil encontrarlo en zonas donde abunde este elemento pesado, en todas las rocas y suelos de nuestro planeta podemos encontrar uranio en pequeñas proporciones ppm (partes por millón) (Quindós, 1995, p. 6).

Tabla 3-1: Concentración promedio de uranio-238 en varios tipos de roca

Tipo de Roca	U 238 (ppm)
Basálticas	1.0
Granitos	5.0
Arcilla	3.7
Arenas	0.5
Suelos	1.9

Fuente: (Quindós, 1995, p. 7).

Los materiales de construcción son en general la segunda fuente en importancia de radón *indoor*. La emisión de radón de los materiales de construcción depende no solo de la concentración de radio en los mismos, sino también de factores tales como la fracción de radón producido que es liberado del material, la porosidad del material, la preparación del material y el acabado de la superficie. Es frecuente encontrar en los materiales de construcción productos con un contenido de radio y torio de hasta 50 Bq kg^{-1} . También podemos encontrar ladrillos y hormigones con altas concentraciones de radiación natural (Arteaga y Lliguin, 2018: pp.13-14).

Por ejemplo algunos materiales utilizados en construcción son las tobas volcánicas, los granitos, en general las rocas ígneas. Cuando el contenido de radón de los materiales de construcción es alto, el mecanismo de difusión antes mencionado toma mayor importancia debido a su longitud de difusión por ejemplo para el hormigón la longitud de difusión es de 10 a 20 cm (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 1995, p. 4).

1.2.2. Mecanismos de transporte de radón

El primer mecanismo de transporte es la difusión y se da de zonas donde la concentración de radón es alta hacia donde la concentración de radón es menor. La ecuación de difusión de Fick nos proporciona la evolución de concentración de radón, la longitud de difusión representa la distancia típica que el radón puede recorrer dentro de un material antes de desintegrarse por lo tanto este mecanismo difusivo es importante cuando los materiales de construcción son fuente importante de radón en las casas (Arteaga y Lliguin, 2015: p. 25).

Existe un segundo mecanismo de transporte que se da cuando el suelo es la principal fuente de radón este mecanismo es la convección y se da por las diferencias de presión existente entre el gas del suelo y el interior de la casa. El viento, la calefacción, los sistemas extractores de aire son los responsables de crear una depresión y crear así un campo de presiones que favorece la llegada del radón del suelo. Por tal motivo el radón se ve arrastrado por movimientos convectivos de masas de gas a través de los poros y fisuras, no solo del suelo sino también de la estructura de la

vivienda, esto podría explicar niveles elevados de concentración de radón en ciertos lugares (Espinosa, 2018, p.23).

La permeabilidad de un medio nos relaciona la velocidad aparente de un fluido líquido o gas, así cuando se genera un gradiente de presiones entre el suelo y el interior de la vivienda el paso de aire que se produce será más relevante si la permeabilidad en suelo o materiales favorece una alta concentración de radón en interiores (Quindós, 1995, p. 10).

1.2.2.1. Difusión: El Movimiento Browniano

Este movimiento y su explicación tuvieron lugar en el siglo XX cuando Albert Einstein en 1905 a través de las bases teóricas y experimentales de la teoría atómica afirmó que una partícula macroscópica inmersa en el fluido seguirá el movimiento aleatorio descrito por Brown, además establecería las primeras implicaciones cuantitativas de la teoría cinética del movimiento Browniano. Einstein explicó este fenómeno por medio de la naturaleza atómica de los fluidos en donde decía que si los componentes básicos de un fluido (átomos y moléculas) tienen un movimiento aleatorio, entonces una partícula intrusa en este fluido colisionará con los componentes básicos sin dirección e intensidad establecida, esto explica el movimiento al azar de las moléculas sobre el medio de suspensión además del desencadenamiento de una marcha tridimensional al azar (Carpio, 2016, pp.15-16).

1.2.2.2. Velocidad de Difusión

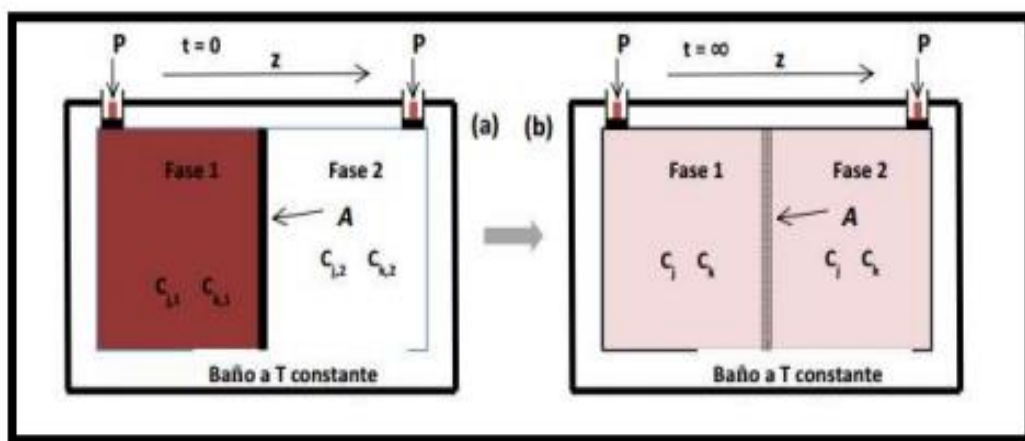


Figura 2-1: Fenómeno de difusión estado inicial y final

Fuente: (Carpio, 2016, p.17).

La forma en que se realiza el transporte de masa o átomos mediante difusión nos ayudamos con la primera ley de Fick. Se debe suponer que existen dos contenedores separados por un

impermeable. Cada uno de ellos posee concentraciones de 2 tipos de sustancias (j y k). Al retirar el elemento impermeable ambas concentraciones entran en contacto y el movimiento molecular crea un flujo llamado difusión. La velocidad a la que fluye viene dada por $J = -D \frac{\Delta C}{\Delta x}$ en donde J representa el flujo (átomos $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), D es el coeficiente de difusión (cm^2s^{-1}) y $\frac{\Delta C}{\Delta x}$ el gradiente de concentración (átomos $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$), este flujo está en función de magnitudes como presión, temperatura y tamaño de los átomos (Carpio, 2016, pp. 16-17).

La principal fuerza impulsora del flujo de gas radón es el gradiente de concentración. Cuando se coloca una fuente de agua rica en radón en un recipiente lo suficientemente grande, Existe la expectativa de que el radón se difunde de una concentración más alta a más baja. La teoría de la difusión está descrita por la Ley de difusión de Fick, y establece que el flujo de concentración es proporcional al gradiente de concentración en esa dirección como se formula en la siguiente ecuación:

Ecuación 3-1: Densidad de flujo efectiva

$$J = -D\nabla C$$

Fuente:(Carpio, 2016, p. 16).

Donde J es la densidad de flujo efectiva de la actividad del radón ($\text{Bq m}^2 \text{s}^{-1}$), D es el coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y C es la concentración de actividad del radón (Bq m^{-3}). Para un proceso de difusión normal, las partículas no pueden ser creadas o destruidas. Esto significa que el flujo de partículas en una región debe ser la suma del flujo de partículas que fluye desde las regiones circundantes. Matemáticamente descrita por la ecuación de continuidad:

Ecuación 4-1: Ecuación de continuidad

$$\partial C / \partial t + \nabla \cdot J = 0$$

Fuente: (Carpio, 2016, p. 17).

Donde el primer término representa el cambio de concentración con el tiempo, mientras que el segundo término representa el gradiente de flujo J. Al sustituir la ecuación (3-1) en la ecuación (4-1) se obtiene la ecuación de difusión siguiente

Ecuación 5-1: Ecuación de difusión

$$\partial C / \partial t = \nabla \cdot (D\nabla C)$$

Fuente: (Carpio, 2016, p. 17).

Si D no varía con la posición, que normalmente es el caso, la ecuación (5-1) se convierte en la segunda ley de Fick:

$$\partial C / \partial t = D \nabla^2 C$$

Fuente: (Carpio, 2016, p. 17).

Como la ecuación (6-1), no caracteriza la difusión del radón por completo; se requiere el término que describe el decaimiento del radón. La inclusión de este término conduce a la siguiente ecuación.

Ecuación 7-1: Ecuación de difusión de ²²²Rn

$$\partial C / \partial t = D (\partial^2 C / \partial X^2) - \lambda_{Rn} C$$

Fuente: (Carpio, 2016, p. 17).

Donde λ_{Rn} es la constante de desintegración del radón (Guapizaca, 2018, pp. 15-16).

1.2.2.3. Energía de activación para la difusión

La difusión es un mecanismo de transporte que necesita de una energía de fondo que permite el movimiento de átomos la energía que permite el movimiento o el cambio de posición se denomina energía de activación Q. La difusión intersticial requiere menor energía que la difusión por vacantes. Se tiene conocimiento que existen dos mecanismos de difusión de átomos la difusión por vacancia y difusión intersticial (Carpio, 2016, p. 18).

1.2.2.4. Difusión por vacancia

Se refiere al abandono de un átomo de su red para llenar una vacante cercana dando lugar a una vacante en la red de la cual se desprendió. A lo largo del tiempo se forma un flujo de vacancias en ambos sentidos, que aumenta al incrementarse la temperatura (Quindós, 1995, p. 18).

1.2.2.5. Difusión Intersticial

Cuando en el elemento está presente un átomo intersticial pasa a otro sitio intersticial sin necesidad de vacantes, ya que la cantidad de espacios intersticiales es mayor al número de vacancias siendo este método de transferencia mucho más rápido que la difusión por vacancia en el caso del radón el gas emplea este mecanismo de difusión a través de intersticios del material de construcción alcanza la superficie de separación y llega al aire que respiramos (Quindós, 1995, p. 18).

En resumen se puede decir que la difusión es el movimiento, o migración de átomos desde zonas

donde concentración es alta hasta donde la concentración es baja, el radón se mueve con respecto al medio realizando un movimiento molecular espontaneo y al azar, el radón al ser un gas noble migra por medio de la difusión. La difusión de radón no depende solamente de la procedencia del material y la radioactividad que posee, factores como el tamaño y forma de soluto, viscosidad del aire en interiores, porosidad de los materiales y la temperatura determinaran la facilidad de difusión del radón (Yousef et al., 2015, p. 4).

1.2.3. Emanación

Los átomos de ^{222}Rn que son generados por la desintegración de ^{226}Ra contenido en los granos minerales del medio consiguen alcanzar el espacio intersticial entre granos, principalmente por la energía de retroceso con que salen despedidos, logrando escapar de la matriz solida del material dando lugar al fenómeno conocido como emanación. Siempre y cuando la desintegración de radio suceda cerca de la superficie del material, siendo las distancias de retroceso habituales para el ^{222}Rn entre 20-70 nm para minerales comunes y 63 μm en aire.

Cuando se genera el radón, el átomo lleva una energía cinética de 86 keV. La fracción de átomos de radón que llegan a los poros se denomina coeficiente de emanación, que depende de la distribución del tamaño de grano, la porosidad y la humedad, entre otros. El contenido de humedad tiene un impacto importante en el coeficiente de emanación, incrementándose directamente con el contenido de agua (UNSCEAR, 2006^a: p. 118).

Después de la emanación los átomos de ^{222}Rn en el espacio intersticial pueden ser transportados a la superficie por difusión, luego el ^{222}Rn puede ser liberado de la superficie a la atmosfera, este mecanismo se conoce como exhalación de radón y puede tener lugar en el suelo, muros y en materiales de construcción denominaremos entonces a la exhalación como la cantidad de gas que escapa hacia el ambiente exterior (Fuente L, 2016, p. 7).

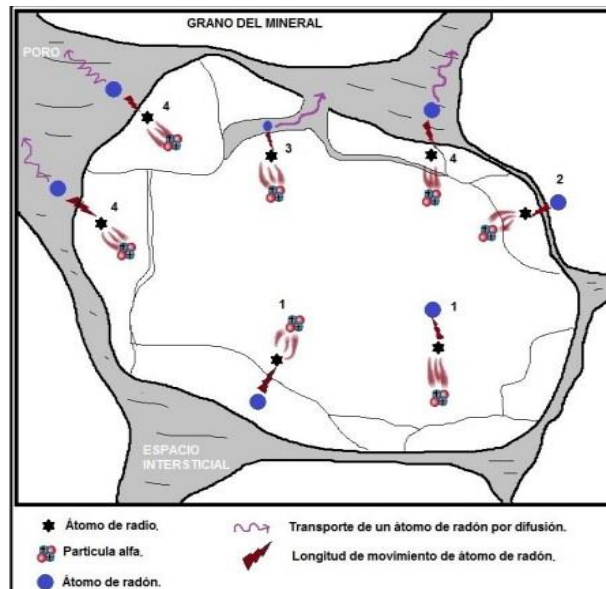


Figura 3-1: Fenómeno de emanación de radón-222

Fuente:(Rodríguez, 2013, p. 31).

Una vez formado el radón-222 se difunde a través de los intersticios del suelo o poros del material de construcción por tanto existe un flujo de átomos de radón hacia el entorno.

Los factores que influyen dicho flujo son:

- Concentración de radio en las rocas
- La fracción de emanación de radón concedida por la roca
- El diferencial de presión atmosférica del interfaz material-aire

1.3. Mediciones de radón

1.3.1. Tasa de exhalación E

El riesgo de cáncer de pulmón en exposición *indoor* producida por el radón y su progenie puede ser calculado directamente a partir de la dosis efectiva anual, que se estima a partir de la tasa de exhalación de radón de las muestras de material de construcción (Saad et al., 2014: p. 2).

Una determinada muestra de material pétreo colocado en un entorno ambiental adecuado, temperatura, presión atmosférica, humedad, fondo natural (*Background*) etc. La tasa de exhalación específica de la muestra E, al ser la cantidad neta de radón que escapa de la muestra por unidad de tiempo. La cantidad de radón que escapa del granulo por unidad de tiempo se expresa como la cantidad de átomos de radón que escapa por segundo (átomos s^{-1}), o como la cantidad de actividad de radón medida en Bq que escapa por hora (Bq h^{-1}) (Espinosa, 2018, p.16).

1.3.2. Radón en ambientes cerrados

Es fácil deducir que los niveles de radón sean altos en lugares donde la concentración de uranio sea alta en el sitio, fue precisamente en las minas de uranio donde se reconoció el riesgo potencial de la inhalación de la progenie del radón, sin embargo las altas concentraciones de radón no están solo confinadas a la actividad minera, puede haber altas concentraciones de radón en el aire.

La acumulación de radón y su progenie en casas fueron observadas por primera vez en colorado, en 1971, fue atribuido al uso de restos de uranio para el relleno de terrenos. Pero el incremento de la progenie de radón en lugares pobremente ventilados llamo la atención y se concluyó que en estos lugares aislados se concentran una cantidad mayor de radón por tanto constituyen una aportación de dosis mayor a la población expuesta (Espinosa, 2018, p.8).

