



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA BIOFÍSICA**

**ESTUDIO DE LA EXHALACIÓN DE RADÓN DE LA ARENA DEL  
RÍO CHAMBO Y SUS AFLUENTES**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Integrador

Presentado para optar al grado académico de:

**BIOFÍSICO**

**AUTOR: WILLIAM OLIVER GUALLI LEÓN**

**DIRECTORA: Dra. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDÓÑEZ Ph.D.**

Riobamba-Ecuador

2022

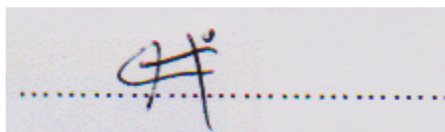
**©2022, William Oliver Gualli León**

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

Yo, WILLIAM OLIVER GUALLI LEÓN, 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, 15 de marzo de 2022.




A photograph of a handwritten signature in blue ink on a white background. The signature is stylized and appears to be 'W. O. Gualli León'. The signature is written above a horizontal dashed line.

**William Oliver Gualli León.**

**092900492-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA BIOFÍSICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto Integrador, **ESTUDIO DE LA EXHALACIÓN DE RADON DEL RIO CHAMBO Y SUS AFLUENTES**, realizado por el señor: **WILLIAM OLIVER GUALLI LEÓN**, 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.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Richard Willians Pachacama Choca Msc. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2022-03-15
Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordoñez PhD. <b>DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2022-03-15
Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno PhD. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		2022-03-15

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo:

A Dios, por darme un principio tan amoroso y un camino tan entregado. A mi padre, por ser un personaje decisivo en mi formación. A mi querida y bella madre, por su amor, comprensión y paciencia. A mis hermanas (Eunice y Lizeth), por estar siempre conmigo, que la vida las premie por todo lo que hemos vivido.

*William*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme salud y fortaleza para seguir adelante, a mis padres por darme su apoyo y confianza. A mi tío Manuel, por aconsejarme y ayudarme siempre. A mi tía Rosa, por su amistad y cariño sincero.

A mi tutora, Dra. Jheny Orbe, profesional versada en el campo de la investigación de radón, ejemplo de mujer fuerte y valiente, le agradezco por ser un gran apoyo en la elaboración de este trabajo y en toda mi etapa como estudiante.

También, extendiendo mi agradecimiento al Mat. Marcelo Cortez, estandarte notable de la escuela de física y matemática, docente que con su paciencia, constancia y vocación ha dejado una huella innegable en cada uno de sus estudiantes.

Para finalizar, quiero agradecer de manera especial, a Najah y Alejandra, mis grandes amigas y confidentes, gracias por estar siempre presente en los momentos difíciles, que Dios las bendiga y cuide siempre.

*William*

## TABLA DE CONTENIDO

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

## CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).....	4
1.2. Mecanismos de transporte del radón.....	5
1.2.1. <i>Emanación de radón.</i> .....	6
1.2.2. <i>Transporte por difusión</i> .....	8
1.2.3. <i>Exhalación de radón.</i> .....	9
1.3. Fuentes de exposición de $^{222}\text{Rn}$ dentro de las viviendas.....	9
1.4. Concentración de $^{222}\text{Rn}$ en interiores.....	10
1.5. Efectos tóxicos del $^{222}\text{Rn}$ y sus productos de desintegración.....	10
1.5.1. <i>Toxicocinética del <math>^{222}\text{Rn}</math></i> .....	10
1.5.2. <i>Mecanismo de toxicidad</i> .....	11
1.5.3. <i>Inmunotoxicidad</i> .....	13
1.5.4. <i>Neurotoxicidad</i> .....	13
1.5.5. <i>Genotoxicidad</i> .....	13
1.5.6. <i>Carcinogenicidad</i> .....	14
1.5.7. <i>Ecotoxicidad</i> .....	15
1.6. El cáncer de pulmón y la exposición residencial de $^{222}\text{Rn}$ .....	16
1.7. Métodos empleados para estimar la tasa de exhalación de $^{222}\text{Rn}$ .....	17
1.7.1. <i>Método de la cámara cerrada (MCC)</i> .....	17
1.7.2. <i>Método de la cámara abierta (MCA)</i> .....	18
1.8. Recomendaciones y gestión.....	18
1.9. Normativa sobre los niveles de radón.....	18
1.9.1. <i>Organismos internacionales</i> .....	18
1.9.2. <i>Legislación en Ecuador</i> .....	19

1.10.	Arena de río.....	21
-------	-------------------	----

## CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO .....	23
2.1.	Descripción del área de estudio.....	23
2.2.	Procedimiento de muestreo .....	24
2.3.	Procedimiento de preparación de las muestras. ....	25
2.4.	Configuración experimental de la técnica de cámara cerrada.....	26
2.5.	Metodología de medición de la tasa de exhalación $^{222}\text{Rn}$ en arena de río.....	28
2.6.	Cálculo de la tasa de exhalación superficial. ....	30
2.7.	Cálculo de la tasa de exhalación másica. ....	30
2.8.	Contribución a la concentración de radón Indoor .....	31
2.9.	Dosis efectiva anual promedio por inhalación de $^{222}\text{Rn}$ .....	31

## CAPÍTULO III

3.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	32
3.1.	Concentración de radón de fondo dentro de la cámara (Background).....	32
3.2.	Curva de acumulación de radón .....	32
3.3.	Exhalación de $^{222}\text{Rn}$ .....	33
3.4.	Tasa de exhalación superficial de $^{222}\text{Rn}$ .....	34
3.5.	Tasa de exhalación másica de $^{222}\text{Rn}$ .....	34
3.6.	Contribución a la concentración de $^{222}\text{Rn}$ “Indoor” .....	35
3.7.	Dosis efectiva anual .....	36

CONCLUSIONES .....	37
--------------------	----

RECOMENDACIONES .....	38
-----------------------	----

## GLOSARIO

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Dosis límite permitida para personal ocupacional expuesto (POE). .....	20
<b>Tabla 1-2:</b>	Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo .....	23
<b>Tabla 2-2:</b>	Código único de cada muestra de arena.....	25
<b>Tabla 1-3:</b>	Tasa de exhalación superficial de radón-222 de las muestras de río .....	34
<b>Tabla 2-3:</b>	Tasa de exhalación másica de $^{222}\text{Rn}$ de las muestras de arena .....	34
<b>Tabla 3-3:</b>	Contribución a la concentración de radón Indoor de las muestras .....	35
<b>Tabla 4-3:</b>	Dosis efectiva anual de las muestras de arena.....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Esquema de la cadena de desintegración radiactiva del $^{236}\text{Ra}$ .....	4
<b>Figura 2-1:</b>	Diagrama esquemático de la emanación de radón.....	6
<b>Figura 3-1:</b>	Mecanismos de acción de la radiación ionizante sobre la célula.....	12
<b>Figura 4-1:</b>	Extracción de arena en el río Chambo.....	21
<b>Figura 1-2:</b>	Configuración experimental del método de la cámara cerrada.....	26
<b>Figura 2-2:</b>	Radon Monitor AB7.....	27

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Concentración media de radón dentro de la cámara vacía.....	32
<b>Gráfico 2-3:</b>	Curva de acumulación de $^{222}\text{Rn}$ de la muestra de arena del río Guamote.....	33
<b>Gráfico 3-3:</b>	Exhalación de radón de las muestras de arena de río .....	33

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1:</b>	Difusión de radón .....	8
<b>Ecuación 2-1:</b>	Absorción de la RI por el agua. ....	12
<b>Ecuación 3-1:</b>	Creación de par de iones. ....	12
<b>Ecuación 1-2:</b>	Concentración de Rn en un volumen de aire libre. ....	28
<b>Ecuación 2-2:</b>	Resultado de la derivada de la Ecuación (1-2). ....	29
<b>Ecuación 3-2:</b>	Pendiente inicial experimental “ <i>me</i> ” .....	29
<b>Ecuación 4-2:</b>	Exhalación de radón “E” dentro de una cámara cerrada. ....	29
<b>Ecuación 5-2:</b>	Tasa de exhalación superficial de <sup>222</sup> Rn. ....	30
<b>Ecuación 6-2:</b>	Tasa de exhalación másica de <sup>222</sup> Rn. ....	30
<b>Ecuación 7-2:</b>	Contribución de la concentración de Rn Indoor. ....	31
<b>Ecuación 8-2:</b>	Dosis efectiva anual por inhalación de <sup>222</sup> Rn .....	31

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** ESPECIFICACIONES GENERALES DEL MONITOR PYLON AB7

**ANEXO B:** ESPECIFICACIONES DEL DETECTOR DE CENTELLEO O LUCAS CELL  
PYLON 600P

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tuvo como objetivo determinar, la tasa de exhalación de radón-222, de muestras de arena recolectadas en el río Chambo y sus afluentes utilizados como material de construcción en la provincia de Chimborazo. Así como la contribución de la arena a la concentración de radón en interiores y la dosis efectiva anual. Las mediciones de exhalación de radón-222 se realizaron utilizando una cámara cerrada y un sistema de detección de radón-222 compuesto por un monitor Pylon AB7 y una celda de Lucas 600P. La tasa de exhalación más alta se detectó en la muestra de arena del río Guamote (RGM1) con un valor de  $(2.69 \pm 0.63)$  Bq/m<sup>2</sup> h, mientras que la muestra del río Chambo (RCH2) presenta el valor más bajo detectado  $(1.83 \pm 0.49)$  Bq/m<sup>2</sup> h. La muestra RGM1, considerando una habitación como una cavidad y un período de permanencia promedio de 7000 horas en un año, presenta una contribución a la concentración de radón en interiores de  $(10.76 \pm 2.52)$  Bq/m<sup>3</sup>, que equivale a una dosis efectiva anual de  $(0.27 \pm 0.06)$  mSv/año. Este valor de dosis representa el 25% del valor recomendado para radioactividad natural por la UNSCEAR en el año 2006 (1.1 mSv/año). Se recomienda evitar el muestreo directo en los ríos, y recoger las muestras directamente de las minas o canteras.