El radón en ambientes cerrados puede ser causado por varias razones como: el suelo situado bajo la casa, los materiales de construcción usados, el agua en situaciones muy especiales debido a ser un excelente medio de transporte de radón por el subsuelo. La desintegración del radio en las rocas o material de construcción provoca que parte del radón abandone el medio sólido y se sitúe en los poros del material a este proceso lo denominaremos emanación, una vez en los poros no reaccionara con ningún otro elemento y estará listo para su transporte a través de dichos poros hasta alcanzar la superficie del suelo o material en cuestión (Quindós, 1995, p. 8).

1.3.3. Riesgo radiobiológico

La relación entre la radiación y la naturaleza genera ciertos efectos que suceden dentro de los organismos vivos. Las emanaciones de ^{222}Rn se liberan en el aire debido que al ser gases nobles migran por difusión y convección sin interaccionar con los elementos del aire. Los productos del radón-222 son producidos como átomos libres los cuales son temporalmente iones positivos por la pérdida de electrones durante el decaimiento, debido a esto las partículas quedan asociadas electrostáticamente a las partículas de polvo, si son inhalados se pueden depositar en diferentes regiones del tracto respiratorio desde donde pueden ser desalojados por acción ciliar o llegar hasta la región alveolar, conforme decaen los radionúclidos hijos del radón, emiten partículas alfa las cuales imparten una dosis en la región del pulmón donde se alojaron. La exposición a la progenie del radón es obviamente función de la concentración de estas partículas en el aire así que su peligrosidad depende del lugar en donde se alojó (Espinosa, 2018, p.36).

Los efectos de la radiación observados pueden ser clasificados en dos categorías: estocásticos y deterministas.

Los efectos deterministas tienen las siguientes características:

- 1) Se debe exceder una cantidad determinada de dosis para que sea observado
- 2) La magnitud del efecto se incrementa con la cantidad de dosis recibida

3) Hay una relación clara entre la dosis y el efecto observado

Los efectos estocásticos como su nombre lo indica son aquellos que se dan probabilísticamente; estos se dan en individuos expuestos y no expuestos, por tanto, los efectos estocásticos no son directamente relacionados a la exposición.

El efecto de la exposición a un agente ionizante es un incremento en la probabilidad de ocurrencia del efecto la cual es proporcional a la dosis.

Los efectos de la sobreexposición son la secuela de una serie larga y compleja de eventos que son iniciados por excitación y ionización de moléculas en el organismo, los efectos directos de la radiación, ionización y excitación son no específicos y pueden ocurrir en cualquier parte del cuerpo, cuando el átomo afectado directamente está en una molécula de proteína o ácido nucleico entonces ciertos efectos específicos pueden ocurrir debido al daño en las moléculas, resultado de la absorción de energía que va a producir radicales libres altamente reactivos químicamente tóxicos que dañan la célula indirectamente. El riesgo de daño biológico dependerá de ciertos factores como y la intensidad de radiación, la transferencia de energía lineal LET, la superficie irradiada o dosis de radiación, como también el tiempo en el que está expuesta la persona, la dosis que un ser humano recibe como promedio, originario de fuentes naturales es de 2.4 mSv y^{-1} . Esta cantidad se estima que se distribuye en un 50% de dosis procedentes del radón. El riesgo de cáncer de pulmón se ha estudiado en trabajadores de minas subterráneas expuestas al gas radón; nos da una idea de que tan probable es que las personas en general también pueden tener esta enfermedad debido a la exposición prolongada en ambientes interiores (CSN, 2012, p.9).

1.3.3.1. Deposición de energía

La radiación ionizante es capaz de depositar suficiente energía para desprender electrones de los átomos, esta radiación colisiona al azar dando lugar a iones y radicales libres que provocan daño celular.

1.3.3.2. Efectos sobre el ADN

El ADN es el punto más sensible de la célula debido a que lleva mucha información genética y su transcripción correcta juega un papel fundamental en la funcionalidad de la célula. Al ser dañado una célula normalmente repara el daño, no obstante al interaccionar con la radiación sufre mayor daño que al ser mal reparado o no reparado puede manifestarse en forma de mutaciones en los genes, cuya frecuencia puede ser función lineal de la dosis depositada. Las lesiones producidas por la radiación en los genes pueden causar cambios en el número y estructura de los cromosomas mostrando mutaciones en personas expuestas a ciertas dosis (BEIR VI, 1999, pp. 49-51).

1.3.3.3. Efecto sobre los tejidos

Las células maduras que se dividen normalmente dentro de un tejido son radiosensibles, por lo que la radiación puede matar a un número suficiente de células logrando atrofiar el tejido. La rapidez de esta atrofia depende de la dinámica poblacional celular dentro del tejido afectado por ejemplo un proceso es mucho más lento, en el hígado que es un órgano de recambio celular lento pero afectara más, a la médula ósea o epidermis que son órganos caracterizados por su recambio celular rápido (BEIR VI, 1999, pp. 49).

1.3.3.4. Efectos Prenatales

La radiosensibilidad es relativamente alta en toda la vida prenatal pero los efectos de una dosis determinada varían de manera notable y dependen de la fase evolutiva del embrión o feto en el momento de exposición (BEIR VI, 1999, pp. 51).

El comité científico de las naciones unidas sobre los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR), el gas radón está presente en la mitad del promedio mundial de exposición del ser humano a fuentes naturales de radiación, esto dependerá también de su ubicación geográfica (UNSCEAR, 2006, p. 9).

En EEUU la EPA (Environmental Protection Agency) recomienda que en hogares y edificios los niveles de concentración de radón sean menores a 148 Bq m^{-3} . Actualmente ya se puede reducir fácilmente los niveles de radón en una vivienda o edificio. Además del cáncer de pulmón las personas expuestas al radón pueden tener otro tipo de enfermedades, debido a sus productos de desintegración, al ser una radiación ionizante; y si una parte del organismo es la que recibe mayor dosis es la que se verá más afectada por ejemplo el tejido bronquial, vías extraoráxicas y piel. Estudios previos reflejan resultados en donde se muestra que el cáncer de pulmón dependía del sexo, edad y consumo de tabaco de los individuos, con datos solidos que indican que el riesgo es alto incluso por debajo de los niveles de referencia por lo que se recomienda tomar las respectivas medidas en los demás países (Aicardi et al., 2015: p. 20).

1.4. Dosimetría

Debido a la interacción radiación materia sabemos que la radiación penetra el material y deposita en toda o parte de su energía inicial para lograr determinar los efectos biológicos producidos por radiación se ha tenido que cuantificar la cantidad de dosis recibida. La dosis es la energía depositada en una unidad de masa, para el propósito de radio protección las cantidades de dosis se expresan de 3 formas: Absorbida, Equivalente, Efectiva (Carpio, 2016, p.36).

Las primeras observaciones de radón como agente precursor de cáncer de pulmón fueron en trabajadores de minas de uranio en Europa, esto afirmaba la relación entre la exhalación de radón y el desarrollo de cánceres del aparato respiratorio (Greenberg y Selikoff; 1993: p. 22).

1.4.1. Límites y niveles de exposición de Radón

La UNSCEAR 2006 en base a estudios, establece un valor anual permisible de 1.15 mSv el límite de dosis efectiva por exposición a fuentes de radón-222. Se fija 1 mSv por año el límite de la dosis efectiva para la exposición poblacional.

Se establece niveles de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados en lugares de trabajo, el nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad no debe superar los 300 Bq m^{-3} (Darby, 2005, p.3).

La Directiva de 2013/59/EUROATOM del consejo de 5 de Diciembre de 2013 establece normas de seguridad básica, ante cualquier situación de exposición a radiaciones ionizantes que no pueda despreciarse desde el punto de vista de la protección radiológica o en relación con el medio ambiente a fin de proteger la salud humana a largo plazo. La directiva menciona aplicar en uno de sus puntos, en particular a:

La exposición de sujetos de la población al radón en ambientes cerrados procedentes principalmente de los materiales de construcción.

En 1990 la comisión de comunidad europea basándose en un informe representativo en 1987 por un grupo de trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), recomienda limitar la concentración media anual de gas radón a 400 Bq m^{-3} en construcciones antiguas y menor a 200 Bq m^{-3} en las nuevas construcciones (Yousef et al., 2015: p.32).

1.4.2. Dosis límite permitida para personas ocupacionalmente expuestas a la radiación en Ecuador

El registro oficial 891 del gobierno del Ecuador data del año 1979 habla sobre la protección contra la radiación, en donde se establece un límite de irradiación interna para personas que por su situación ocupacional se encuentran expuestas a este tipo de energía:

Tabla 4-1: Límites de dosis efectiva para radiaciones ionizantes en Ecuador

Órgano	Dosis máxima permitida
Cuerpo entero, gónadas, medula ósea	5 rem año^{-1} - $3 \text{ rem trimestre}^{-1}$

Hueso, piel de todo el cuerpo, tiroides	30 rem año ⁻¹ – 15 rem trimestre ⁻¹
Manos, antebrazos, pies, tobillos	75 rem año ⁻¹ – 40 rem trimestre ⁻¹
Todos los otros órganos	15 rem año ⁻¹ – 8 rem trimestre ⁻¹

Fuente: (Consejo Supremo de Gobierno Ecuador, 1979, p. 5).

Es importante recalcar que Ecuador no dispone de un documento que regule o ejerza el control, monitoreo y buen uso de las radiaciones ionizantes que aseguren al público no estar expuestas a este tipo de radiación. La legislación que rige al Ecuador es un extracto de las recomendaciones internacionales dadas por el organismo Internacional de Energía Atómica y la comisión Internacional de Protección Radiológica de Biología y Medicina Nuclear y Ciencia Afines. Además, a pesar de que se haya demostrado que el radón sea el segundo agente responsable de muertes por cáncer de pulmón por debajo del tabaquismo debido a las radiaciones ionizantes que producen (OMS, 2016, p.31), y que los materiales de construcción aportan con un 20% de la concentración total de radón en domicilios. No existe una normativa vigente que se base en la relación de cáncer de pulmón por inhalación de radón y que proteja a las personas que estén relacionadas a la fabricación o manipulación de materiales de construcción (Carpio, 2016, p. 41).

1.4.3. Unidades de radiación

Tabla 5-1: Medidas Radiométricas, unidades SI y conversiones usadas generalmente

	Definición	Unidades SI	Conversión
Exposición X	$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m_{air}}$	2.58*10 ⁻⁴ C kg ⁻¹ air	1R=2.58*10 ⁻⁴ C kg ⁻¹ air
Dosis D	$D = \frac{\Delta E_{ab}}{\Delta m}$	1Gy=1 $\frac{J}{kg}$	1Gy=100 rad
Dosis Equivalente H	H= D _{WR}	1 Sv	1Sv = 100 rem
Actividad A	A= λ N	1 Bq= 1 s ⁻¹	1Bq= $\frac{1 Ci}{3.7 \times 10^{10}}$

Fuente: (Podgorsak, 2004, p. 7).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

Para cuantificar o medir la radiación se emplea diversas aplicaciones entre las cuales tenemos: actividad de la fuente, exposición, dosis absorbida y dosis biológicamente equivalente.

La actividad de la fuente: es la tasa de decaimiento de un material radioactivo, es decir el número de núcleos que disminuyen del elemento original, su unidad física es el Curie (Ci) 1 Ci=3.7x10¹⁰

desintegraciones por segundo. También tenemos el Bequerel (Bq) que cuantifica las desintegraciones por segundo (Podgorsak, 2003, p.18)

La exposición: Indica la cantidad de radiación que llega a un material, depende plenamente de las características del haz de radiación.

Dosis absorbida: El material absorbe energía proveniente del radiactivo, depende únicamente de las propiedades del material. Su unidad física es el gray 1gray (gy)=1Jkg⁻¹

Dosis equivalente: la existencia de daños biológicos están en función de la dosis incidente, la dosis equivalente es el producto entre la dosis absorbida y el factor de ponderación de la radiación.

La dosis equivalente es un indicador primario de protección radiológica su Unidad es el Sievert (Sv).

Tabla 6-1: Factores de ponderación según el tipo de radiación ionizante

Tipo de Radiación	Factor de ponderación de la radiación W_R
Fotones	1
Electrones y Muones	1
Protones y Piones Cargados	2
Partículas alfa, Fragmentos de fisión, Iones pesados	20
Neutrón (5MeV)	11

Fuente: (Castillo, 2016, pp. 26-27).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

El radón inhalado, al ser un gas noble, está constantemente presente en el volumen de aire de los pulmones y se disuelve parcialmente en los tejidos blandos. (La Verde et al., 2020: p. 6).

Dosis efectiva: los efectos en un determinado órgano o tejido no solo dependen de la dosis equivalente sino también de la radiosensibilidad del órgano irradiado. Por tal razón la ICRP ha propuesto un factor de peso W_T a cada órgano (Castillo, 2016, p. 27). La dosis equivalente efectiva, E_p es la suma ponderada de la dosis equivalente H, limitada a ciertos órganos y tejidos. La unidad utilizada también para la dosis efectiva es el Sievert Sv.

Tabla 7-1: Factores de Ponderación para la radiosensibilidad de cada tipo de tejido

Tejido	W_T	$\sum W_T$
Medula ósea, Pulmón, Estómago, Mama, Resto de tejidos	0.12	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, Esófago, Hígado, Tiroides	0.04	0.16
Superficie del Hueso, Cerebro,	0.01	0.04

Glándulas salivales, piel		
	Total	1

Fuente:(Castillo, 2016, p.28).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

1.5. Clasificación de las rocas volcánicas

Existen diferentes criterios de clasificación para las rocas volcánicas, debido a esto una misma roca puede recibir diferentes nombres en base a su criterio de clasificación. Los criterios más utilizados en la práctica son:

- Las relaciones de campo
- La mineralogía
- La composición química
- La textura

1.5.1. Clasificación basada en las relaciones de campo

En función de la localización del magma se reconocen tres categorías para las rocas solidificadas: aquellas que provienen de magmas emplazados encima de la superficie de la tierra (Volcánicas o Extrusivas), las que se forman dentro de la corteza (Intrusivas Hipasibales o Hipoabisales o subvolcánicas), y que se localizan de la corteza profunda (Intrusiva Plutónica). (Conde, 2013, p. 39). Los flujos de lava y los depósitos fragmentarios forman las rocas volcánicas o extrusivas. Generalmente presentan texturas afaníticas y vítreas, muchas son porfídicas y algunas volcanoclasticas. Anfíboles y biotita, especialmente cuando aparecen como fenocristales, suelen alterarse parcialmente a finas partículas de agregados de anhídros de Fe, piroxenos, y feldespatos. Las rocas intrusivas o plutónicas se forman, a partir de un enfriamiento lento y en profundidad, del magma. Este enfriamiento lento permite el crecimiento de grandes cristales de minerales puros, de ahí que tengan, típicamente textura fanerítica (Conde, 2013, pp. 39-40).