**Palabras clave:** <RADIACIÓN NATURAL>, <RADÓN>, <AB7 RADON MONITOR>, <ARENA DE RÍO>, <EXHALACIÓN DE RADÓN>, <RÍO CHAMBO>.



1347-DBRA-UTP-2022



Firmado electrónicamente por:  
**LEONARDO  
FABIO MEDINA  
NUSTE**

## ABSTRACT

The aim of this curricular integration work was to determine the radon-222 exhalation rate of sand samples collected from the Chambo river and its tributaries used as construction material in the province of Chimborazo. As well as the contribution of sand to the indoor radon concentration and the annual effective dose. Radon-222 exhalation measurements were performed using a closed chamber and a radon-222 detection system consisting of a Pylon AB7 monitor and a Lucas 600P cell. The highest exhalation rate was detected in the Guamote river sand sample (RGM1) with a value of  $(2.69 \pm 0.63)$  Bq/m<sup>2</sup> h, while the Chambo river sample (RCH2) presents the lowest detected value  $(1.83 \pm 0.49)$  Bq/m<sup>2</sup> h. The RGM1 sample, considering a room as a cavity and an average permanence period of 7000 hours in a year, presents a contribution to the indoor radon concentration of  $(10.76 \pm 2.52)$  Bq/m<sup>3</sup>, which is equivalent to an annual effective dose of  $(0.27 \pm 0.06)$  mSv/year. This dose value represents 25% of the value recommended for natural radioactivity by UNSCEAR in 2006 (1.1 mSv/year). It is recommended to avoid direct sampling in rivers, and to collect samples directly from mines or quarries.

Keywords: <NATURAL RADIATION>, <RADON>, <AB7 RADON MONITOR>, <RIVER SAND>, <RADON EXHALATION>, <RIVER CHAMBO>.



Dra. Carmita Eulalia Rojas Castro. Mgs.

0602890469

## INTRODUCCIÓN

La radioactividad natural siempre ha estado presente, incluso mucho antes de la existencia de la humanidad. Los seres humanos, dependiendo de la fuente emisora, siempre estaremos expuestos a varios tipos de radiación. Entre las fuentes de radiación natural, podemos mencionar al radón como una de las más relevantes, el mismo que contribuye en promedio un 50% a la exposición de radiación ionizante total que reciben los seres humanos. Por varias décadas se ha estudiado los efectos del isótopo  $^{222}\text{Rn}$  en las personas, sobre todo en las que se encuentran en constante contacto con el mismo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015: p. 32) “Los efectos para la salud de la exposición residencial al radón, según estudios epidemiológicos, han demostrado convincentemente una asociación entre la exposición al radón en interiores y el cáncer de pulmón, incluso para los niveles de radón relativamente bajos que suelen existir en los edificios residenciales.”. Además, el radón fue clasificado como carcinógeno humano en 1988 por el CIIC, el organismo especializado de investigación oncológica de la OMS. El peligro que representa la exposición a gas radón residencial, ha llevado a diversos trabajos de investigación a estimar la exhalación de radón proveniente de los diferentes materiales utilizados en construcción. Para este fin, varios de estos estudios han utilizado la técnica de cámara cerrada. Uno de los primeros estudios en este ámbito, es el de K. Holý, I. Sýkora, M. Chudý, A. Polášková, J. Fejda y O. Holá que, en el año 1995, en la República Eslovaca, utilizaron esta técnica de medición en 100 materiales de construcción, obteniendo resultados dentro del rango de  $0.4$  a  $15.8 \mu\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (Holý et al., 1995: p. 4).

Otros importantes incursores en este método de estudio son Christopher Chao y sus colaboradores; Thomas Tung, y John Burnett que, en el año de 1996, en Hong Kong, construyeron cámaras de vidrio para, con ayuda de un detector Rad7, determinar la diferencia en tasas de fuga y eficiencia de estas cámaras. Concluyeron que el método de la cámara cerrada es preciso y conveniente para medir las características de emanación de radón de materiales con baja radiación (Chao et al., 1997: p. 11).

N.P. Petropoulos, M.J. Anagnostakis y S.E. Simopoulos en el año 2001, describen los resultados de las mediciones obtenidas utilizando diferentes instrumentos y métodos para evaluar las mediciones de exhalación de radón de bajo nivel. Esta investigación, realizada en la Sección de Ingeniería Nuclear de la Universidad Técnica Nacional de Atenas, se centró en la determinación de la tasa de exhalación de radón a partir de una losa de hormigón utilizando el método de cámara cerrada. La medición más alta obtenida fue de  $(1.65 \pm 0.21) \text{ mBq s}^{-1}$  (Petropoulos y Simopoulos, 2001: p. 8).

Bikit y su investigación, acerca de la emanación de radón y el efecto que tiene el tamaño del grano de arena (granulometría) en la tasa de emanación, realizada en el año 2011 en conjunto con D. Mrda, S. Grujic y U. Kozmidis-Luburic, detalla la tasa de emanación de varios



materiales de construcción (placas cerámicas, arena, ladrillo rojo y ladrillo siporex) con diferentes concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ . Para este fin, utilizó un espectrómetro alfa (RAD7) para medir el aumento en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  (debido a la emanación de radón de cada material con diferente granulometría) dentro de una cámara cerrada. La mayor influencia de la granulometría en la tasa de emanación de radón se presentó en la muestra de ladrillos de siporex, con un porcentaje de emanación de radón del 27% (tamaño de grano de 0,34 mm). Por otro lado, se observó el menor efecto de granulometría y el coeficiente de emanación más bajo (~0,4%) en las muestras de almohadillas de cerámica. Este estudio concluyó que, en el caso de la arena, la granulación no jugó un papel importante en la tasa de emanación de radón. El grado de emanación no se incrementó con la reducción del tamaño de las partículas de arena (Bikit et al., 2011: p. 3).

En Hengyang, China, en el año 2021 se llevó a cabo un estudio sobre la exhalación de radón en un concreto de bloque revestido con mortero y revoque acrílico. Utilizando el método de la cámara cerrada y un período de medición de 21 días, obtuvieron resultados donde la tasa de exhalación de radón aumentó con un aumento del contenido de arena en la capa de mortero, y se redujo con un aumento del espesor y el contenido de agua. Los resultados obtenidos de la contribución a la concentración de radón *Indoor* mostró una reducción de 234,9 a 201,1  $\text{Bq m}^{-3}$ , cuando se incrementó el espesor de la capa de cobertura de 15 a 35 mm. La estimación de la dosis efectiva en los bloques de hormigón con capa de cobertura se redujo a 0,61  $\text{mSv/año}$  (Wang et al., 2021: p. 11).

Un estudio reciente, realizado por Jheny Orbe en la Universidad de Calabria en el año 2021, presenta los resultados de estudios destinados a contribuir a la realización de un protocolo para medir la tasa de exhalación de radón en materiales de construcción. Estas mediciones, realizadas con la técnica de cámara cerrada, las elaboró en paralelo en Italia, en el departamento de física de la Universidad de Calabria (UNICAL) y en el laboratorio análogo del departamento de física de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) en Riobamba, Ecuador. Donde construyó una cámara de vidrio similar a la italiana. En ambos laboratorios analizó los mismos materiales y aplicó el mismo protocolo. A pesar de la diferencia de instrumentación, circunstancias experimentales y ambientales, los resultados obtenidos concordaron con lo observado en UNICAL y confirmaron la calidad del protocolo. Los resultados obtenidos en este estudio varían desde el mínimo detectable hasta  $0,86 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Orbe, 2021: pp. 1-3).

Otro estudio realizado en el Laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH, es el de Talia Tene y su equipo en el año 2021, quienes utilizando el método de cámara cerrada y un equipo RAD7, analizaron 40 materiales de construcción (bloques de concreto, ladrillos de arcilla, muestras de granito y concreto) producidos y utilizados en Ecuador. Encontrando tasas de exhalación de radón resultantes en el rango de 0 a  $7,83 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . La tasa de exhalación superficial más alta se detectó en muestras de granito, mientras que en los ladrillos de arcilla

obtuvieron una exhalación de radón por debajo del nivel mínimo ( $0.05 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Además, registraron tasas de dosis efectivas que oscilan entre 0,019 y 0,112 mSv/año, causadas por la exhalación de radón del material de construcción (Tene et al., 2021: p. 2).