1.5.2. Clasificación basada en la mineralogía de las rocas volcánicas

Un magma al enfriarse cristaliza formándose diferentes minerales. Los minerales presentes en las rocas volcánicas son:

1.5.2.1. *Cuarzo*: Mineral formado por dióxido de sílice, está presente en rocas intermedias y ácidas. La cantidad total de sílice en una roca no está reflejada necesariamente en la cantidad de

cuarzo presente; rocas con contenidos de cuarzo tan diferentes como 0 y 35% pueden tener la misma cantidad de sílice.

1.5.2.2. Feldespatos

Silicatos de aluminio y calcio, sodio o potasio; son un grupo importante. Las plagioclasas son los feldespatos cuya composición varía entre dos miembros: la albita, feldespato sódico y anortita, feldespato cálcico. La oligoclasa y la andesita son comunes en lavas intermedias, la labradorita es común en basaltos. Los feldespatos potásicos incluyen la ortoclasa y la microclina. La variedad de ortoclasa llamada sanidina es el feldespato potásico más frecuente en las rocas volcánicas

1.5.2.3. Feldespatoides

Con respecto a los feldespatos, tienen menos sílice en su estructura. Las rocas ácidas no contienen feldespatoides. La nefelina es el feldespatoide sódico, y la leucita es el potásico.

1.5.2.4. Micas

El grupo de minerales de la mica presentes en este tipo de rocas también son silicatos de aluminio. Los dos minerales principales en el grupo de la mica son la moscovita (no volcánica), la cual es rica en potasio, la biotita que contiene magnesio y hierro así como también potasio en su estructura cristalina.

1.5.2.5. Minerales ferromagnesianos

Incluyen biotita, piroxenas, anfíboles y olivino. En cuanto a los piroxenos, la augita es la más común, aunque también son bastantes comunes la enstatita e hiperstena. El olivino tiene menos sílice que los piroxenos o anfíboles, y solo aparecen en rocas básicas y ultrabásicas. La magnetita (Fe_3O_4), que es un mineral opaco se encuentra en pequeñas concentraciones en las rocas volcánicas (Conde, 2013, p. 41).

Existen varios términos muy útiles para una aproximación sobre la composición mineralógica de las rocas volcánicas:

Félsica: es un término que deriva de la palabra feldespato y sílice y hace referencia a aquellas rocas que contienen grandes proporciones de feldespatos con o sin cuarzos y sus polimorfos (tridimita y cristobalita).

Máfica: Se deriva de las palabras magnesio y ferroso/férrico. Se refiere a la mayoría de las rocas formadas por biotita, anfíboles, piroxenos, olivino, y óxidos de Fe-Ti, así como también a rocas que contienen grandes proporciones de ellos como los basaltos.

Ultramáfica: Para rocas ricas en Mg y Fe. Estas rocas, generalmente, tienen pequeña o ninguna cantidad de feldespatos (Conde, 2013, p. 42).

1.5.3. Clasificación basada en la composición química

Existen diversas clasificaciones en base a la composición química de la roca.

Concentración Absoluta de Sílice:

Los magmas y lavas tienen una composición química variable; la variación más importante está en la cantidad de sílice que presentan, y en función de su contenido se pueden diferenciar cuatro tipos de rocas:

>66% SiO_2 Rocas Ácidas.

52% < SiO_2 < 66% Rocas Intermedias.

45% < SiO_2 < 52% Rocas Básicas.

<45% SiO_2 Roca Ultrabásicas.

1.5.3.1. Saturación en Sílice

Según el contenido de minerales normativos las rocas se dividen en:

Rocas Sobresaturadas: Contienen cuarzo o sus polimorfos (cristobalita y tridimita).

Rocas Saturadas: Contienen hiperstena, pero no cuarzo, feldespatoides u olivino.

Rocas Sub-saturadas: Rocas que contienen olivino y posiblemente nefelina.

1.5.3.2. Saturación de Aluminio

El Al_2O_3 es el segundo constituyente más abundante en la mayoría de las rocas magmáticas, especialmente en las rocas félsicas. Según su índice de saturación las rocas se clasifican en peraluminicas, metalaluminicas y peralcalinas (Conde, 2013: p. 48).

1.5.4. Clasificación en base a la textura

En base a su textura las rocas volcánicas pueden ser clasificadas en dos grupos: rocas magmáticas y rocas volcanoclásticas.

1.5.4.1. Rocas magmáticas

Están definidas esencialmente por procesos que dependen del intervalo de tiempo durante el cual el magma está en proceso de solidificación debido a la pérdida de calor por enfriamiento.

Existen cuatro tipos de texturas que pueden aparecer en las rocas magmáticas; dichas texturas están determinadas por las condiciones de cristalización.

Fanerítica: es un término aplicado a rocas cuyo tamaño de los cristales son lo suficientemente grandes como para ser identificados a simple vista. Esta textura es típica de las rocas cristalizadas en una intrusión magmática cuyo enfriamiento ha sido lento.

Afanítica: son rocas con un tamaño de cristal que solo pueden diferenciarse mediante el microscopio. La textura afanítica es más común en magmas extrusivos solidificados rápidamente, pero también se puede encontrar en partes marginales del magma intrusivo emplazado en la corteza superficial fría.

Porfíricas: rocas en las cuales algunos minerales se presentan en forma de grandes cristales embebidos en un conjunto de elementos de menor tamaño, que puede ser incluso de naturaleza vítrea.

Vítrea: designa rocas que contienen proporciones variables de vidrio en contraste con rocas holocristalinas constituidas enteramente de cristales.

1.5.4.2. Rocas volcanoclasticas

La textura de las rocas volcanoclasticas se produce por cualquier proceso de fragmentación que da lugar a fragmentos de rocas y/o minerales. La clasificación de las volcanoclasticas o clastos sedimentarios se basa en el tamaño de las partículas.

En caso de actividad volcánica de forma explosiva el magma enfriado se fragmenta y se expulsa y reparte en forma de material suelto. El material expulsado, fragmentado y distribuido por el viento, no compactado se denomina tefra independientemente de la composición y tamaño de los granos. Los diferentes fragmentos sueltos o compactados son llamados piroclastos.

Las erupciones tienen origen rocas solidificadas o magma solidificado cae en el magma viscoso en ebullición. Otra causa para las explosiones es el ingreso de agua en un cuerpo de magma viscoso, por la temperatura muy elevada el agua se convierte en vapor aumentando su volumen apreciadamente, las rocas adyacentes se fragmentan debido a la energía generada por la expansión de gas y se produce una explosión del material.

El material piroclástico está expuesto a tres distintos procesos de transporte y deposición: caer desde una nube de ceniza en zonas altas de la atmósfera, flotar en el aire o fluir en una avalancha de magma. La tefra de tamaño de lapilli y ceniza es expulsada hacia las alturas de la atmósfera y

transportadas en estas alturas a distancias muy largas gracias a las corrientes de aire de la nube eruptiva para posteriormente caer a la superficie debido a la gravedad (Griem, 2020, p.1).

Rocas Ígneas.

Son rocas piroclásticas, originadas por la cristalización de los materiales arrojados durante una erupción volcánica. Sus propiedades útiles en ingeniería dependen de su solidificación y por este motivo tienen una gran variedad en resistencias y permeabilidad. Una desventaja es su fácil desintegración cuando se secan y humedecen. Las tobas, andesitas y basaltos son estructuras geológicas que destacan en la región, según las variaciones geográficas y el volumen de uranio contenido en ellos dependerá la cantidad de gas radón (Chicaiza N, 2020, p.38).

Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la sedimentación y cementación de arcilla, arena, grava. El tamaño de sus partículas y estratificación determinan la estabilidad de las rocas. Areniscas, cuarcitas, lupitas, cangahua, ignimbritas son estructuras geológicas que permiten obtener agregados pétreos como materiales de construcción, la emanación de gas radón en rocas sedimentarias es menor a la producida en rocas extrusivas por los procesos físicos-químicos que sufren para ser materiales consolidados (Chicaiza N, 2020, p. 38).

1.5.5. Depósitos de corrientes piroclásticas

Una corriente piroclástica o de ceniza o una avalancha ardiente es una mezcla móvil y muy caliente de gas y tefra, que se mueve a lo largo de la superficie terrestre alejándose del centro de erupción y manteniendo su aspecto de corriente. Los depósitos de este tipo son las ignimbritas.

Las rocas volcanoclasticas y piroclásticas ocupan una posición intermedia entre las rocas magmáticas y las rocas sedimentarias. Por los procesos de erosión las cenizas y las tobas pueden ser transportadas y aglomeradas como material pelítico formando las tufitas o sedimentos tufíticos. Las tufitas son rocas piroclásticas con una adición de hasta el 50% de detritos normales, por encima de este porcentaje se habla de sedimento tufítico (Griem, 2020: p.2).

Los clastos volcánicos pueden ser cementados por minerales precipitados secundariamente como en las rocas sedimentarias o si están calientes todavía pueden ser soldados con fragmentos vítreos diminutos. La clasificación de los clastos solidificados se basa en el tamaño de los clastos las tobas compuestas solo de ceniza son muy comunes. Las rocas piroclásticas constituidas solo de lapilli o solo de bloques son muy raras, puesto que están en el intersticio entre lapillis o los bloques. Más comunes son las mezclas consolidadas de lapillis y ceniza (Toba de Lapilli) y de bloques y ceniza (Brecha volcánica Tobácea). A veces se emplea el término aglomerado para este tipo de depósitos (Griem, 2020, p.2).

1.6. Toba o Tufo volcánico

La toba volcánica o tufo volcánico es una roca compuesta principalmente por vidrio volcánico proveniente de la acumulación de cenizas volcánicas u otros elementos volcánicos muy pequeños expelidos por los respiraderos en una erupción volcánica. Es un tipo de roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, se forma principalmente por la deposición de cenizas y lapilli durante una erupción (Villela, 2013, p.2).

Al ser el producto de violentas erupciones volcánicas la toba se sedimenta junto con otros materiales como la piedra pómez y flujos piroclásticos que en ciertas regiones se pueden distinguir claramente en capas de material volcánico de distinta granulometría, con una densidad que oscila entre 1100- 1800 Kg/m^3 se produce una formación rocosa llamada toba volcánica. Estas formaciones son consideradas rocas ígneas y se caracterizan por su consistencia porosa y liviana. La toba volcánica cuyo principal uso es en la industria de la construcción, es posible encontrarla en las áreas con presencia de volcanes, en distintas regiones del mundo. La composición de estas rocas puede variar de acuerdo a los minerales que intervienen en su formación. Su color varía desde el amarillento hasta el parduzco. Si bien es una roca blanda, se endurece y se vuelve inalterable bajo la acción de agentes atmosféricos (Tupa, 2018, p.17).



Figura 4-1: Morfología de una Toba volcánica

Fuente: (UGR toba-volcanica, 2013, p. 1).

Su utilización en construcciones naturales como paredes y muros, es muy apreciada por su fácil aserrado y excelente termicidad. Por su fácil labrado es muy utilizada en decoración y ornamentación. También se usa como agregado liviano se la utiliza en la fabricación de aglomerantes (Villela, 2013, p.2).

En el Ecuador podemos constatar el uso de este tipo de material volcánico en zonas rurales de la serranía y oriente debido a su fácil accesibilidad y su bajo costo al encontrarnos en un entorno

altamente volcánico, es usada desde hace décadas en la construcción de iglesias, Parte de la toba es usada en forma de aglomerante para hacer bloques, paredes y cerramientos.

La toba es una roca ígnea extrusiva que generalmente puede contener fragmentos de tamaño de polvo a partículas del tamaño de una roca y puede estar compuesta de muchos tipos diferentes de materiales, los productos de una erupción volcánica explosiva se depositan en el suelo, poco a poco se van compactando y soldando hasta formar la roca. Los componentes de toba son más gruesos cerca del volcán de origen y disminuyen en tamaño cuando caen a más distancia.

Composición Mineral

Su composición al provenir de erupciones volcánicas explosivas está asociada a magmas ácidos por tal razón puede estar formado de biotita, plagioclasas, cuarzo, feldespatos potásicos y moscovita (Maldonado, 2021, p.1).

Composición Química

Su composición química está compuesta en alto porcentaje de sílice (SiO₂) debido a que su matriz está compuesta de vidrio volcánico alrededor de 55%.

Colores y variedades

Debido a su variedad de composición podemos encontrar tobas de muchas tonalidades desde verdosas, amarillentas, color crema, rojizas y café oscuro todo dependerá de su composición mineral, litológica y de su formación.

Textura y estructura

Es fácil reconocer la toba por su textura piroclástica, también puede presentar una textura de laminación, debido a que se forma por la caída de ceniza volcánica en diferentes intervalos de tiempo. A diferencia de la pumita la toba no presenta vesículas.

Finalmente, en el campo de la geología se usa el termino toba soldada a aquella que tiene textura piroclástica y una matriz muy dura (Maldonado, 2021, p.1).

Tabla 8-1: Denominación y clasificación de material piroclástico según su tamaño

Clasificación de Rocas piroclásticas		
Tamaño de fragmentos	Tefra (Sin compactación)	Piroclásticas (compactadas)
> 64 mm	Bombas	Piroclásticas
2-64 mm	lapilli	Toba de lapilli
< 2 mm	Cenizas	Toba de ceniza, Ignimbritas

Fuente: (Griem, 2020, p.2).

Realizado por: Pinduisaca, Maximo. 2022.

1.6.1. Tipos de fragmentos tobaceos

Las tobas volcánicas se clasifican por su contenido característico:

Toba lítica: Contiene trozos de roca como piroclastos

Toba Vítreo: contiene alta cantidad de material vítreo como obsidiana

Toba Cristalina: se caracteriza por la existencia de cristales visibles.

Ignimbrita: es una toba con partículas soldadas entre sí.

Es muy frecuente que los cristales o las partículas se encuentran juntos soldados entre sí. Este tipo de toba no tiene partículas sueltas, los componentes están soldados entre sí. Se puede denominarlas brechas tufíticas de material volcánico de todos los tamaños de grano (ceniza, lapilli, bloques).

Las ignimbritas son de distribución irregular de tamaño de granos y porosas.

Liparitas: son ignimbritas o tobas con mayor de 30% de cavernidades. Si una toba o Ignimbrita muestra una cavernidad mayor de 30% se denomina liparita (Griem, 2020, p.2).

1.6.2. Radioactividad en Toba

En estudios realizados en Italia, se encontró que las piedras de origen magmático (como granitos, pórfidos y tobas volcánicas) son las fuentes más importantes de emanación de radón. Sin embargo, los niveles de tasa de exhalación de radón de muestras de rocas magmáticas mostraron una amplia dispersión, con valores dispersos en dos órdenes de magnitud. En estas muestras, la tasa de exhalación varió desde menos del límite de detección hasta $0,25 \text{ Bq kg}^{-1}$ con un promedio de $0,029 \text{ Bq kg}^{-1}$ (Righi y Bruzzi, 2006: p.10).

En general en las rocas muy compactas implica que la porosidad es pequeña, lo que implica que los átomos de radón encontrarán dificultades en ser transportados, y por tanto la exhalación de radón a la atmósfera será menor sin embargo si hablamos de rocas fracturadas, aunque sean compactas serán una vía de escape de radón hacia el ambiente (García, 2013, p. 16).

En la mayoría de países se considera que los materiales de construcción en general son una fuente pequeña de radón 15-20% en comparación con el terreno. Sin embargo existen excepciones como en Italia (Righi y Bruzzi, 2006: p. 2). y Hong Kong (Tung et al., 2013: p.3)., en donde encontramos materiales de construcción que aportan el 70% de radón existente en ambientes interiores. En general el motivo de esta discrepancia es que los materiales que se utilizan para la construcción en estos países proceden mayoritariamente de rocas o terrenos que son fuentes de radón, como el granito que se utiliza en Hong Kong o la toba volcánica y puzolana que se utiliza en algunas zonas del centro de Italia (Linares, 2015, p.29).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Área de Estudio

El área de estudio de esta investigación es la región interandina del Ecuador, en particular las provincias de Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y Pichincha. Las muestras de tufo volcánico fueron recolectadas en la cantera “Flores” de la parroquia Panzaleo-Cotopaxi, en la Cantera Piedra Blanca la parroquia San Juan-Chimborazo, en la cantera “El salvador” en la parroquia Pilahuin-Tungurahua, en la cantera “San Joaquín” en la parroquia del Chaski-Cotopaxi y la cantera “Pérez” en la parroquia Pomasqui-Pichincha.

En el Anexo A se presenta una breve descripción de las canteras que fueron monitoreadas. La Figura (1-2) muestra la ubicación de los puntos de muestreo (canteras).



Figura 1-2: Ubicación geográfica de las canteras donde se recolectaron las muestras de tufo volcánico

Fuente: (Google Earth Pro, 2021).

2.2. Características geológicas y geográficas de los puntos de muestreo

En esta sección se presenta información de los volcanes cercanos a las canteras, de donde probablemente provienen las muestras de tufo analizadas.

2.2.1. Volcán Chimborazo

El volcán Chimborazo se encuentra a 8 Km de la Cantera Piedra Blanca la parroquia San Juan, provincia de Chimborazo, posee el casquete glaciar más alto de la cordillera oriental con 6260 msnm, siendo el volcán más sureño de esta cordillera. Es un volcán compuesto por tres edificios: el edificio basal principalmente efusivo que habría estado activo hace 120000 años atrás, los otros dos edificios habrían sido afectados por un gran colapso sectorial ocurrido hace unos 60000 años el mismo que produjo una avalancha de material cubriendo la planicie de Riobamba y los alrededores del volcán, actualmente el volcán se encuentra en estado potencialmente activo su monitoreo ha mostrado actividad sísmica e hidrotermal (Instituto Geofísico-EPN, 2019, p.1).

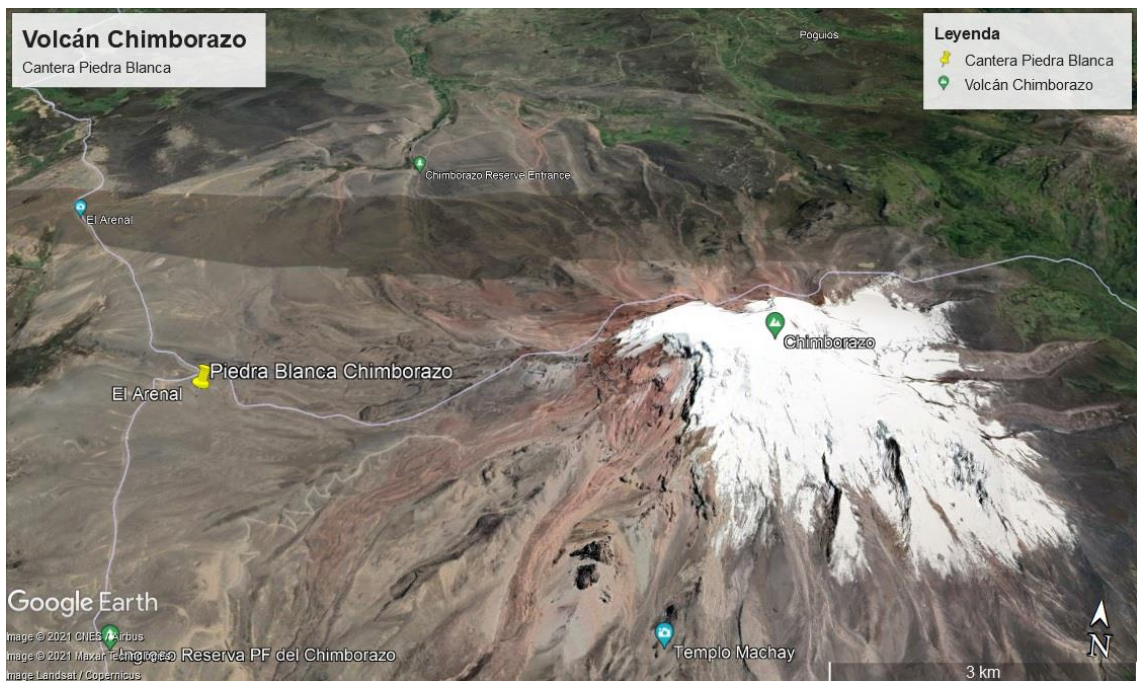


Figura 2-2: Mapa geográfico del área tomada en cuenta para el muestreo. (1:50000)

Fuente: (Google Earth, 2021).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo, 2022.

2.2.2. Volcán Cotopaxi

Es un volcán ubicado a 16 Km de la cantera “San Joaquín” de la parroquia Chaski-Cotopaxi, se encuentra en la cordillera de los Andes. Constituido por un edificio de 5020 msnm con un diámetro basal de aproximadamente 20 Km. La actividad del volcán Cotopaxi habría comenzado hace 30000 años, cuyos depósitos afloran en los valles cercanos, su edificio forma un cono simétrico de hasta 35° de inclinación. Su mayor periodo de actividad se divide en dos etapas la primera que corresponde hace 16000- 5300 años cuyas erupciones generaron importantes caídas plinianas de cenizas junto con depósitos ignimbríticos. La última fase de actividad del Cotopaxi se desarrolló en los últimos 4000 años donde se presentó caída tefra, flujos piroclásticos y lava. En la actualidad se considera un volcán activo debido a que su monitoreo registra actividad sísmica, hidrotermal y desgasificación en los últimos años. (Instituto Geofísico-EPN , 2019, p.1).



Figura 3-2: Mapa geográfico del área tomada en cuenta para el muestreo (1:50000)

Fuente: (Google Earth, 2021).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

2.2.3. Volcanes Sagoatoa-Chinibano

Volcanes que se ubican en los límites entre la provincia de Cotopaxi y Tungurahua en la cordillera oriental a aproximadamente 11 km de la cantera “Flores” en el caso del volcán Sagoatoa y aproximadamente a 20 Km en el caso del volcán Chinibano para determinar la distancia entre estos puntos se utilizó el programa Google Earth Pro, la cantera está ubicada en la parroquia Panzaleo provincia de Cotopaxi, se levantan en la cordillera occidental, y alcanzan una altura de 4.153 m sobre el nivel del mar. No hay eventos registrados por lo que se consideran volcanes extintos que tuvieron su periodo de actividad hace más de 10000, se ha descrito que cubren un área aproximada de 200 Km². (Instituto Geofísico-EPN , 2019, p.1).

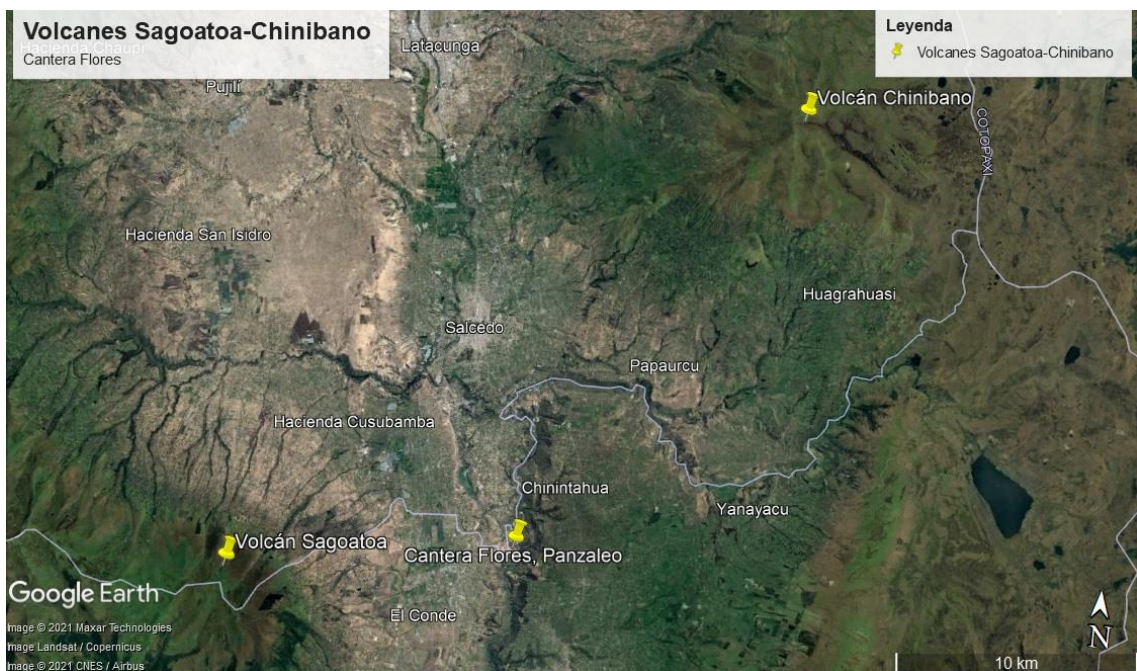


Figura 4-2: Mapa geográfico del área de muestreo Panzaleo (1:50000)

Fuente: (Google Earth, 2021).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

2.2.4. Volcán Pululahua

Este volcán se encuentra aproximadamente a 4 Km de la cantera Pérez en la provincia de Pichincha estimación realizada con el programa Google Earth Pro, alcanza una altura de 3360 m sobre el nivel del mar prácticamente sobre la línea ecuatorial, colindante con las poblaciones de San Antonio, Calacalí y Pomasqui. A diferencia de otros volcanes del Ecuador este no se presenta como una gran montaña de forma cónica sino que está conformada por varios domos de lava dispersos en un área de unos 40 Km² y un gran cráter de unos 3.5-4 Km de diámetro. El

desarrollo geológico del Pululahua se dio en los periodos del pre-holoceno y holoceno. Está formando por dos grupos de domos que fueron erupcionados durante un periodo entre 20000 y 12 000 años antes de la actualidad, aunque no se conoce la cronología detallada de su emplazamiento. Al menos 5 eventos explosivos se produjeron en el complejo volcánico Pululahua con la formación y destrucción de domos con oleadas de flujos piroclásticos, lapilli y cenizas. A la fecha de hoy se realizan monitoreos del volcán el cual se considera potencialmente activo debido a que presenta sismicidad, deformación y aguas termales. (Instituto Geofísico-EPN , 2019, p.1).

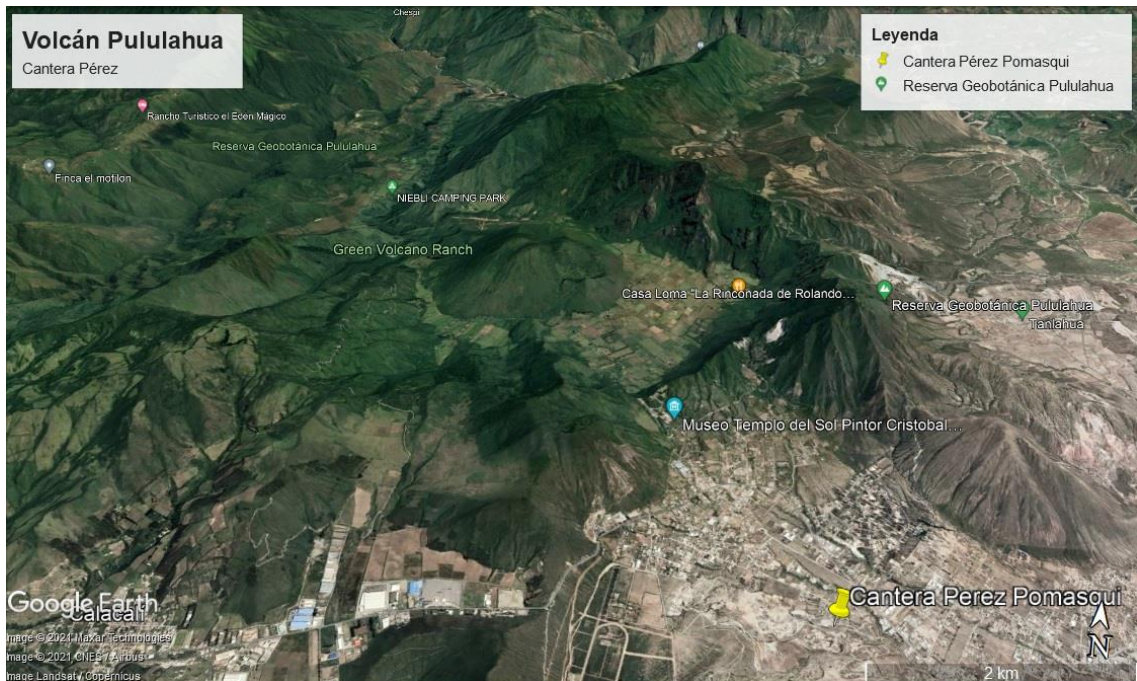


Figura 5-2: Mapa geográfico del área de muestreo en la provincia de Pichincha (1:50000)

Fuente: (Google Earth, 2021).

Realizado por: Pinduisaca Máximo, 2022.