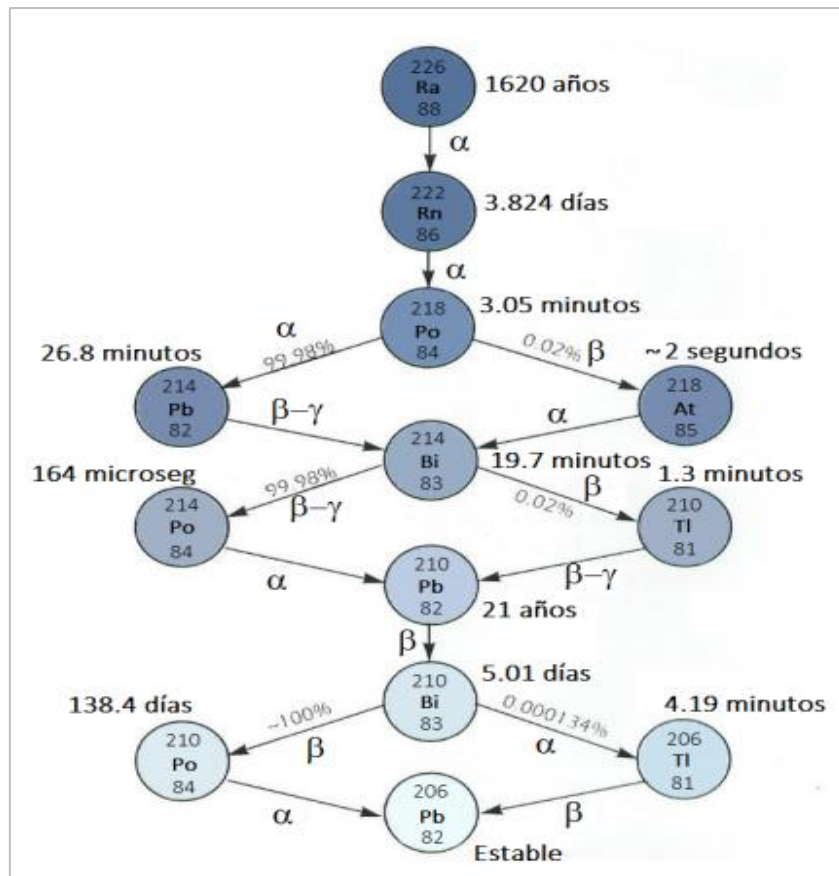
Este trabajo de integración curricular se desarrolla dentro del Proyecto de Investigación denominado **“Evaluación de elementos radiactivos de la serie del Uranio-238 en el ambiente en pacientes con cáncer”**, ejecutado por el Grupo de Investigación GIDAC-ESPOCH. Dentro de este proyecto de investigación se han realizado varias mediciones de radón en agua, materiales de construcción y muestras orgánicas. El presente estudio tiene como objetivo calcular la tasa de exhalación de radón de la arena de río Chambo y sus afluentes. Para este fin, se elaboró un protocolo de muestreo y un protocolo de preparación de las muestras, para medir la tasa de exhalación de la arena de río usando la técnica de cámara cerrada. Además, se analizó las curvas de acumulación y decaimiento de radón dentro de la cámara cerrada y se comparó los resultados con los valores publicados a nivel mundial. Cabe mencionar que, en la provincia de Chimborazo, el uso de la arena de río es muy frecuente y es común utilizarlo en mampostería, construcción de losas, elaboración de concreto, y enlucido de paredes de los interiores de las habitaciones y domicilios. En caso de una alta exhalación de radón (proveniente del uso de esta arena), aumenta la contribución a la concentración de radón *Indoor*, lo que se traduce en un mayor riesgo de inhalación de gas radón. Desde el punto de vista de la contaminación radiactiva, este aumento representa un peligro latente y siempre presente para los habitantes que utilizan este tipo de material en sus edificaciones. Además, en el año 2020, debido al aislamiento provocado por el COVID-19, se ha provocado un aumento en el número de horas de permanencia dentro del hogar, generando un mayor aumento a la exposición de gas radón residencial. Por eso, es necesario un estudio que evalúe la dosis efectiva anual causada por la exhalación de radón proveniente de la arena de río utilizado en construcción. El área de estudio donde se realiza este trabajo de integración curricular se encuentra afectado por la actividad eruptiva del volcán Sangay. Por lo cual, es frecuente la caída de ceniza en los alrededores de los cantones de la provincia de Chimborazo.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

El radón es un gas noble radiactivo natural, sin color, sabor u olor. Presente naturalmente en diversas concentraciones en el aire, el agua, las rocas y el suelo. Se forma como producto de la desintegración del Uranio-238 ( $^{238}\text{U}$ ). Esta desintegración de  $^{238}\text{U}$  se da a través de una serie de radionucleidos de vida más corta que eventualmente producen Radio-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), con una vida media de 1620 años. El  $^{226}\text{Ra}$  se desintegra por emisión de partículas alfa directamente a  $^{222}\text{Rn}$ , que tiene una corta vida media de 3,82 días. la Figura (1-1) presenta la cadena de desintegración radiactiva del  $^{226}\text{Ra}$  (Lastra, 2016: p. 2).



**Figura 1-1:** Esquema de la cadena de desintegración radiactiva del  $^{226}\text{Ra}$

Realizado por: Lastra, M. 2016.

El radón es uno de las sustancias más pesadas que se sabe que existen como gas en condiciones

atmosféricas normales. Tiene un punto de ebullición de  $61,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una densidad de  $9.72\text{ gl}^{-1}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En promedio, alrededor de una parte de radón está presente en  $1 \times 10^{21}$  partes de aire. Además, se lo utiliza en investigación geológica como trazador de aguas subterráneas y las variaciones en la distribución espacial del radón se han utilizado para identificar fallas geológicas ocultas. Se ha sugerido que las anomalías en las concentraciones de radón pueden ser útiles para predecir la actividad sísmica (Thompson, 2014: p. 46). De los 35 isótopos de radón que se han caracterizado, solo tres son comunes en la naturaleza ( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ). El Torón ( $^{220}\text{Rn}$ ), tiene una vida media de 56 segundos y el Actinón ( $^{219}\text{Rn}$ ), una vida media de 4 segundos. Se forman, respectivamente, en cadenas de desintegración natural, uno a partir del torio-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) y otro a partir del uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ). El  $^{222}\text{Rn}$  tiene una vida media lo suficientemente larga como para que sea útil en estudios geohidrológicos, mientras que las vidas medias de  $^{220}\text{Rn}$  y  $^{219}\text{Rn}$  son demasiado cortas para que sean útiles como trazadores en investigaciones ambientales. Los tres isótopos naturales emiten partículas alfa de alta transferencia de energía lineal (LET) durante la desintegración radiactiva. Los productos de desintegración del  $^{222}\text{Rn}$  se pueden dividir en dos grupos que son los descendientes de vida corta, que va desde una fracción de segundo hasta 27 minutos, donde se incluyen el  $^{218}\text{Po}$ , el  $^{214}\text{Pb}$ , el  $^{214}\text{Bi}$  y el  $^{214}\text{Po}$ , y los descendientes de vida media-larga, que son el  $^{210}\text{Pb}$ , el  $^{210}\text{Bi}$  y el  $^{210}\text{Po}$ . Estos metales se pueden densificar en superficies sólidas o líquidas, y unirse a productos en aerosol o fijarse en las partículas del aire y permanecer como átomos libres. El radón junto a estos descendientes de vida corta constituye más del 50% de la dosis recibida por la población debido a exposición a fuentes naturales de radiación ionizante, siendo el valor medio de la dosis en área de fondo normal  $1.2\text{ mSv y}^{-1}$ , y pudiendo alcanzar los  $10\text{ mSv y}^{-1}$  en algunos lugares (Lastra, 2016: p. 3).

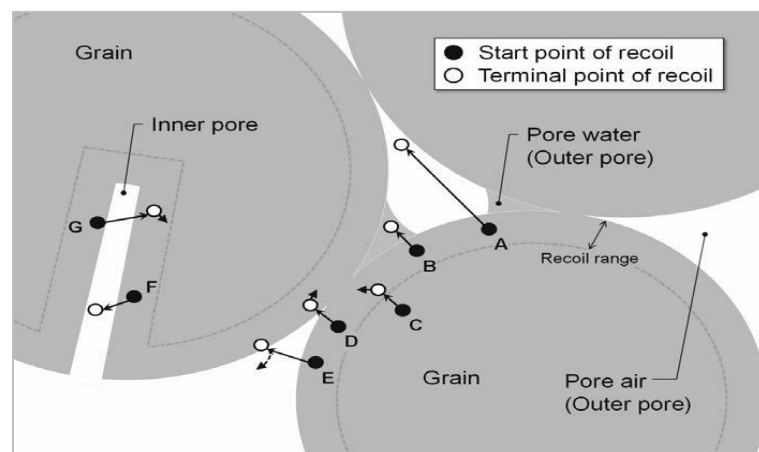
## **1.2. Mecanismos de transporte del radón**

La fuente continua de radón en la Tierra se debe a que el uranio natural está presente en las rocas y suelos que conforman la corteza terrestre en proporción variable con su naturaleza y composición. El contenido de uranio varía según el terreno, así por ejemplo en suelos de origen arcilloso o granítico la proporción de uranio es mayor que en suelos de origen basáltico y suelos carbonatados como areniscas. El radón forma parte del grupo de los gases nobles, que se caracterizan por tener una estructura atómica tan estable que no necesitan combinarse con ningún elemento químico. Como resultado de su configuración de gas noble, el radón es químicamente inerte y, por lo tanto, su comportamiento está determinado por los procesos físicos y no por las interacciones químicas. Esta propiedad junto con su vida media y su carácter gaseoso hacen que tenga gran movilidad, pudiendo escapar y moverse distancias relativamente

cortas desde su fuente de origen, ya sea por procesos de difusión o arrastre. Además, debido a su gran solubilidad, este elemento puede ser transportado tanto como un gas individual como disuelto en otros fluidos como aguas subterráneas o petróleo. (Lastra, 2016: p. 7).