2.3 Protocolo de muestreo del tufo volcánico

El protocolo de recolección de las muestras de tufo volcánico consta de las siguientes etapas:

a) Información general de las canteras

Se registró las características geográficas, geológicas y estructurales de la cantera. Las coordenadas geográficas se determinaron con GeoPosition app creada por OrbitalMotion, disponible en play store para todos los teléfonos celulares.

b) Información general de las muestras

Se elaboró una ficha con el nombre de la muestra, cantera de origen, coordenadas geográficas, fecha de muestreo, y el nombre de la persona que realizó el muestreo.

c) Numero de muestras

Se recolectó dos muestras de tufo volcánico por cantera para poder corroborar en caso de concentraciones altas de radón-222, las muestras fueron tomadas el mismo día y de diferentes lugares dentro de la cantera. Algunas se recogieron de sobre la superficie y otras bajo la superficie.

d) Etiquetado y Transporte de muestra

Se etiquetaron las muestras con un código único (primera inicial del nombre de la cantera - primera inicial de la provincia - número de muestra). El material se transportó al laboratorio de Técnicas Nucleares envuelto en polietileno.

2.4. Procedimiento para determinar la densidad y porosidad de las muestras de tufo

2.4.1. Densidad

a) Se tallaron cubos pequeños de tufo de diferentes dimensiones, usando una fracción de cada una de las muestras y se pesaron con una balanza digital con una precisión de 0.1 gr.

d) Se aforó con agua un vaso de precipitación de 500 ml hasta su máxima capacidad, mismo que estaba colocado dentro de otro vaso de mayor capacidad, se sumergió el cubo, se recogió el volumen de agua desplazado y se procedió a medir con una probeta.

c) Se calculó la densidad mediante la Ecuación 1-2 (Serway y Jewett, 2004: p. 9).

Ecuación 1-2: Densidad

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Fuente: (Chao et al., 1997: p.4).

Donde:

m= masa de la muestra usada para este ensayo (gr)

v= volumen desplazado por la muestra (ml)

2.4.2. Porosidad

Para cualificar la porosidad del material, se pesaron los cubos de tufo humedecidos en el ensayo de la densidad, la diferencia de peso permitió caracterizar las muestras como muy porosas (las que ganaron mayor peso) y poco porosas (las que ganaron menor peso).

2.5. Descripción de la técnica de cámara cerrada

Se usó el método de cámara cerrada para determinar la tasa de exhalación de radón de las muestras de tufo volcánico. El sistema de detección está conformado por una cámara cerrada y un detector de centelleo en interfaz con el monitor Pylon AB7 (Ver Figura 3-2).

El procedimiento consiste en insertar la muestra y el detector dentro la cámara cerrada y sellarla herméticamente. El gas radón se acumula dentro de la cámara y la concentración en el tiempo es registrada por el Pylon AB7.

A continuación, se describe cada uno de los componentes del sistema de detección:

2.5.1. Cámara cerrada

La cámara disponible en el laboratorio de Técnicas Nucleares – ESPOCH, fue construida en vidrio templado, tiene una capacidad 125 litros, cuenta con una cara móvil para ingresar las muestras e instrumentación; además, tiene incorporado un ventilador para homogenizar el aire interior y está provista de un estante de vidrio para colocar un data logger (Ecowitt), que registra la temperatura y humedad dentro de la cámara.



Figura 6-2: Configuración experimental de la técnica de cámara cerrada

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

2.5.2. Detector: Celda de Lucas (Pylon modelo 600P)

La celda de centelleo disponible en el Laboratorio de Técnicas Nucleares tiene un volumen de 272 ml, ensamblada a una ventana de cuarzo transparente revestida con óxido de estaño en un extremo; está recubierto en su interior por una capa uniforme de sulfuro de zinc activado con plata. La luz emitida se distribuye isotrópicamente y solo una fracción de la luz es recogida por un fotomultiplicador interconectado con el detector. La celda usada tiene una eficiencia de alrededor del 75%. Aunque la celda 600P se puede usar con una variedad de monitores este trabajo se centra en su uso en interfaz con el monitor Pylon modelo AB7.

Cuando el gas radón o torón decae emite una partícula alfa que impacta en el material centellador del detector, el cual emite fotones de luz en respuesta. Toma aproximadamente 30 minutos para que el 600P alcance el mismo nivel de gas radón que está presente en el ambiente circundante. (Manual 7940015 600P Pylon Electronics 2019^a: p. 4). La Tabla (3-2) presenta las especificaciones técnicas de la celda de Lucas.



Figura 7-2: Detector de centelleo pasivo celda de Lucas modelo 600P

Fuente: (Manual 7940015 600P Pylon Electronics, 2019b: p.6).

Tabla 1-2: Especificaciones del detector de centelleo o celda de Lucas Pylon 600P

Actividad más baja detectable de radón	40 Bq m ⁻³
Rango de temperatura de operación	0 a +50°C
Sensibilidad	0.037 cpm / Bqm ⁻³ .
Dimensiones	7.6x6.1cm (HxD)

Fuente:(Manual 7940015 600P Pylon Electronics 2019a).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

2.5.3. Data Logger Ecowitt:

El registrador de datos de temperatura y humedad USB ECOWITT DS102 con gran capacidad de memoria puede medir y almacenar datos a intervalos específicos de tiempo que van desde los 8 segundos hasta 4 horas cada registro. Es reconfigurable mediante su software de fácil acceso que viene incluido con el equipo, la descarga de datos es instantánea gracias a su interfaz USB-PC. El rango de temperatura de las medidas va desde -40 a 60 °C con una precisión de ± 1 °C, mientras que el rango de humedad va desde 0 a 99 % con una precisión de ± 4.5 %.

2.5.4. Monitor Pylon AB7

El Pylon AB7 es un monitor de lectura continua, fabricado por Pylon Electronics Inc. de Canadá, diseñado para mediciones de radón y torón. Para esta investigación el monitor se acopló al detector de centelleo modelo 600P. El equipo es compacto y portable, cuando el material centellador emite un fotón de luz, este fotón es detectado, convertido en pulso eléctrico y amplificado por tubo fotomultiplicador PTM, este pulso se envía a la interfaz electrónica del monitor para mayor amplificación, conformación de formas de onda, discrimina los pulsos de ruido y cuenta los pulsos apropiados, el AB7 muestra los recuentos en una pantalla LCD táctil y almacena los datos en archivos a los que se puede acceder desde el panel frontal o a su vez transferirlos a una PC para su posterior análisis. (Manual 7940021 AB7 Pylon Electronics, 2019ª: p.5). Las características técnicas se presentan en la Tabla (4-2).



Figura 8-2: Monitor Pylon AB7

Fuente:(Manual 7940021 AB7 Pylon Electronics, 2019ª: p. 10).

Tabla 2-2: Especificaciones generales del monitor Pylon AB7

Modo de Operación	Múltiple
Períodos de muestra y recuento	Programable por el usuario
Tasa de recuento máxima	10000 cuentas por segundo
Fondo electrónico	< 0.4 cpm
Detector	Varios
Memoria	Tarjeta de memoria SD de 16 GB (mínimo)
Puertos de Datos	1) Host USB 2) Cliente USB 3) Pulso TTL de 5V a través del conector SMA 4) Puerto Ethernet
Ambiente	Temperatura, Humedad Relativa, Presión barométrica
Mediciones	Temperatura de Punto de rocío
Energía de Operación	12 a 14,7 voltios, corriente continua, 1,2 amperios
Tipo de Batería	Celda de gel de plomo-ácido recargable de 12 voltios
Duración de Recarga	12 horas
Poder de carga de batería de AC:	100 a 240V AC 50 ~ 60 Hz 1.2A
Calibración	Calibrada de fábrica o del usuario
Temperatura de Operación	0 a + 40 °C (+32 a +104 °F)
Rango de Almacenamiento de Temperatura	-20 a +60 °C (-4 a +140 °F)
Humedad	0 – 90% No Condensada
Dimensiones	31cmx23cmx20cm (12" x 9" x 7.75") [W x D x H]
Peso	6 kg (13 lbs.)

Fuente : (Manual 7940021 AB7 Pylon Electronics, 2019a: p.13).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

2.5.5. Procedimiento para determinar la tasa de exhalación de radón-222 del tufo volcánico

El procedimiento experimental para determinar la tasa de exhalación de radón-222 de las muestras de tufo consta de las siguientes etapas:

- a) Se configuró el sistema de detección (Pylon AB7- Lucas cell 600P) en *modo continuo* con intervalos de tiempo de medición de 60 minutos. Es importante dar un nombre característico al file que se genera con los resultados cada muestra.
- b) Se ingresó el sistema de detección y la muestra de tufo al interior de la cámara, se encendió el ventilador, se colocó el data logger Ecowitt (configurado para tomar datos de humedad y

temperatura cada 60 minutos) y finalmente se presionó el botón “Start” del panel frontal del Pylon AB7.

- c) Se selló la cámara herméticamente durante varios días, una vez transcurrido el tiempo de medición se descargó los datos en una memoria USB colocada previamente en el panel frontal del monitor Pylon.
- d) Se calculó las tasas de exhalación másica y superficial de radón-222 mediante la Ecuaciones 2-2 y 3-2 (Chao et al., 1997: p.4).

Ecuación 2-2: Tasa de exhalación superficial

$$E_o = (Me - \frac{TC_o}{V}) \frac{V}{A}$$

Fuente: (Chao et al., 1997: p.4).

Ecuación 3-2: Tasa de exhalación másica

$$E_m = (Me - \frac{TC_o}{V}) \frac{V}{M}$$

Fuente: (Chao et al., 1997: p.4).

Donde:

E_o = Tasa de exhalación superficial de ^{222}Rn de las muestras de tufo ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

E_m = Tasa de exhalación másica de ^{222}Rn de las muestras de tufo ($\text{Bq kg}^{-1} \text{h}^{-1}$).

C_o = Concentración media anual de radón en el laboratorio de Técnicas Nucleares (Bq m^{-3}).

T = Tasa de fuga de la cámara (m^3h^{-1}).

V = Volumen neto de la cámara cerrada (m^3).

T/V = Tasa de intercambio de aire de la cámara (h^{-1}).

λ_{Rn} = Constante de decaimiento del radón 222 (h^{-1}).

A = Área de exhalación de la muestra de tufo (m^2)

M = Masa de la muestra (kg)

Me = Pendiente inicial de la curva de acumulación de radón dentro de la cámara, calculada mediante el método de mínimos cuadrados ($\text{Bq m}^3\text{h}^{-1}$)

- e) Se realizó un experimento para determinar la *tasa de fuga de la cámara*, mismo que consistió en enriquecer la cámara con gas radón, usando una fuente radioactiva, hasta una concentración aproximada de 6000 Bq m^{-3} , posteriormente la fuente fue retirada, la cámara sellada y la medición de la concentración de radón dentro de la cámara se realizó por 7.5 días. Se evidenció una curva decreciente de la concentración de radón en función

del tiempo, debido al decaimiento radiactivo y al intercambio de aire con radón desde la cámara al laboratorio y viceversa. La tasa de fuga de la cámara se calculó usando la Ecuación (4-2) (Chao et al., 1997: p.3).

Ecuación 4-2: Tasa de intercambio de aire de la cámara

$$\frac{M_t - M_L}{(C_b - C_o)} = \frac{T}{V}$$

Fuente: (Chao et al., 1997: p.4).

Donde:

C_b = Concentración inicial de radón-222 dentro de la cámara (Bq m^{-3}).

C_o = Concentración media anual de radón en el laboratorio de Técnicas Nucleares (Bq m^{-3}).

T = Tasa de fuga de la cámara (m^3h^{-1}).

T/V = Tasa de intercambio de aire (h^{-1}).

M_t = Pendiente inicial de la curva de decaimiento teórica ($\text{Bq m}^3\text{h}^{-1}$)

M_l = Pendiente inicial de la curva de decaimiento experimental ($\text{Bq m}^3\text{h}^{-1}$)

La pendiente inicial de la curva teórica se calculó de la siguiente forma:

Ecuación 5-2: Pendiente Teórica

$$C_t = C_b e^{-\lambda_{Rn} t}$$

$$\frac{dC_t}{dt(t \rightarrow 0)} = M_t = -C_b \lambda_{Rn}$$

Fuente: (Chao et al., 1997: p.4).

Donde:

λ_{Rn} = Constante de decaimiento del radón (h^{-1}).

2.5.6. Dosis Efectiva Anual

El riesgo de cáncer de pulmón por exposición a radón 222 y su progenie puede ser estimado directamente por la dosis efectiva por inhalación de radón. La contribución de las muestras de tufo a la concentración de radón en ambientes interiores puede ser calculada mediante la Ecuación (6-2) (Saad, Al-Awami y Hussein, 2014: p.2).

Ecuación 6-2: Concentración a partir de la tasa de exhalación

$$C_{Rn} (Bq m^{-3}) = \frac{E_o \times S_r}{V_r \times \lambda_v}$$

Fuente: (Saad, Al-Awami y Hussein, 2014: p.2).

Donde:

E_o = Tasa de exhalación superficial ($Bq m^{-2} h^{-1}$)

S_r = Área de la superficie interna de la habitación (m^2)

λ_v = Tasa de intercambio de aire (h^{-1})

V_r = Volumen de la habitación (m^3)

En este cálculo se asumió que la habitación es una cavidad con la relación $S_r/V_r = 2.0 m^{-1}$ y la tasa de intercambio de aire de la habitación λ_v es ($0.5 h^{-1}$).

La dosis efectiva anual E_p está relacionada con la concentración de radón y viene dada por la siguiente ecuación (Saad, Al-Awami y Hussein, 2014: p.2):

Ecuación 7-2: Energía potencial alfa

$$E_p (WLM y^{-1}) = \frac{8760 \times n \times F \times C_{Rn}}{170 \times 3700}$$

Fuente: (Saad, Al-Awami y Hussein, 2014: p.2).

Donde:

C_{Rn} = Concentración de radón ($Bq m^{-3}$)

F = Factor de equilibrio de radón (0.42)

n = Factor de ocupación (0.8)

8760 = número de horas por año (h)

3700 = factor de conversión WLM

170 = números de horas de trabajo por mes (h)

La dosis efectiva de la exposición al radón se estimó utilizando un factor de conversión de **6,3 mSv / WLM** (Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 1987).

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Características geológicas y geográficas de los puntos de muestreo

La Tabla (1-3) presenta información de las canteras monitoreadas, en particular las características geológicas del lugar donde se ubican las mismas. Se usó mapas geológicos del Ecuador y el programa Google Earth Pro para ubicar geográficamente cada cantera.