### 1.2.1. Emanación de radón

Algunos de los átomos de radón que son generados por la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$ , contenido en los granos minerales del medio, consiguen alcanzar el espacio intersticial entre granos, principalmente por la energía de retroceso con que salen despedidos, y logran así escapar de la matriz sólida del material dando lugar al fenómeno que es conocido como emanación. Para que esto suceda la desintegración del radio debe producirse lo suficientemente cerca de la superficie, siendo las distancias de retroceso habituales para  $^{222}\text{Rn}$  entre 20-70 nm para minerales comunes, 100 nm en agua y 63  $\mu\text{m}$  en aire. Después de la emanación, los átomos de  $^{222}\text{Rn}$  en el espacio intersticial pueden ser transportados a la superficie del suelo bien por difusión o por advección a través del terreno, hasta que se desintegran o son finalmente liberados al aire. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el mecanismo de transporte dominante es la difusión (Lastra, 2016: pp. 6-7). Tras la emanación y el transporte a la superficie por difusión, el radón puede ser liberado de la superficie a la atmósfera. Esta liberación de radón a la atmósfera se conoce como exhalación de radón. Este proceso se origina como resultado del retroceso cuando el  $^{226}\text{Ra}$  se desintegra, produciendo un  $^{222}\text{Rn}$  y una partícula alfa. La figura (2-1) ilustra los mecanismos de emanación de radón. El modelo describe los átomos de radio ubicados en un grano, rodeados por granos adyacentes, llenos de aire y agua.



**Figura 2-1:** Diagrama esquemático de la emanación de radón

Fuente: Lastra, M. 2016.

El radón producido por la desintegración del radio tiene cuatro destinos:

1. Se mueve a través del grano originario.
2. Se incruste en un grano adyacente o en otro grano en su trayectoria.
3. Se transporte en una molécula de agua.
4. Se transporte en una molécula de gas.

Dado que el rango de retroceso en sólidos es pequeño, típicamente de unos 50 nm, la mayoría de los átomos permanecen dentro de la red cristalina del mineral. Solo cuando el retroceso termina fuera del grano o en un poro abierto, el radón es capaz de migrar. Las distancias de retroceso para el radón en el agua y en el aire son distintas a las distancias en sólidos, por lo que la proporción de átomos de radón que logran escapar varía según el medio. Además, hay muchos factores que afectan a la emanación de radón como el tamaño de grano y su forma, el contenido de humedad, la porosidad, la permeabilidad y la distribución de los átomos de  $^{226}\text{Ra}$  en los granos del mineral. Para definir la fracción de átomos de  $^{222}\text{Rn}$  producidos por la desintegración radiactiva del  $^{226}\text{Ra}$  que escapan desde un grano de mineral al espacio de poros intersticial, se utiliza el coeficiente de emanación “ $\epsilon$ ”, Por definición se trata de una magnitud adimensional y puede tener valores entre 0, cuando no hay escape de radón, y de 1, cuando todo el radón escapa (Lastra, 2016: p. 8).

### **Factores que afectan a la emanación de radón**

El coeficiente de emanación de radón varía considerablemente dependiendo del tipo de material, de un número de aspectos mineralógicos como la estructura de la red cristalina, la porosidad, la forma del grano y la composición elemental de la roca huésped. El terreno está generalmente compuesto de muchos tipos de granos de mineral con origen de rocas distintas por lo que el coeficiente de emanación es variable. El tamaño de grano del mineral también influye en el proceso de emanación y determina en parte la disposición del uranio y el radio en él, de tal forma que si el  $^{226}\text{Ra}$  se encuentra cerca de la superficie del grano se favorece el escape de radón al espacio intersticial. Finalmente, cabe destacar que el contenido de humedad tiene un fuerte efecto en el coeficiente de emanación de radón. Los rangos típicos para el retroceso en agua son mucho más pequeños que en aire y por tanto el agua es más efectiva frenando los átomos de radón dentro del espacio intersticial. A medida que aumenta el contenido de humedad, los poros contienen más agua y es más probable que un átomo que salga despedido con cierto retroceso se frene dentro de un poro. Para altos contenidos de humedad, por encima de 5% en volumen, algunos de los átomos pueden penetrar en una partícula adyacente de forma que el coeficiente de emanación permanece casi constante con el aumento de la humedad hasta la saturación. En general, los coeficientes de emanación en suelos saturados son de 2 a 6 veces

mayores que en suelos secos, y en cualquier caso el valor más alto corresponde a terrenos con tamaños de grano más pequeños (Lastra, 2016: p. 8).

### ***1.2.2. Transporte por difusión***

Una vez que el radón escapa de los granos de mineral de radio y entra en el espacio de poros, la eficiencia de su transporte hacia la superficie depende de los gradientes de concentración, transporte por difusión, transporte por advección o arrastre, y del movimiento del aire inducido por los gradientes de temperatura y presión. En general, como ya se ha mencionado antes, la difusión es el mecanismo de transporte de radón dominante en la mayoría de los casos. Aunque la advección puede ser importante en situaciones en que se producen diferencias de presión como consecuencia de diferencias de temperatura. El transporte de radón por difusión molecular se puede explicar utilizando la primera ley de Fick de la difusión que relaciona el flujo difusivo con la concentración bajo el supuesto de un estado estacionario (Lastra, 2016: p. 8). Esta ley postula que el flujo “E”, va desde regiones de alta concentración a regiones de baja concentración, con una magnitud que es proporcional al gradiente de concentración de radón:

*Ecuación 1-1: Difusión de radón*

$$E = -D_m \nabla C_{Rn}$$

**Fuente:** (Lastra, 2016., p. 9).

Donde “E” se define como el flujo o tasa de exhalación de radón ( $\text{Bq m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), “ $D_m$ ” es el coeficiente de difusión molecular de radón ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), que caracteriza el proceso de difusión del radón dentro de un material, y “ $\nabla C_{Rn}$ ” es el gradiente de concentración de radón en el espacio intersticial “ $C_{Rn}$ ” ( $\text{Bq m}^{-3}$ ). El signo negativo indica el hecho de difusión desde unas zonas de concentraciones altas hacia zonas de concentraciones bajas.

### **Factores que afectan a la difusión de radón**

los factores físicos que afectan al coeficiente de difusión de radón en el suelo son; el tipo de suelo, la distribución del tamaño de los poros, el contenido en agua. Por lo general la difusión de radón se ve seriamente obstaculizada por la humedad presente en el suelo de donde escapa el radón. Además, los efectos de la humedad generalmente dominan por encima de otros factores físicos (Lastra, 2016: p. 10).

### **1.2.3. Exhalación de radón**

La exhalación de radón es el proceso mediante el cual el gas radón es liberado hacia la atmósfera tras ser transportado desde su origen. Para describir este proceso se emplea la tasa de exhalación de radón “E”, que se define como la concentración de radón liberada por una unidad de superficie durante una unidad de tiempo (Lastra, 2016: p. 11). Además, La exhalación de radón se debe al contenido de  $^{226}\text{Ra}$ , así como a otras propiedades del material, como la porosidad, la permeabilidad, el poder de emanación, el contenido de agua y la cobertura de la superficie (Orbe, 2021: p. 44).

#### **Factores que afectan a la exhalación de radón**

Existen diversos factores que afectan a la exhalación de radón, el valor de la exhalación de radón de una localización dada puede mostrar variaciones considerables debido al:

- a) Contenido de humedad.
- b) Factores meteorológicos; lluvia, hielo.
- c) Presión atmosférica y de suelo.
- d) Temperatura diurna y nocturna.

### **1.3. Fuentes de exposición de $^{22}\text{Rn}$ dentro de las viviendas**

La exposición de radón dentro de las viviendas está muy relacionada con la frecuencia de ventilación dentro de las mismas y su distancia con el suelo. Se debe tener, en especial cuidado, las habitaciones subterráneas como sótanos, bunkers. Dentro de una vivienda, las principales fuentes de radón son:

**El suelo:** Principal fuente de emisión para las viviendas de un piso, la cantidad de radón que puede ingresar a la vivienda depende de la concentración de radio presente en el subsuelo y de la permeabilidad del suelo de la vivienda.

**Materiales de construcción:** Segunda fuente de emisión en las viviendas de un solo piso y la primera en viviendas de varios pisos. La exposición de radón va depender de gran manera de las concentraciones de radón que presenten los materiales de construcción utilizados en la vivienda.

**Agua:** Esta fuente de emisión se común en las poblaciones que utilizan agua de pozos o de origen subterráneo para su consumo. El movimiento del agua o su aumento de temperatura provoca la liberación de gas radón en el aire interior de la vivienda y su posterior exposición.

**Gas doméstico:** Esta fuente generalmente se debe a que el gas natural utilizado para la calefacción del hogar y preparación de los alimentos posee grandes cantidades de radón, el cual se libera al momento de la combustión. Las emisiones de esta fuente están en función de la



fuente de suministro del gas, ya que las concentraciones de radón varían de región en región (Maria, 1995: p. 4).

#### **1.4. Concentración de $^{222}\text{Rn}$ en interiores**

La concentración de gas  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de las edificaciones es variada, depende de diversos factores como: la geología del suelo (cantidad de  $^{238}\text{U}$  presente), tiempo de intercambio entre el aire interior y exterior, número de ventanas y puertas (frecuencia de ventilación), y las fuentes de emisión de radón presentes en la vivienda. Estos factores, en conjunto con el tamaño de la habitación y volumen de aire dentro de esta, hace que la concentración de radón en interiores tenga variaciones de una edificación a otra, incluso si estas son contiguas. También, hay que tener en cuenta la exhalación de radón proveniente del material de construcción, el cual contribuye de manera relevante a la concentración de radón en interiores, lo cual aumenta el riesgo de exposición al radón (Schwela, 2014: p. 34).