Tabla 1-3: Características geográficas y geológicas de las canteras

No.	Nombre de la cantera	Provincia	Coordenadas geográficas	Características geológicas
1	Cantera Flores	Cotopaxi Panzaleo	Latitud -1.118472 Longitud -78.569770	Diferente material geológico, probablemente producto de los volcanes Chinibano y Sagoatoa activos en el Pleistoceno (100000-2500000 años). Varias estratificaciones, en su facie distal encontramos flujos piroclásticos e ignimbritas (Dunkley, R. y Gaibor, A. 1997).
2	Cantera El Salvador	Tungurahua Pilahuin	Latitud -1.283619, Longitud -78.716077	Conformación orográfica muy accidentada, lomas, colinas, quebradas y barrancos, en el sector geológico se observa posibles depósitos aluviales con niveles de areniscas no consolidadas y niveles de pómez que corresponden al Pleistoceno (Egüez, A. 2017, 1:200000).
3	Cantera Piedra Blanca	Chimborazo El arenal	Latitud -1.335059, Longitud -78.866843	Unidades litológicas con diferentes periodos de formación, el afloramiento de material volcánico cuenta con abundante pómez (15%), una variedad de microcristales (biotita, cuarzo) sueltos (5%) y minúsculos fragmentos líticos (IG- EPN, 2018, p.1 1:200000).
4	Cantera Pérez	Pichincha Pomasqui	Latitud 0.006431 Longitud -78.470742	Depresión topográfica formada en su mayoría por rocas sedimentarias y rocas volcánicas, presencia de tobas dasíticas y pómez producto del volcán Pululahua activo en el Holoceno Superior (<5000 años (Egüez, A. 2017, 1:200000).




5	Cantera San Joaquín	Cotopaxi Chaski	Latitud -0.703139 Longitud -78.581802	Unidades litológicas de Diferentes periodos de formación, probablemente la muestra corresponde a las últimas erupciones del volcán Cotopaxi activo en el Holoceno Superior. (Hughes, R. 1997: 1:200000)
---	---------------------	-----------------	--	---

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

La Tabla (2-3) muestra las características de las siete muestras de tufo estudiadas (masa, densidad, porosidad y color). Luego de la medición de la muestra C-E-S-T-0-1 en piedra, una parte fue secada triturada para luego ser tamizada a una granulometría de 2mm, dando lugar a la muestra C-E-S-T-0-3.

Tabla 2-3: Caracterización de las muestras de tufo volcánico

Código de identificación	Lugar de Origen	Muestra	Masa (kg)	Densidad de la muestra (gr. cm^{-3})	Porosidad	Color
C-F-C-0-1	Cantera Flores Cotopaxi		11.3	1.8 ± 0.02	Poco Poroso	Café-Grisáceo
C-E-S-T-0-1	Cantera Salvador Tungurahua		9.2	1.4 ± 0.02	Muy Poroso	Amarillo-Parduzco
C-E-S-T-0-2	Cantera Salvador Tungurahua		0.3	1.4 ± 0.02	Muy Poroso	Amarillo-Parduzco
C-E-S-T-0-3	Cantera Salvador Tungurahua		2.4	1.2 ± 0.02	Muy Poroso	Amarillo-Parduzco

C-P-B-C-0-1	Cantera Piedra Blanca Chimborazo		4.5	1.7 ± 0.02	Poco Poroso	Blanco- Grisáceo
C-P-P-0-1	Cantera Perez Pichincha		3.9	1.1 ± 0.02	Poroso	Café Parduzco
C-S-J -C-0-1	Cantera San Joaquin Cotopaxi		9.1	1.1 ± 0.02	Muy Poroso	Gris

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

3.2. Caracterización de la cámara cerrada

La caracterización de la cámara se realizó en función de 4 parámetros: la tasa de fuga, la temperatura, la humedad relativa y el fondo radón dentro de la cámara.

3.2.1. Tasa de fuga de la cámara

El Gráfico (1-3) muestra curva de decaimiento de la concentración de radón dentro de la cámara debido al decaimiento natural del radón y a la tasa de fuga de la cámara. La línea roja es el resultado del fit lineal.

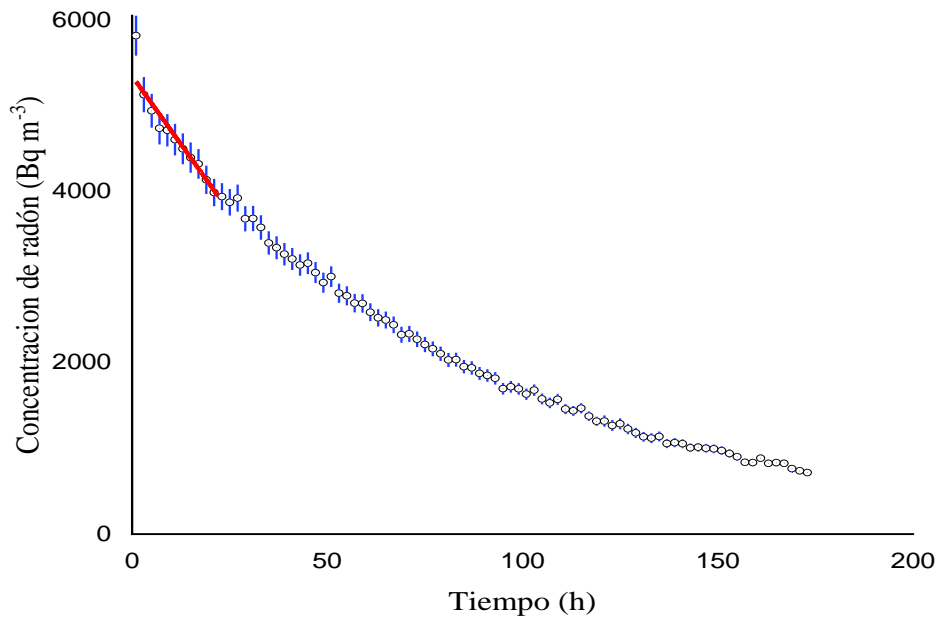


Gráfico 1-3: Concentración de radón en función del tiempo dentro de la cámara (sin muestra).

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

La tasa de fuga se calculó con la Ecuación (4-2) de la Sección (2.5), con una pendiente inicial de 64 ± 8 y una concentración inicial de $5423 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$, obtenida del fit lineal, dando un valor de $0.00043 \pm 0.00007 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y una tasa de intercambio de aire de la cámara de $0.0038 \pm 0.0009 \text{ h}^{-1}$.

3.2.2. Temperatura y humedad relativa dentro la cámara

El Gráfico (2-3) muestra la temperatura en función del tiempo dentro y fuera de la cámara cerrada herméticamente (usando el Ecowitt data logger), durante un experimento con la muestra C-E-S-T-0-3. Se puede observar que la temperatura dentro de la cámara es mayor que en el laboratorio, y en ambos casos observa el efecto día/noche; es decir, la temperatura desciende durante la noche y se incrementa durante el día, por lo que es evidente que el vidrio templado no es un aislante térmico.

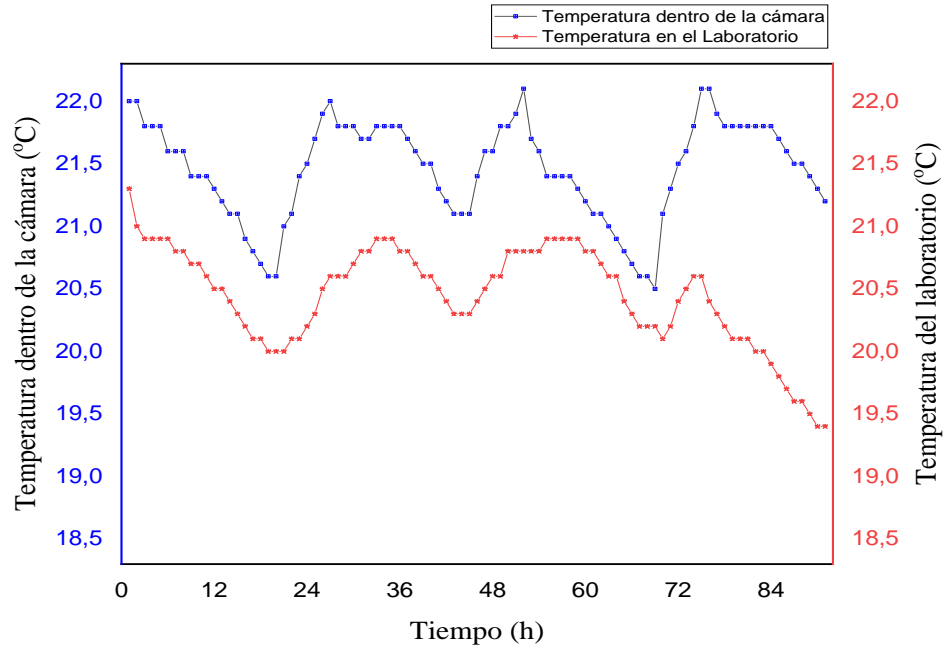


Gráfico 2-3: Temperatura en el laboratorio y dentro de la cámara.

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

El Gráfico (3-3) presenta la humedad relativa registrada con el Ecowitt data logger, dentro y fuera de la cámara en el mismo periodo de medición de la temperatura. La humedad en el laboratorio es más alta que dentro de la cámara cerrada durante el día y más baja durante la noche.

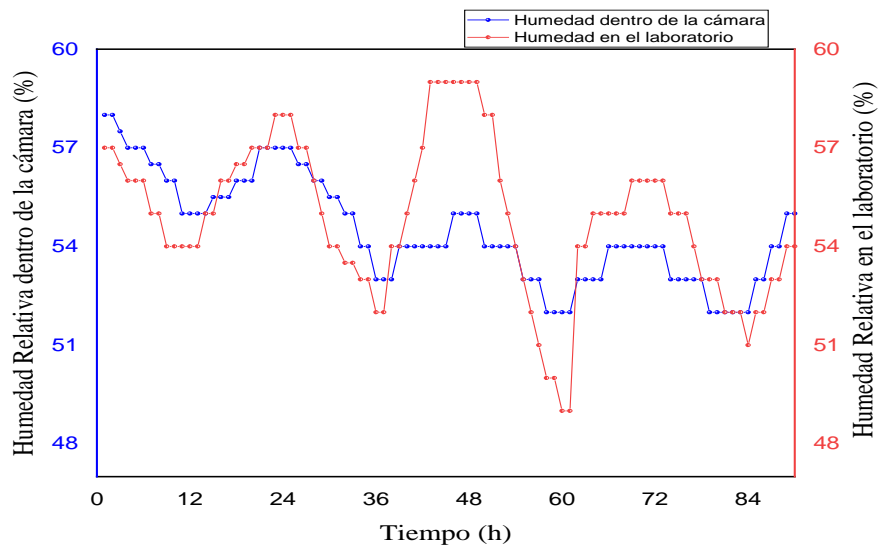


Gráfico 3-3: Humedad relativa en el laboratorio y en el interior de la cámara cerrada.

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

3.2.3. Fondo radón dentro de la cámara

La medición de la concentración de radón de fondo dentro de la cámara se realizó durante 96 horas, con intervalos de medición de 1 hora, usando un detector de centello (celda de Lucas de la Pylon Electronics Inc.). La configuración experimental consistió en la cámara de vidrio sellada herméticamente con el detector en el interior. El Gráfico (4-3) muestra un patrón típico del background dentro de la cámara.

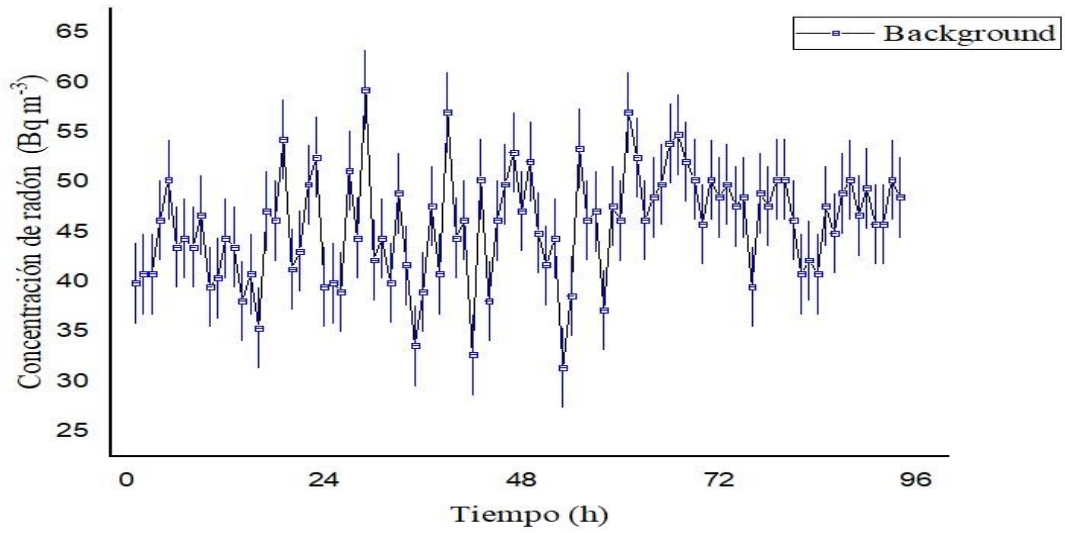


Gráfico 4-3: Concentración de radón de fondo en función del tiempo, dentro de la cámara

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

3.3. Tasas de exhalación de Tufo volcánico

A manera de ejemplo, en el Gráfico (5-3) se puede observar la curva de acumulación de radón dentro de la cámara correspondiente a la muestra de tufo amarillo C-E-S-T-0-1 de la cantera El Salvador ubicada en la parroquia Pilahuin provincia de Tungurahua. La línea lila es el resultado del fit lineal.

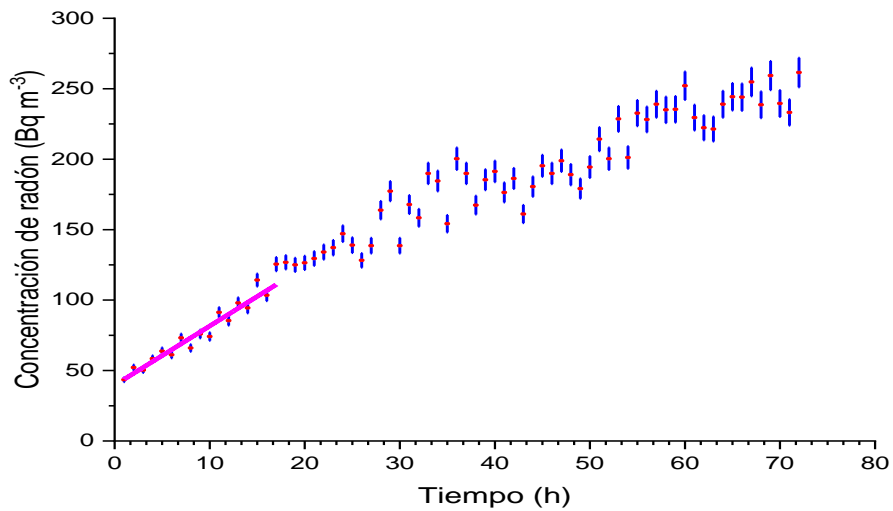


Gráfico 5-3: Curva de crecimiento de la concentración de radón-222 dentro de la cámara muestra C-E-S-T-0-1 Pilahuin-Tungurahua.