#### **1.5. Efectos tóxicos del $^{222}\text{Rn}$ y sus productos de desintegración**

##### ***1.5.1. Toxicocinética del $^{222}\text{Rn}$***

El radón puede ingresar al cuerpo por inhalación, ingestión de agua potable, exposición dérmica y alimentos que contienen altas concentraciones de radón. Las mayores dosis de radiación recibidas por la exposición al radón ocurren en el punto de entrada en los órganos; sin embargo, una fracción del radón consumido y sus descendientes en descomposición pueden absorberse en el torrente sanguíneo y dispersarse a otros órganos. La toxicocinética del radón se complica por el hecho de que la progenie del radón presente en el medio ambiente puede consumirse directamente o crearse dentro del cuerpo después del consumo de radón. Debido a la particular manera de entrada a través del aire alveolar; la inhalación es la principal fuente de exposición de radón para el cuerpo considerando que una parte significativa se deposita en la mucosa. La eliminación de la mucosa puede eliminar la mayoría de los descendientes de radón de vida prolongada inhalados antes de que puedan descomponerse en el cuerpo (Thompson, 2014: p. 46).

Los átomos de radón no tienen carga eléctrica y, por lo tanto, no se adhieren fácilmente al polvo en el aire. En consecuencia, la mayor parte del radón inhalado se vuelve a exhalar fácilmente. La mayor parte del gas radón inhalado y no exhalado, es absorbido directamente en el torrente sanguíneo y se concentra principalmente en el hígado, los riñones, la médula ósea, y cerebro. Como el radón es muy soluble en grasas, el contenido de lípidos de los órganos determina en gran medida cómo se distribuye el radón en el cuerpo. Los elementos que empiezan a causar daños en el sistema son los primeros cuatro descendientes de este gas como lo son el  $^{218}\text{Po}$ ,

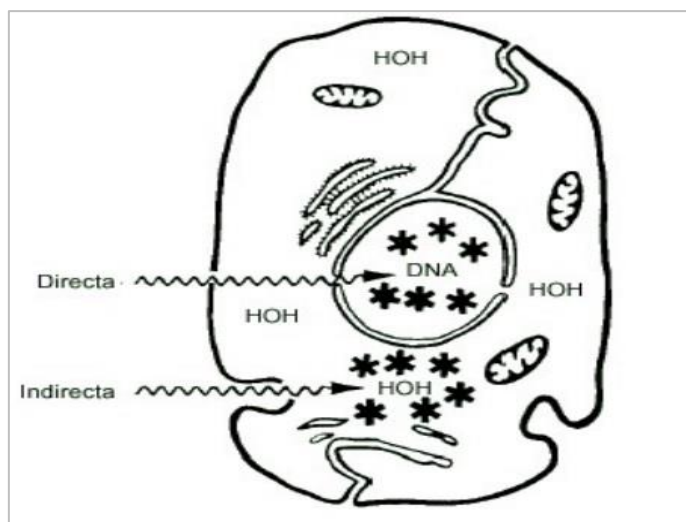
$^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  y  $^{214}\text{Po}$ , los cuales se consideran radioactivos y se los denomina como Productos de Desintegración de Radón (RDP, por sus siglas en inglés). Los RDP al alojarse en el tejido pulmonar, liberan energía en forma de partículas alfa, afectando principalmente a los bronquios. El poder de penetración de las partículas alfa es muy pequeño; al ser partículas muy pesadas. Si la radiación es externa, pueden ser detenidas por la epidermis que actúa de blindaje para el cuerpo, pero si penetran en el organismo por inhalación, que es lo que ocurre con el radón, quedan detenidas en el tracto respiratorio cuyos tejidos están mucho menos protegidos que otros, pudiendo lesionar o destruir sus células. Además, Si se tiene en cuenta que en un ambiente donde exista radón se encuentran también sus descendientes, que son metálicos y pueden quedar fijados en las paredes del sistema respiratorio, las partículas alfa que emiten ellos y todos sus descendientes, depositan toda su energía en el pulmón, potenciando la acción del radón disuelto en los tejidos del sistema respiratorio, y desarrollando con el tiempo un cáncer de pulmón (Krewski et al., 2006: p. 535).

### ***1.5.2. Mecanismo de toxicidad***

Las partículas alfa crean una ionización densa que deja huellas de grupos de pares de iones en las células y los tejidos. La exposición de las células pulmonares a esta radiación alfa proveniente de la progenie del radón (que se deposita en la capa de moco y puede provocar la exposición de las células epiteliales alveolares presentes), causa un daño al material genético que se fija como alteraciones permanentes de la estructura, y expresiones génicas como procesos que implican la reparación, replicación y división celular del ADN. Esta radiación ionizante que actúa sobre las células sigue dos posibles mecanismos: la acción directa y la indirecta.

#### **a) Acción directa**

La acción directa se produce como consecuencia de la absorción de la energía de la radiación por la célula directamente a nivel de unas estructuras clave o blanco. Estas estructuras pueden ser macromoléculas, tales como el ADN, el ARN, enzimas y proteínas, estructuras del núcleo (cromosomas, nucleolo, membrana) u orgánulos citoplasmáticos (ribosomas, mitocondrias, membrana celular). La absorción de la energía de la radiación produciría ionizaciones y excitaciones a nivel de estas estructuras que podrían desembocar en un daño celular. (INSHT, 1999: p. 2). La Figura (3-1) presenta el mecanismo de acción de la radiación ionizante sobre la célula.



**Figura 3-1:** Mecanismos de acción de la RI sobre la célula

Fuente: (INSHT), 1999.

### b) Acción indirecta

La acción indirecta de las radiaciones ionizantes es la absorción de la energía de la radiación por las moléculas de agua, elemento del que están constituidos mayoritariamente la célula y los seres vivos en general. El agua se disocia produciéndose iones y radicales libres muy reactivos, pudiendo reaccionar entre sí o con otros compuestos. Como consecuencia de ello se alteran las propiedades físicas y químicas del medio intracelular, llegándose a interferir los procesos metabólicos normales de la célula (INSHT, 1999: p. 2).

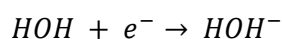
La absorción de la energía de la radiación ionizante por el agua, se realiza creándose un par de iones  $HOH^+$  y  $HOH^-$  según el siguiente esquema:

*Ecuación 2-1: Absorción de la RI por el agua.*



Fuente:(Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 1999, p. 3).

*Ecuación 3-1: Creación de par de iones.*



Fuente:(Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 1999, p. 3).

Los dos iones producidos por las reacciones anteriores son inestables y se rompen rápidamente dando lugar a radicales libres ( $H^+$  y  $OH^-$ ) que contienen solo un electrón orbital no emparejado, lo que, como se ha dicho, los hace fuertemente reactivos. El par de iones puede reaccionar entre sí formando una molécula de agua, con lo cual el efecto sobre la célula será nulo, o bien puede reaccionar químicamente con otras moléculas generando productos dañinos

para la célula, como puede ser la formación de agua oxigenada. (INSHT, 1999: p. 3).

### ***1.5.3. Inmunotoxicidad***

La exposición in vitro, de fibroblastos pulmonares humanos, a la radiación alfa en dosis de entre 3,9 y 19 cGy ha dado lugar a un aumento de los niveles tanto de especies reactivas de oxígeno intracelular como de interleucina-8 (IL-8), una quimiocina que a menudo se asocia con la inflamación. Aunque la fuente en este estudio fue el plutonio-238, los investigadores plantean la hipótesis de que la producción de IL-8 inducida por la radiación alfa y las especies reactivas de oxígeno que la acompañan pueden desempeñar un papel en la inmunotoxicidad de las células epiteliales que recubre el tracto respiratorio después de la inhalación de la descendencia del radón (Thompson, 2014: p. 48).

### ***1.5.4. Neurotoxicidad***

Como el radón es soluble en lípidos, puede entrar y salir del cerebro a través de la barrera hematoencefálica. Sin embargo, la progenie del radón no es liposoluble y por lo tanto permanece en el cerebro. Un estudio que investigó muestras cerebrales de 29 pacientes fallecidos, 11 con enfermedad de Alzheimer, 6 con enfermedad de Parkinson, y 8 controles sin evidencia de trastornos neurológicos, encontró en los cerebros de las personas con disfunción neurológica; radiactividad proveniente de la progenie de radón ( $^{210}\text{Po}$  y  $^{210}\text{Pb}$ ) diez veces mayor en comparación con los controles. Estos metales pesados, isótopos radiactivos de vida prolongada descendientes del radón, se consideran neurotóxicos y neurotróficos (Thompson, 2014: p. 48).

### ***1.5.5. Genotoxicidad***

Los estudios de los mineros de uranio han demostrado una alta frecuencia de daño cromosómico y mutaciones genéticas en linfocitos sanguíneos, medidas de aberraciones cromosómicas, incluyendo dicéntricas, acéntricas y deleciones. Se han realizado varios estudios que buscan un vínculo entre las mutaciones en el gen TP53 y la exposición al radón. El TP53 codifica para la proteína p53, una importante proteína supresora de tumores que es implicado en la regulación del crecimiento celular. Las mutaciones de este gen son comunes en las células tumorales del cáncer de pulmón. En un estudio de Japón, los investigadores midieron los niveles de proteína p53 en la sangre de los residentes que viven en un distrito con alta exposición al radón (exposición interior media de  $54 \text{ Bq m}^{-3}$ ) y un distrito de control, con menor exposición al radón (promedio interior exposición de  $16 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Se encontró que, un nivel medio de p53

para los hombres en el distrito de alta exposición, era el doble del observado en los hombres en el distrito de control ( $p < 0.01$ ). Estos resultados sugieren la posibilidad que las concentraciones de radón en interiores ligeramente elevadas pueden estimular la producción de p53 y brindar protección contra el cáncer. Sin embargo, estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que el tamaño de la muestra era pequeño y que las mediciones de radón consideradas son promedios distritales y no de hogares individuales (Thompson, 2014: p. 48).

#### ***1.5.6. Carcinogenicidad***

La primera vez que se detectó un aumento en la tasa de cáncer de pulmón fue entre trabajadores de minas de uranio expuestos a altas concentraciones de gas radón. Además, hay estudios realizados en Europa, América del Norte y China que confirman que incluso en concentraciones bajas, como las que se encuentran en las viviendas, el radón también entraña riesgos para la salud y contribuye considerablemente a la aparición de cáncer de pulmón en todo el mundo. La probabilidad de que el radón provoque cáncer de pulmón es mayor en personas que fuman. De hecho, se estima que el riesgo asociado al radón que corre un fumador es 25 veces superior que en el caso de los no fumadores. (OMS, 2015: p. 23).

Algunos estudios ecológicos también han sugerido un ligero aumento en otras formas de cáncer debido a la exposición al radón, incluyendo leucemia y cáncer de estómago, riñón y próstata. Sin embargo, las revisiones de la literatura médica sugieren que estas correlaciones no se han mantenido en estudios de casos y controles más elaborados. El peso de la evidencia también está en contra de cualquier asociación entre la exposición al radón y el cáncer de piel. Sin embargo, se ha registrado eritema y necrosis epidérmica en humanos expuestos dérmicamente al radón en dosis cercanas a 100 Gy, que es una magnitud de dosis mucho mayor a la que normalmente están expuestos profesionales o público en general. Por lo tanto, es inconcebible que el radón que se produce de forma natural presente una dosis suficientemente alta para los seres humanos para producir los efectos asociados con síndrome de radiación aguda como vómitos, diarrea, disfunción neurológica y fallo de órganos importantes. Aunque los mecanismos que conducen al cáncer de pulmón inducido por radón no se han caracterizado bien, las mutaciones de oncogenes y genes supresores de tumores causadas por una irradiación pueden conducir a una desregulación de las vías celulares que controlan el crecimiento y la diferenciación celular normal. La creencia de que la mayoría de los cánceres surgen de la ruptura de la doble hebra de ADN dentro de una sola célula y, por lo tanto, de naturaleza monoclonal, ha proporcionado una base teórica para la hipótesis lineal sin umbral (LNT, por sus siglas en inglés) del riesgo de cáncer por exposición a la radiación ionizante. Según este paradigma, no se considera los posibles efectos en las células adyacentes que no son golpeadas directamente por las partículas

alfa bajo el llamado efecto espectador. Además, se supone que el riesgo de cáncer aumenta linealmente con el aumento de la dosis en todas las exposiciones, por pequeñas que sean, sin umbral (Thompson, 2014: p. 49).

En los últimos años, el modelo LNT ha sido objeto de un mayor escrutinio debido a una gran cantidad de evidencia que sugiere que las respuestas protectoras adaptativas inducidas por la radiación, incluida la activación de los mecanismos de reparación del ADN y las respuestas inmunitarias que suprimen el desarrollo del cáncer, ocurren en dosis bajas de baja radiación LET (por ejemplo, decaimiento gamma y rayos X). A ciertas dosis de radiación LET baja, la investigación ha demostrado que la activación de los procesos de señalización entre las células afectadas y no afectadas puede provocar la apoptosis de una parte de las células dañadas, lo que indica una posible protección contra el cáncer. En exposiciones altas al radón, estas respuestas adaptativas pueden suprimirse, ofreciendo poca o ninguna protección contra el daño de la descomposición alfa. Por otro lado, los rayos gamma, agentes de radiación de baja LET, emitidos internamente por la progenie del radón o provenientes de otras fuentes de radiación de fondo, inducen respuestas protectoras adaptativas. La posibilidad de una relación dosis-respuesta en forma de J para el radón está respaldado por un estudio reciente que investiga el cáncer de pulmón en ratas después de la exposición a la alta radiación LET del  $^{239}\text{Pu}$  que, al igual que la progenie del radón, es un emisor alfa. El grupo de ratas que además de la exposición al  $^{239}\text{Pu}$  inhalado, en la forma de dióxido de plutonio, recibió pequeñas dosis de radiación gamma entre 1 y 2 mGy, mostró una disminución estadísticamente significativa en las tasas de cáncer de pulmón en comparación con el grupo de ratas expuesto únicamente al  $^{239}\text{Pu}$ . Esta supuesta respuesta adaptativa iniciada por rayos gamma proporcionó una protección completa contra el cáncer de pulmón inducido por la desintegración alfa en estas ratas para dosis de hasta 600 mGy, pero se encontró que estaba suprimido para dosis alfa que excedían aproximadamente 2000 mGy (Thompson, 2014: p. 47).

### ***1.5.7. Ecotoxicidad***

Aunque el radón está siempre presente en el medio ambiente, existen pocos datos sobre los efectos del radón en la biota no humana fuera de experimentos de laboratorio. Dados los bajos niveles de concentración de radón en el aire exterior, presumiblemente habría poco riesgo para la vida silvestre en el medio ambiente. Además, aunque se sabe que la radiación ionizante es genotóxica, la toxicidad para la reproducción y el desarrollo es casi nula. El balance de la evidencia sugiere que la exposición al radón no causa problemas reproductivos o defectos de nacimiento (Thompson, 2014: p. 50).

## 1.6. El cáncer de pulmón y la exposición residencial de $^{222}\text{Rn}$

El riesgo de cáncer de pulmón aumenta en un 16% con cada incremento de  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  en la concentración media de radón a largo plazo. La relación dosis-respuesta es lineal: por ejemplo, el riesgo de cáncer de pulmón aumenta de manera proporcional al aumento de la exposición al radón (Pérez Escalona et al., 2018: p. 236).

La gran mayoría de la dosis a los tejidos del pulmón proviene de la progenie de vida corta, principalmente  $^{218}\text{Po}$  y  $^{214}\text{Po}$ . La cantidad total depositada, de la progenie de radón inhalado, depende en varios factores como las frecuencias respiratorias individuales, el tamaño distribución de las partículas portadoras y la fracción de partículas sueltas descendientes del radón. En un intento de estimar el riesgo de cáncer de pulmón en el público general, las agencias reguladoras han extrapolado las tasas excesivas estimadas de cáncer observadas entre los mineros subterráneos a los niveles típicos de radón presentes en los hogares. Estas extrapolaciones implican una incertidumbre considerable, dado que las exposiciones de radón de los mineros subterráneos son de al menos uno o dos órdenes de magnitud superior a las experimentadas por el público general. Sin embargo, el Consejo Nacional de Investigación BEIR en su VI informe usó extrapolación basada en dos diferentes modelos de LNT para estimar que en los Estados Unidos entre 15 400 y 21 800 muertes de cáncer de pulmón por año son atribuibles a la exposición al radón, con alrededor del 90% de estas muertes ocurriendo entre los fumadores. Varios estudios de casos y controles, que investigan la exposición residencial de radón, se han realizado durante las últimas dos décadas en un intento de superar las incertidumbres inherentes a la extrapolación de los datos de los mineros de uranio. Dos grandes análisis estadísticos, uno norteamericano y el otro europeo, incorporaron datos agrupados de muchos estudios realizados en cada uno de estos respectivos continentes. Basados en siete estudios norteamericanos que combinaron un total de 4081 casos y 5281 controles, los investigadores informaron un aumento del 10-18% en las probabilidades de cáncer de pulmón por exposición al radón por cada  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ . Además, el estudio realizado en Iowa, uno de los siete estudios considerados, con un total de 413 casos y 614 controles, fue el único que mostró una clara asociación estadística entre la exposición al radón y el cáncer de pulmón. Por otro lado, el estudio de combinación europeo, que combinó datos de 13 estudios de casos y controles que incluyeron un total de 7148 casos de cáncer de pulmón y 14 208 controles, informó un rango similar de entre 8 y 16 % más de riesgo de cáncer de pulmón por cada  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  de exposición al radón según el ajuste de estos datos con el modelo LNT, un resultado que fue estadísticamente significativo. Aunque los resultados de estos grandes estudios combinados a menudo son citados como evidencia que confirma la validez del modelo LNT, al menos un estudio de casos y controles no incluido en el análisis de agrupación de América del Norte

demostró una disminución significativa del riesgo de cáncer de pulmón a niveles bajos de exposición al radón. Este estudio fue realizado en Massachusetts e incluyó un total de 200 casos y 397 controles pareados por edad y sexo. Los modelos de regresión logística, que utilizan spline cúbicos naturales, predijeron una reducción estimada del 65 % en las probabilidades de cáncer, que era estadísticamente significativo a concentraciones de radón entre 85 y 125 Bq m<sup>-3</sup>, en comparación con la exposición de referencia de 4 Bq m<sup>-3</sup>. Además, se tomaron en cuenta factores de confusión como fumar, años de residencia, educación y exposición ocupacional a carcinógenos potenciales (Thompson, 2014: p. 49).

En 2005, la *Académie des Sciences* (Academia de Ciencias) y la *Académie Nationale de Médecine* (Academia Nacional de Medicina) de Francia emitieron un informe que cuestionó la validez del modelo LNT y advirtió contra su uso en la extrapolación de los datos para estimar el riesgo de cáncer por exposiciones altas de radiación para dosis <100 mSv. Sin embargo, la mayoría de los demás organismos científicos y agencias reguladoras gubernamentales, particularmente en los Estados Unidos, continúan apoyando el uso del modelo LNT en modelos de riesgo para radón (Thompson, 2014: p. 49).