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

Las muestras C-E-S-T-0-1(Pilahuin-Tungurahua), C-P-B-C-0-1(Piedra Blanca-Chimborazo), C-E-S-T-0-2 (Pilahuin-Tungurahua) presentan una curva característica de acumulación de radón 222 dentro de la cámara, en tanto que las muestras C-F-C-0-1(Panzaleo-Cotopaxi), C-P-P-0-1(Pomasqui-Pichincha) y C-C-H-C-0-1(Chasqui-Cotopaxi) muestran patrones compatibles con el radón fondo dentro la cámara, esto se evidencia comparando los Gráficos (6.3) para el caso de la muestra C-P-P-0-1 de la cantera Pérez y el Gráfico (4-3) para el caso del background. En estos casos la tasa de exhalación se reporta como bajo el nivel de detección de la técnica (BND).

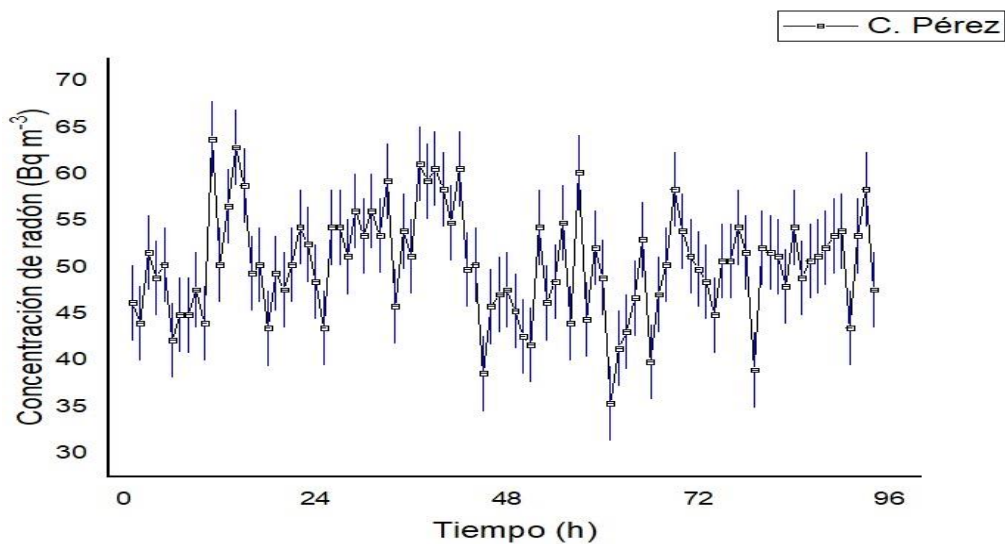


Gráfico 6-3: Concentración de radón en función del tiempo, muestra C-P-P-0-1.

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

3.3.1. Resultados de la tasa de exhalación másica de radón

La Tabla (3-3) muestra la tasa de exhalación másica de radón-222, es pertinente hacer notar que de las siete muestras de tufo analizadas con la técnica de cámara cerrada, cuatro presentan una tasa de exhalación bajo el nivel de detección de la técnica, por lo que se pueden considerar libres de radón y es importante resaltar que únicamente las tres muestras pertenecientes a la cantera El Salvador muestran una tasa de exhalación másica en el rango de 0,041 a 0,050 Bq kg⁻¹ h⁻¹.

Tabla 3-3: Tasas de exhalación másica de las muestras de tufo volcánico

Código de la muestra	Lugar de procedencia	Tasa de exhalación Másica Bq kg⁻¹ h⁻¹	Error Relativo
C-F-C-0-1	Cantera Flores Cotopaxi	BND	-
C-E-S-T-0-1	Cantera El Salvador Tungurahua	0,041± 0,011	27 %
C-E-S-T-0-2	Cantera El Salvador Tungurahua	0,050± 0,012	24 %
C-E-S-T-0-3	Cantera El Salvador Tungurahua	0,046± 0,017	29 %
C-P-B-C-0-1	Cantera Piedra Blanca Chimborazo	BND	-
C-P-P--0-1	Cantera Pérez Pichincha	BND	-

C-S-J-C-0-1	Cantera San Joaquin Cotopaxi	BND	-
--------------------	------------------------------------	-----	---

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

BND= Bajo el Nivel de Detección de la técnica

3.3.2. Resultados de la tasa de exhalación superficial

La tasa de exhalación superficial se evaluó para la muestra, C-E-S-T-0-3 proveniente de la cantera “El Salvador”. El cálculo se realizó con la Ecuación 3-2 de la Sección 2.5. La muestra se colocó en un recipiente de vidrio de 29.9 cm de largo, 19.9 cm de ancho y 9.6 cm de altura, con una superficie de exhalación de $(0,059 \pm 0,0025) \text{ m}^2$, posteriormente se ingresó a la cámara juntamente con el detector y se selló herméticamente, se obtuvo un resultado de $(1,27 \pm 0,028) \text{ Bq m}^{-2}\text{h}^{-1}$ para la tasa de exhalación superficial.

3.4. Dosis anual por inhalación de radón

La Tabla (4-3) presenta el valor asociado a la exposición y riesgo de inhalación de radón 222 proveniente de la muestra de tufo C-E-S-T-0-3, la dosis se calculó a partir de la Ecuación (7-2) de la Sección (2.5.). Esta muestra de tufo presenta una tasa de dosis anual de 0.15 mSv/y^{-1} cuando la ICRP recomienda que la dosis al público no debería exceder 1 mSv/y^{-1} (ICRP, 2007, p.99).

Tabla 4-3: Dosis anual por inhalación de radón proveniente del tufo C-E-S-T-0-3

Identificación	Concentración de Radón en interiores C_{Rn} (Bq m^{-3})	Working Level for Year (WLM y^{-1})	Dosis Equivalente (mSv y^{-1})
C-E-S-T-0-3	5.2 ± 0.6	(0.024 ± 0.005)	(0.15 ± 0.03)

Realizado por: Pinduisaca, Máximo. 2022.

CONCLUSIONES

Los resultados de los experimentos realizados para caracterizar la cámara cerrada, muestran que presenta una tasa de intercambio de aire de $(0.0038 \pm 0.0009 \text{ h}^{-1})$, lo que implica una fuga de aire con radón de 0.43 litros/h ; además, se observó variaciones día/noche de la temperatura y humedad relativa dentro de la cámara y un fondo radón de $45 \pm 7 \text{ Bq m}^{-3}$, por lo que se concluye que *la cámara cerrada del laboratorio de Técnicas Nucleares, presenta una baja tasa de fuga, no está aislada térmicamente y presenta un fondo radón compatible con el laboratorio.*

El cálculo de las tasas de exhalación másica de las siete muestras de tufo, provenientes de las canteras Flores (Panzaleo-Cotopaxi), El Salvador (Pilahuin-Tungurahua), Piedra Blanca (El Arenal-Chimborazo), Pérez (Pomasqui-Pichincha), San Joaquín (Chasqui-Cotopaxi), muestra que únicamente las tres muestras de la cantera El Salvador presentan una tasa de exhalación másica en el rango de 0,041 a 0,050 $\text{Bq kg}^{-1}\text{h}^{-1}$, mientras que el resto de muestras presentan una tasa de exhalación bajo el nivel de detección de la técnica, por lo que se infiere que *están libres de radón.*

La exposición y el riesgo de la inhalación de radón-222 se calculó para la muestra de tufo triturada C-E-S-T-0-3 de la cantera San Salvador, ubicada en Pilahuin-Tungurahua, que presentó una tasa de exhalación superficial de $1,27 \pm 0,028 \text{ Bq m}^{-2}\text{h}^{-1}$, que equivale a una dosis de $(0.15 \text{ mSv y}^{-1})$, valor inferior al recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) (1 mSv y^{-1}) , por lo que se concluye que *el uso del tufo para la construcción de casas y edificios no involucra un riesgo para la salud de las personas expuestas a este material.*

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la calibración del sistema de detección (celda de Lucas-monitor AB7 Pylon) según las recomendaciones del fabricante.

Se recomienda medir periódicamente la tasa de fuga de la cámara de vidrio templado para descartar un aumento de este parámetro.

Se recomienda analizar muestras de origen volcánico debido a la alta probabilidad de radiactividad presente en estos materiales.

GLOSARIO

Afanítica: es un nombre dado a ciertas rocas ígneas que son tan finas que los componentes de sus cristales minerales no son detectables a simple vista. Por contraste, los minerales de las rocas ígneas faneríticas, son visibles a simple vista. (GEOLOGIA WEB, 2022, p.2).

Anfíboles: Los anfíboles son minerales inosilicatos, de la clase silicatos. Están compuestos por tetraedros de silicio y átomos de oxígeno unidos por enlaces covalentes y multitud de cationes. Comparten características físicas, químicas y estructurales con otros silicatos como los piroxenos. (Conde, 2013, p.2).

Clasto: significa trozo o partícula y principalmente se usa en la sedimentología entonces en conjunto de rocas sedimentarias. (Tupa, 2018, p.66).

Detritus: Podemos definir los detritos como aquellas partículas resultantes de la descomposición de una masa sólida en partículas más pequeñas. (Griem, 2020, p.2).

Exhalar: despedir gases vapores u olores (Freedictionary.com, 2021, p.3).

Lítico: Término descriptivo aplicado a fragmentos rocosos que aparecen en una roca formada posteriormente; e.g., toba lítica (Griem, 2020, p.3).

Rocas ígneas extrusivas, efusivas o volcánicas: son formadas por el rápido enfriamiento de la lava y de fragmentos piroclásticos. Este proceso ocurre cuando el magma es expulsado por los aparatos volcánicos; ya en la superficie y al contacto con la temperatura ambiental, se enfría rápidamente desarrollando pequeños cristales que forman rocas de grano fino (no apreciables a simple vista) y rocas piroclásticas. (Conde, 2013, p.40).

Pelítico: termino que se usa para referirse a las rocas arcillosas metamorfizadas.
Perfil Litológico: Un perfil litológico o columna litológica representa gráficamente la estratigrafía generalizada de un sector. Abajo se dibuja los estratos más antiguos arriba los estratos más jóvenes. (Barba, 2016, p.34).

Piroclásticos: son producto de las erupciones volcánicas explosivas y contienen fragmentos de roca de diferentes orígenes, pueden ser de muchas formas y tamaños (Conde, 2013, p.10).

Zeolitas: Una zeolita es un aluminosilicato cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento que permiten el intercambio iónico y la deshidratación reversible. (Griem, 2020, p.2).

BIBLIOGRAFÍA

- ADNAN, Barahim et al.** *Engineering Properties of Volcanic Tuff from the Western Part of Yemen. Sultan Qaboos University Journal for Science* , vol. 22, no. 2. (2018),(Óman) ISSN 1027-524X. DOI 10.24200/squjs.vol22iss2 pp 81-88.
- AGUAL BARRENO, Diana Elizabeth.** Diseño de explotación integrada de las canteras Playa Llagchoa Y canteras Salvador, ubicada en Ambato-Tungurahua, Ecuador. (Proyecto Integrador)(Ingeniería) Universidad Central del Ecuador, Carrera de ingeniería en Minas Quito-Ecuador. 2017 pp. 51-66. ISSN 2301-928X. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/12964>.
- AGUILAR, Alex.** Determinación de los niveles de Radón-222 presentes en la mina subterránea El Señor de Roma en el cantón Zaruma-El Oro, Ecuador. (Trabajo de Titulación)(Ingeniería) Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Ambiental, Cuenca-Ecuador. 2018. pp 18-85.
- AICARDI, G. et al.** Radón y sus efectos en la salud en trabajadores de minas de uranio. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, vol. 61, no. 238, 2015. (España) pp. 86-98. ISSN 0465-546X. DOI 10.4321/s0465-546x2015000100009.
- ALLEGRUCCI, G et al.** Is radon emission in caves causing deletions in satellite DNA sequences of cave-dwelling cricket?. *PLOS ONE* vol. 10, no. 3, 2015. (Italia) pp. 1-11. ISSN 19326203. DOI 10.1371/journal.pone.0122456.
- ALONSO, H.** El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales.(Tesis)(Doctorado) Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Física, Islas Canarias-España. 2015. pp. 45-288.
- ARTEAGA, A. & LLIGUIN, A.** “Reducción de los niveles de 222Rn en viviendas de la Parroquia Victoria del Portete, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay”. (Trabajo de Titulación)(Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera de Química. Riobamba – Ecuador. 2018. pp. 16-17.
- AYMAN, Abdalla et al.** *Radon detection using alpha scintillation KACST cell. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers,*

- Detectors and Associated Equipment* [en línea], 2019. Najra-Arabia Saudita vol. 922, no. December 2018, pp. 84-90. ISSN 01689002. DOI 10.1016/j.nima.2018.12.078. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.078>.
- BAIRD, D.** Experimentacion Una introduccion a la teoria de mediciones y diseño de experimentos.pdf. 1991. 2^{da} Ed. Royal Militar College Ontario – Canadá, PRENTINCE HALL LATINOAMERICA S.l.: s.n. pp 143-215
- BARBA, D.** Estudio Vulcanológico del Complejo Volcánico Chimborazo. (Trabajo de Titulación)(Ingeniería) Escuela Superior Politécnica Nacional, Carrera de Geología. Quito –Ecuador. 2016. pp. 156-217. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/144>.
- BASKARAN, M.** *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies.* Springer Geochemistry, 2016. (Suiza). pp. 24-49 DOI 10.1007/978-3-319-21329-3.
- BEIR.** Efectos sobre la salud de la exposición al radón. [en línea], Vol 6, 1999 . NCIB. Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK233262/pdf/Bookshelf_NBK233262.pdf.
- BENEDICT, S.** Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2004. vol. 5, no. 3, pp. 91-92. ISSN 1526-9914. DOI 10.1120/jacmp.2021.25315.
- BEST, M.** *Igneous and Metamorphic Petrology.* Mineralogical Magazine 2da Ed. 1983. Oxford-UK: Blackwell S.l.: s.n. ISBN 1405105887.
- BLANCO, P. et al.** *Radon mitigation approach in a laboratory measurement room.* Multidisciplinary Digital Publishing Institute :Sensors (Switzerland) 2017, vol. 17, no. 5. [Consulta: 8 febrero 2021]. ISSN 14248220. DOI 10.3390/s17051090. Disponible en: www.mdpi.com/journal/sensors.
- BRENNER, D.J.** *Protection against radon-222 at home and at work.* ICRP publication 65. *International Journal of Radiation Biology* [En línea], 1994. vol. 66, no. 4, pp. 413-413. ISSN 09553002. DOI 10.1080/09553009414551371.
- CASTRO, M.** Exposición a Radón Residencial y Cáncer de Pulmón: Un Estudio de Casos y Controles en el Área Sanitaria de Ourense. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de

Compostela. Facultad de Medicina, A Coruña-España, 2015.