## **1.7. Métodos empleados para estimar la tasa de exhalación de <sup>222</sup>Rn**

Las mediciones de exhalación de radón son principalmente basadas en el principio de encerrar o cubrir la muestra a medir. Diferentes técnicas luego se aplican para medir la concentración de radón en el recinto. Los principales métodos empleados para estimar la tasa de exhalación de radón de las muestras son:

### **1.7.1. Método de la cámara cerrada (MCC)**

Método de la muestra encerrada

La forma más común de evaluar la tasa de exhalación de un material de construcción es guardar la muestra en un recipiente hermético y seguir el crecimiento de la concentración de radón en el volumen de aire (Petropoulos y Simopoulos, 2001: p. 4).

Método acumulador

Otra técnica común para medir la tasa de exhalación de radón de losas de concreto es sellar un recipiente (llamado en este caso un acumulador) a una parte del área de exhalación y medir el crecimiento de radón dentro del contenedor. En este método los efectos de retrodifusión y fuga son aún más pronunciados (Petropoulos y Simopoulos, 2001: p. 4).



### **1.7.2. Método de la cámara abierta (MCA)**

Las mediciones se realizan en contenedores o acumuladores bien ventilados en condiciones de concentración cercanas a cero. El gas del recipiente o acumulador se elimina continuamente mediante una bomba de flujo constante, lo que proporciona una tasa de intercambio de gas conocida.

## **1.8. Recomendaciones y gestión**

Hay varios métodos disponibles para remediar los altos niveles de radón en la casa. Un método recomendado por La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), llamada succión del suelo, evita que el radón ingrese a la casa extrayéndolo del suelo debajo de los cimientos y ventilándolo a través de tuberías hacia el aire exterior (Thompson, 2014: p. 50).

## **1.9. Normativa sobre los niveles de radón**

Los efectos nocivos producidos por la exposición de radón, en particular la exposición residencial, es un tema que involucra organizaciones que se ocupan de la protección radiológica. A continuación, se presenta los niveles de actividad radioactiva del radón recomendados por estas organizaciones internacionales. Además, se incluirá la legislación presente en Ecuador.

### **1.9.1. Organismos internacionales**

#### *The European Nuclear Energy Community (EURATOM)*

La Comunidad Europea de Energía Nuclear, en particular, la Directiva EURATOM/2013/59 respecto a las situaciones de exposición existentes que supongan una exposición al radón, establece los niveles de referencia en términos de la concentración de actividad de radón en el aire para miembros de la población y para los trabajadores.

Artículo 74: Exposición al radón en recintos cerrados; “Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados. Los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superarán los  $300 \text{ Bqm}^{-3}$  (EURATOM, 2014: p. 31).”

Artículo 54: Radón en los lugares de trabajo; “Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados en los lugares de trabajo. El nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no

superará los 300 Bqm<sup>-3</sup>, a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional (EURATOM, 2014: p. 25).”

La directiva menciona aplicar uno de estos puntos, en particular 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 de la exposición radón en ambientes cerrados procedente 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<sup>-3</sup> en construcciones antiguas y menor a 200 Bq m<sup>-3</sup> en las nuevas construcciones (Yousef et al., 2015: p. 32).

#### *The Environmental Protection Agency (EPA)*

La Agencia de Protección Ambiental (EPA), en junio de 2003 en el Registro Federal EPA 402-R-03-003, recomienda que para reducir los riesgos de radón en el aire interior en hogares y edificios (donde el problema es mayor), los niveles de concentración de radón indoor sean menores a 148 Bqm<sup>-3</sup>. En esta acción, la Agencia de Protección Ambiental propone que, aunque los riesgos absolutos estimados son mucho más altos para los fumadores que para los no fumadores, los riesgos relativos estimados son más altos para los no fumadores. (EPA, 2003: p. 13).

#### *The World Health Organization (WHO)*

La Organización Mundial de la Salud (OMS), A la luz de los datos científicos más recientes, la OMS propone un nivel de referencia de 100 Bqm<sup>-3</sup> para minimizar los riesgos para la salud derivados a la exposición al radón en interiores. Si dicho nivel no pudiera alcanzarse en las actuales circunstancias concretas del país, el nivel de referencia elegido no deberá superar en ningún caso los 300 Bqm<sup>-3</sup>, que equivale aproximadamente a 10 mSv/año según cálculos recientes de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) (OMS, 2015: p. 13).

### **1.9.2. Legislación en Ecuador**

Ecuador es un interés particular, no tiene leyes para controlar la exposición de la población al gas radón proveniente de los materiales de construcción. Este apartado contempla, de manera general, normas enfocadas a la radiación ionizante utilizada en la medicina y la industria.

Este reglamento de seguridad radiológica, redactado el 8 de agosto de 1979 por el Consejo Supremo de Gobierno, tiene por objeto proteger contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes a la población del país, en general, y en particular, a las personas que trabajan con dichas radiaciones.

Art. 1.- Dosis máxima permitida para personas ocupacionalmente expuestas; No se podrá usar fuentes de radiación que den lugar a que una persona ocupacionalmente expuesta, reciba una dosis de radiación en exceso de los límites especificados en la Tabla (1-1) (CEEA, 2005: p. 5).

La Tabla (1-1) presenta la dosis límite permitida para el personal médico ocupacionalmente expuesto.

**Tabla 1-1:** Dosis limite permitida para personal ocupacional expuesto (POE).

<b>Órgano</b>	<b>Dosis máxima permitida</b>
Cuerpo entero, gónadas, medula ósea	50 rem/año - 3 rem/trimestre
Hueso, piel de todo el cuerpo, tiroides	30 rem/año – 15 rem/trimestre
Manos, antebrazos, pies, tobillos	75 rem/año – 40 rem/trimestre
Todos los otros órganos	15 em/año – 8 rem/trimestre

Fuente: CEEA, 2005.

Realizado por: Gualli, William, 2021.

Este registro, contempla, entre otras cuestiones, la protección contra la radiación, los radioisótopos como fuentes abiertas y como fuentes cerradas, las máquinas de rayos X en general, las máquinas de rayos X en medicina, las máquinas generadoras de radiaciones y partículas nucleares de cualquier tipo, las normas para el personal que trabaja en el campo de las radiaciones y las sanciones a las infracciones cometidas a lo estipulado en el reglamento.

#### Acuerdo Ministerial N°238

El Acuerdo Ministerial N.283 promulgado en 2016 por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables de Ecuador (MEER) a través de la Subsecretaria de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), autoridad reguladora que controla y regula todas las actividades que usan en forma pacífica las radiaciones ionizantes en el país, redacta una norma técnica para la gestión segura de los desechos radiactivos y fuentes radiactivas selladas en desuso. Además, posee un

apartado donde se hace referencia a los procesos en cuales existen desechos de carácter radiactivo específicamente de origen natural (NORM) y en su Artículo 20 y 31 se pronuncia acerca del procedimiento de manejo de desechos radiactivos y la correcta gestión que se debe cumplir. Adicionalmente, establece un valor máximo 0,3 mSv/año para todos los materiales de desechos radioactivos informados (MEER, 2007: p. 30).

Este Acuerdo Ministerial es un extracto de las recomendaciones internacionales dadas por el organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

### **1.10. Arena de río**

La arena es un tipo de árido compuesto por sílice o dióxido de silicio, cuyo tamaño varía entre los 4.75 y 0.075 mm dependiendo del uso para el que sea destinada, generalmente la arena tiene un origen natural: es extraída de canteras aluviales, ríos, lagos o depósitos volcánicos, pero también se puede obtener en forma artificial mediante la trituración de rocas por medios mecánicos. La arena fina se utiliza para mampostería, mientras que la arena gruesa se utiliza en la industria de la construcción para fabricar pisos o como parte de la cimentación, ya que tiene la cualidad de reducir las fisuras que aparecen en la mezcla al endurecerse (Adame, 2021: p. 93). La Figura (4-1) muestra la extracción de arena de río mediante una retroexcavadora en una mina ubicada a los alrededores del río Chambo, cantón Penipe.



**Figura 4-1:** Extracción de arena en el río Chambo

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

Los suelos que presentan nuestra área de estudio, son suelos arenosos derivados del arrastre de flujos piroclásticos, por las corrientes de los deshielos, desde las faldas del volcán Chimborazo. Esta arena es extraída directamente del río, tamizada en arena fina o gruesa, secada por el sol y

luego transportada en volquetas. Existen tres tipos de definiciones para la arena a utilizar en construcción:

**Arena 20-30:** Arena normalizada, gradada para pasar predominantemente por el tamiz de 850  $\mu\text{m}$  (No. 20) y ser retenida en el tamiz de 600  $\mu\text{m}$  (No. 30).

**Arena gradada:** Arena normalizada, gradada para pasar predominantemente entre el tamiz de 600  $\mu\text{m}$  (No. 30) y el tamiz de 150  $\mu\text{m}$  (No. 100).

**Arena normalizada:** Arena de sílice, compuesta en su mayoría de granos de cuarzo casi puro, redondeados naturalmente.

Esta determinación es necesaria cuando se sospecha la contaminación de la arena y para disminuir características indeseables que incorporen aire. La utilización de arena lavada o sin lavar en la elaboración de morteros tiene una diferencia del 7 % en la resistencia de los morteros (NTE INEN 873, 2017: p. 2).