CARPIO, G. Detección de las concentraciones de radio-226 y exhalación de radón-222 en algunos materiales de construcción de la ciudad de Cuenca, (Trabajo de Titulación)(Ingeniería). Escuela Politecnica Salesiana Ingeniería Ambiental , Cuenca-Ecuador 2016. pp. 61.

CHAO, C. et al. *Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. Building and Environment*, 1997. vol. 32, no. 4, pp. 355-362. ISSN 03601323. DOI 10.1016/S0360-1323(96)00071-6.

CHEN, J. et al. Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of Environmental Radioactivity* [en línea], 2010. vol. 101, no. 4, pp. 317-322. ISSN 0265931X. DOI 10.1016/j.jenvrad.2010.01.005. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X10000202>.

CHICAIZA , N. Análisis De La Presencia De Gas Radiactivo Radón En Agregados Pétreos De La Provincia De Tungurahua Y Su Incidencia En La Construcción.(Trabajo Experimental)(Ingeniería), Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato-Ecuador, 2020. pp. 21-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101607%0>.

COHEN, B. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. *Journal of the National Cancer Institute* [en línea]. 1997. S.l.: Disponible en: <https://academic.oup.com/jnci/article/89/1/49/2526159>.

CONDE, M. Caracterización Geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad Universidad Complutense de Madrid Facultad de Ciencias Geológicas Departamento de Geodinámica. Madrid- España , 2013 pp. 28-723 S.l.: s.n.

CONSEJO SUPREMO DE GOBIERNO ECUADOR. Reglamento De Seguridad Radiológica Ecuador. 1979. S.l.:

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*, vol. 330, no. 7485, 2005. pp. 2-6. ISSN 09598146. DOI 10.1136/bmj.38308.477650.63.

- DEMPSEY, S. et al.** High Radon Areas and lung cancer prevalence: Evidence from Ireland. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 182, 2018. pp. 12-19. ISSN 18791700. DOI 10.1016/j.jenvrad.2017.11.014.
- DUNKLEY, P. y GAIBOR, A.** Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 2° - 3° S, 1997, scale 1/200000. CODIGEM – Min. Energ. Min. – BGS publs. Quito.
- EGÚEZ A. et al.** Mapa geológico de la República del Ecuador, 2017, scale 1:1000000. Min. de Minería – INIGEMM. Quito.
- EURATOM,** Normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. *Diario Oficial de la Unión Europea* [en línea], 2014. pp. L13/1-73. Disponible en: <http://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>.
- ESPINOSA, G. et al.** Radón Intramuros y Salud pública. Universidad Autónoma de México, Mexico, 2018. S.l.: s.n. ISBN 9786073003315.
- FISHER, R. & SCHMINCKE, U.** *Pyroclastic Rocks*. New York-Estados Unidos. Springer Berlang 1984. S.l.: [Consulta: 11 mayo 2021]s.n. ISBN 9783540513414.
- FREEDICIONARY.COM** exhalar - *significado diccionario*. [blog]. [Consulta: 17 mayo 2021]. Disponible en: <https://es.thefreedictionary.com/exhalar>.
- FRINKS, R.** Piedra Pómez. *Producción minera: piedra pómez*, vol. 2001, pp. 1-5. Disponible en: http://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2003_04/PPOMEZ03.pdf,
- GARCIA, M.** PERMEABILIDAD AL GAS RN-222 222 EN DIFERENTES LÁMINAS USADAS EN LA CONSTRUCCION. Universidad de Cantabria, Facultad de Ciencias. Cantabria-España., 2013. pp.5-49. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/3154>
- GÓMEZ, M. et al.** Aguas radiactivas, ¿fe peligrosa o beneficio demostrado? *Canales de Hidrología Médica*, vol. 3, no. 0, España. 2010. pp. 109-129-129. ISSN 1988-8317. DOI 10.5209/rev_ANHM.2010.v3.38577.

- GREENBERG, M. & SELIKOFF, I.J.** Lung cancer in the schneeberg mines: A reappraisal of the data reported by harting and hesse in 1879. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 37, no. 1, 1993. pp. 5-14. ISSN 00034878. DOI 10.1093/annhyg/37.1.5.
- GRIEM, W.** Apuntes Geología: Volcanoclásticos y piroclasticos. , 2020. [en línea]. [Consulta: 12 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap04g.html>.
- GUAPIZACA, C.** IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO DE DETECCIÓN DEL GAS ^{222}Rn EN AGUA PROVENIENTE DE LAS VERTIENTES NATURALES DEL VOLCÁN CARIHUAIRAZO. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba-Ecuador , 2018. pp. 6-80.
- HASSAN, N. et al.** The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan. *Radiation Measurements*, vol. 46, no. 2, 2011. pp. 232-237. ISSN 13504487. DOI 10.1016/j.radmeas.2010.11.006.
- HUGHES, R. et al.** (Hughes R., Bermúdez R., Espinel G.) Mapa Geologico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° - 1° S, scale 1:200 000. 1997. CODIGEM, BGS.
- ICRP.** Publicación 103 Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica.
- IIGE.53.-** Hoja geológica Chimborazo - escala 1 100.000.pdf. 2018. S.l.: s.n.
- INSTITUTO GEOFÍSICO, EPN.** Red de Observatorios Vulcanológicos (ROVIG). 2015. [en línea]. [Consulta: 15 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.igepn.edu.ec/red-de-observatorios-vulcanologicos-rovig>.
- INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (INSHT),** NTP 440: Radón en ambientes interiores. *Ministerio* [en línea], 1995. pp. 1-7. Disponible en: https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_440.pdf.
- JANIK, M et al.** Influence of humidity on radon and thoron exhalation rates from building

materials. *Applied Radiation and Isotopes* [en línea], vol. 95, 2015. pp. 102-107. ISSN 18729800. DOI 10.1016/j.apradiso.2014.10.007. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.10.007>.

LA VERDE, G. et al. Radiation protection legislation and sustainable development of a rural green tuff village of ischia island. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 20, 2020. pp. 1-14. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su12208374.

LINARES, P. Caracterización del Hormigón a la difusión de gases y su correlación con el radón. , Universidad Politecnica de Madrid, Escuela Superior de Arquitectura. Madrid-España 2015. pp. 15-220 Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=78197>

MALDONADO, I. Toba volcánica Propiedades características y Usos. [en línea]. , 2021. [Consulta: 21 marzo 2021]. Disponible en: <https://geologiaweb.com/rocas-igneas/toba-volcanica/>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Commission on Life Sciences, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations - Google Books.* , 1988. . S.l.: s.n. [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: https://books.google.com.my/books?id=2kFeAgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gs_bse_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.

NUCCETELLI, C. & BOLZAN, C. In situ gamma spectroscopy to characterize building materials as radon and thoron sources. *Science of the Total Environment*, vol. 272, no. 1-3, 2001. pp. 355-360. ISSN 00489697. DOI 10.1016/S0048-9697(01)00718-5.

PALACIOS, D. et al. Técnicas Radiométricas Superficiales En La Exploración Petrolera. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, vol. 0, no. 44, 2014. pp. 83-92. ISSN 0435-5601.

PARK, Seon. et al. A case study on the correlation between radon and multiple geophysicochemical properties of soils in G island, Korea, and effects on the bacterial metabolic behaviors. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 222. 2020. ISSN 18791700. DOI 10.1016/j.jenvrad.2020.106336.

PODGORSAK, E. et al, Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. Québec-Canada *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, vol. 5, no. 3, 2003. pp. 91-92. ISSN 1526-9914. DOI 10.1120/jacmp.2021.25315.

PYLON ELECTRONICS, 2019. Passive Lucas Type cell detector Manual 7940015 600P.

PYLON ELECTRONICS, 2019. Pylon AB7 Monitor Manual Manual 7940016.

QUINDÓS, L. *Radón, un gas radiactivo de origen natural*. 1995. S.l.: s.n.

QUINDOS, L. et al. 2010. El Gas Radón Como Contaminante the Radon Gas . an Air Pollutant. , vol. 10, pp. 32-37.

GEOKANSAS. Radón [blog], Kansas Geological Survey, 2013 [Consulta: 25 agosto 2021]. Disponible en: <https://geokansas.ku.edu/radon>.

REMON, J. Cáncer de pulmón - SEOM: Sociedad Española de Oncología Médica © 2019. *SEOM* [en línea]. [Consulta: 28 enero 2021]. Disponible en: <https://seom.org/info-sobre-el-cancer/cancer-de-pulmon?showall=1>.

RIBEIRO, F. et al. Natural radioactivity in soils of the state of Rio de Janeiro (Brazil): Radiological characterization and relationships to geological formation, soil types and soil properties. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 182, 2018. pp. 34-43. ISSN 18791700. DOI 10.1016/j.jenvrad.2017.11.017.

RIGHI, S. & BRUZZI, L., 2006. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 88, no. 2, pp. 158-170. ISSN 0265931X. DOI 10.1016/j.jenvrad.2006.01.009.

SAAD, A. Radon exhalation from building materials used in Libya. *Radiation Physics and Chemistry* [en línea], vol. 101, 2014. pp. 15-19. ISSN 18790895. DOI 10.1016/j.radphyschem.2014.03.030. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.03.030>.

SCHLUMBERGER. Detector de Centelleo. *Oilfield Glossary* [en línea]. [Consulta: 25 febrero 2021]. Disponible en:

http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/scintillation_detector.aspx.

SERWAY, R. & JEWETT, J. *Physics for scientist and engineers.* Thom Brooks/Cole 2004. S.l.: s.n. ISBN 0534408427.

SOWBY, F. *Annals of the ICRP. Annals of the ICRP*, vol. 6, no. 1, 1981. pp. 1. ISSN 01466453. DOI 10.1016/0146-6453(81)90127-5.

STOULOS, S. et al. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 69, no. 3, Thesaloniki-Greece. 2003. pp. 225-240. ISSN 0265931X. DOI 10.1016/S0265-931X(03)00081-X.

TUNG, S. et al. Assessment of soil radon potential in Hong Kong, China, using a 10-point evaluation system. *Environmental Earth Sciences*, vol. 68, no. 3, 2013. pp. 679-689. ISSN 18666299. DOI 10.1007/s12665-012-1782-0.

TUPA, A. *Concreto Estructural Liviano Con Escoria Y Ceniza Volcánicas Del Distrito De Yura.* (Tesis) (Ingeniería) Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería Civil Arequipa-Perú. 2018. pp. 79-82.

UNSCEAR. *UNSCEAR Report 2006: Effects of Ionizing Radiation.* S.l.: s.n. ISBN 978921422634.

VARGAS, A. *Metrología y Dosimetría del Radón.* [en línea], Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona-España. 2018. Disponible en: https://inte.upc.edu/es/noticias/varios/jornada_radon_upc_arturo_vargas.pdf.

WOLF, T. *Geografía y geología de Ecuador.* Leipzig, Tipografía F. A. Brockhaus [en línea], 1892. pp. 1-671. Disponible en: <http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000059-af10bb00a5/tabasco.pdf>.

YOUSEF, H. et al. Measurement of Radon Exhalation Rate in Some Building Materials Using Nuclear Track Detectors. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 05, no. 03, 2015. pp. 141-148. ISSN 2161-6795. DOI 10.4236/wjnst.2015.53014.

ZEEB, H. et al. Manual de la OMS sobre Radón en interiores. [en línea], 2015. pp. 100.

Disponible en: <http://www.who.int/iris/handle/10665/161913#sthash.2WvJkXnR.dpuf>.

ANEXOS

ANEXO A: PUNTOS DE MUESTREO DE TUFO VOLCÁNICO

Catálogo de canteras seleccionadas para el muestreo de tufo ecuatoriano



Cantera “Flores” Panzaleo-Cotopaxi

Latitud

-1.118472

Longitud

-78.5697

Ubicada en la parroquia Panzaleo cantón Salcedo ubicado en un área de explotación de agregados pétreos. El otorgamiento de la zona minera ha sido destinada a la extracción de materiales construcción que según su granulometría es utilizada en la construcción de viviendas y carreteras. Según sus características geográficas probablemente son productos del volcán Sagoato y Chinibano activos en el pleistoceno una edad de aproximadamente 25000000-10000000 de años.



Cantera “El Salvador” Pilahuin-Tungurahua

Latitud

-1.283619,

Longitud

-78.716077

En el sector donde se encuentra el área minera geológicamente afloran rocas magmáticas efusivas pertenecientes a la formación del Chimborazo productos de estas erupciones son andesitas piroxénicas vesiculares, muestran fenocristales de andesina, augita y olivinos en una matriz de grano fino de plagioclasas y material.



Cantera “Piedra Blanca” San Juan-Chimborazo

Latitud

-1.335059,

Longitud

-78.866843

Este depósito probablemente pertenece al Chimborazo por su cercanía se data su actividad hace unos 60000-30000 años donde produjo una avalancha de material cubriendo una planicie con flujos de lavas andesíticas y piroclastos tobaceos y piroclastos tobaceos con fragmentos andesíticas. El punto de muestreo es en un corte de carretera con una zanja donde se acumula el tufo volcánico.



Cantera “Pérez” Pomasqui-Pichincha

Latitud

-0.703139

Longitud

-78.581802

Ubicada en la parroquia Pomasqui al norte de Pichincha en un área de explotación de agregados pétreos y depósitos y sedimentos volcánicos probablemente piroclastos emitidos en las últimas erupciones del volcán Pululahua la proximidad es de 8 Km. Pocos siglos de edad Holoceno superior (<5000 años) durante los últimos 4000 años sus erupciones han sido de composición andesítica, tobácea y piedra pómez. Las muestras se encontraron a un metro de profundidad en un corte de camino en el área minera



Cantera “San Joaquín” Chasqui-Cotopaxi

Latitud

-0.703139

Longitud

-78.581802

Ubicada en la parroquia Chasqui en un área de explotación de agregados pétreos, depósitos de ignimbritas y sedimentos volcánicos probablemente piroclastos emitidos en las últimas erupciones del volcán Cotopaxi debido a que se encontró la muestra a un metro de profundidad en un corte de carretera en el área minera la proximidad es de 15 Km. Pocos siglos de edad Holoceno superior (<5000 años)





epoch

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: 22 / 04 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Máximo Javier Pinduisaca Sáez</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Física</i>
Título a optar: <i>Biofísico</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=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-
ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.04.22 10:55:16 -05'00'



0718-DBRA-UTP-2022