Para nuestro caso; tomando en consideración la accesibilidad de los materiales, la relevancia del tamaño del grano de arena en la difusión de radón y las normas de construcción para agregados gruesos y finos, se utilizará un tamiz No. 35 (500  $\mu\text{m}$ ) que se encuentra presente en el Laboratorio de Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio de esta investigación está constituida por el río Chambo, principal sistema hidrográfico de la provincia de Chimborazo, y los ríos; Guamote, Chibunga, Guano, Sicalpa, San Juan y Blanco.

- a) Río Chambo, recorre la provincia de Chimborazo de sur a norte, con una longitud de unos 273 Km. Este río tiene su origen en la subcuenca Chambo que forma parte de la cuenca alta del río Pastaza.
- b) Río Guamote, se origina en un desaguadero subterráneo de la laguna de Colta y nace muy cerca de la orilla sur de la misma. Se une con el río Cebadas para finalmente unirse al río Chambo.
- c) Río Chibunga, nace de vertientes ubicadas en las faldas del Chimborazo y desciende por los páramos de El Arenal hasta llegar a zonas agrícolas en el sector de la parroquia San Juan, como Las Caleras y Shobol, entre otras.
- d) Río Guano, proviene de una microcuenca parte de la subcuenca del río Chambo, este río desemboca en el Chambo y consta como un forzante hidrológico presente en el sistema acuífero de este.
- e) Río Sicalpa, forma parte de la subcuenca del río Chambo y se encuentra en la parroquia Sicalpa, cantón Colta.
- f) Río San Juan, este recurso hídrico se encuentra en la parroquia Villa La Unión, cantón Colta.
- g) Río Blanco, se encuentra localizada en la provincia de Chimborazo en la parroquia Quimiag. Recorre los cantones Riobamba, Chambo y Penipe.

La Tabla (1-2) presenta las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo en grados, minutos y segundos (DMS).

**Tabla 1-2:** Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo

Río	Puntos de muestreo	Coordenadas geográficas
CHAMBO	Minería suerte	1°33'22.3"S 78°32'59.0"W

CHAMBO	Mina Hnos. moreno	1°33'23.1"S 78°32'07.8"W
GUANO	Parque de las fuentes	1°36'32.8" S78°38'40.7"W
GUAMOTE	Entrada de la ciudad	1°56'22.2"S78°39'10.8"W
SICALPA	Alado del mercado central	1°42'00.5" S78°46'26.2"W
BLANCO	Finca Blanquita	1°38'85.2"S78°39'13.5"W
SAN JUAN	Comuna Colta	1°43'58.2"S78°39'22.4"W
CHIBUNGA	Parque ecológico	1°41'21.0" S78°39'01.2"W

Realizado por: Gualli, William, 2021.

## 2.2. Procedimiento de muestreo

El procedimiento de muestreo para arena de río consta de las siguientes etapas:

### a) Recolección de muestras

Se utilizó contenedores plásticos comerciales de 5L estándar con cubierta, para la recolección de las muestras de arena. Dependiendo del lugar de extracción, se procedió de la siguiente forma:

#### i) Muestreo en minas y canteras

Se tomó una muestra de 2 kg de arena lista para su comercialización y uso en construcción.

#### ii) Muestreo directo

Se seleccionó una zona del río de fácil acceso para extraer una muestra de 2 kg a una profundidad aproximada de 15 cm.

### b) Etiquetado y transporte de muestras

Las muestras de arena fueron etiquetadas de manera independiente, con un código único, compuesto por la letra "R", seguido de las dos primeras consonantes del nombre del río, y finalmente el número de muestra. La Tabla (2-2) muestra el código utilizado en cada muestra de arena.

**Tabla 2-2:** Código único de cada muestra de arena

<b>Nombre del río</b>	<b>Número de muestra</b>	<b>Código muestra</b>
Chambo	01	RCH1
Chambo	02	RCH2
Guamote	01	RGM1
Guano	01	RGN1
Sicalpa	01	RSC1
Blanco	01	RBL1
San Juan	01	RSJ1
Chibunga	01	RCB1

**Realizado por:** Gualli, William, 2021.

Se transportó los contenedores plásticos sellados hasta el laboratorio de Técnicas Nucleares para su posterior análisis.

### **2.3. Procedimiento de preparación de las muestras**

#### **a) Secado de las muestras**

Se colocó la arena de río en platos de aluminio y se llevó a la estufa por 24 horas a una temperatura de 125°C. Al finalizar el tiempo de secado, retiramos los platos de aluminio de la estufa y dejamos que se enfríe la arena. Todo este proceso se realizó en el laboratorio de Biorremediación de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

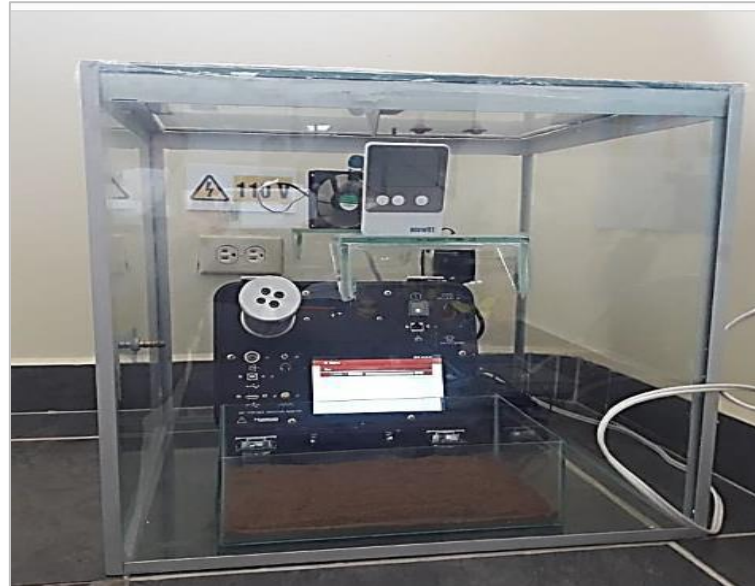
#### **b) Tamizado de las muestras**

La arena seca se pasó por un tamiz No. 35 (500 µm) y se almacenó manteniendo el mismo código especificado anteriormente.



## 2.4. Configuración experimental de la técnica de cámara cerrada

La Figura (1-2) presenta la configuración experimental de la técnica de cámara cerrada que incluye; un recipiente de vidrio, el equipo de detección de radón compuesto por una celda de Lucas (Modelo 600P), y un monitor AB7.



**Figura 1-2:** Configuración experimental de la cámara cerrada

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

### Cámara de vidrio

La cámara fue elaborada con seis láminas de vidrio incoloro. Cada lámina posee un área de 50 x 50 cm<sup>2</sup>. El volumen de la cámara es de 125 l. La hoja superior es movable para insertar la muestra y la instrumentación. Dentro de esta cámara se encuentra un ventilador de 12 V utilizado para homogenizar el aire dentro de la cámara, y un recipiente de vidrio donde se colocan las muestras de arena de río.

### Monitor AB7

El monitor de radón AB7 producido por Pylon Electronics Inc., es un instrumento de laboratorio que permite una medición rápida y precisa de los niveles de radón. Este monitor de lectura continua, cuenta con una celda de centelleo sensible a tres isótopos radiactivos: radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), gas torón ( $^{220}\text{Rn}$ ) y gas actinón ( $^{219}\text{Rn}$ ). En la Figura (2-2) se observa el monitor AB7, el cual se acopla al detector de centelleo modelo 600P.



**Figura 2-2: Radon Monitor AB7**

**Fuente:** PYLON ELECTRONICS, 2011.

Este 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. Además, nos permite recopilar información sobre la temperatura y la humedad relativa durante la medición del radón (Pylon Electronics Inc., 2011: pp. 9-10). El Anexo A presenta las características técnicas de este equipo.

### **Celda de Lucas 600P**

Es una célula de centelleo particular proporcionada por PYLON Electronics. Esta celda de centelleo pasivo, es un cilindro de metal con cuatro orificios en un lado y se abre en el otro. Los cuatro orificios pequeños tienen una barrera de espuma de polietano a prueba de luz y el extremo abierto encaja contra el fotomultiplicador contenido en el pilón AB-7. El aire pasa a través de la barrera y se deposita dentro del cilindro, luego las partículas alfa, provenientes de la descomposición del radón, siguen el mismo proceso de centelleo explicado anteriormente (Pylon Electronics Inc., 2011: p. 47). El Anexo B presenta las características técnicas de esta celda de centelleo.

## 2.5. Metodología de medición de la tasa de exhalación $^{222}\text{Rn}$ en arena de río

El procedimiento para determinar la tasa de exhalación de radón, consiste en encerrar una muestra, junto con el detector, dentro de la cámara de vidrio y sellar herméticamente. En el caso particular de la arena de río se procedió de la siguiente forma:

- Se colocó la muestra de arena en un recipiente de vidrio (hasta una altura de 4 cm).
- Se pesó la muestra de arena y se la ubicó junto con el equipo de detección de radón dentro de la cámara de vidrio.
- Se seleccionó una medición a intervalos de una hora en el panel de control del monitor AB7.
- Con ayuda de la tapa de vidrio, se selló herméticamente la cámara de vidrio y se registró la hora y fecha de inicio.
- Al concluir el período de medición de 4 días, se retiró la tapa de vidrio y se anotó la fecha y hora de finalización.
- Con los datos obtenidos en las 20 primeras horas de medición, se calculó la exhalación de radón de cada muestra de arena.

### Planteamiento teórico

Según el resumen de Stranden (1988), la forma para poder determinar la exhalación de radón de una muestra de material de construcción dentro de una cámara cerrada; es seguir el crecimiento de la concentración de radón en el volumen de aire. Idealmente, la concentración de radón en el volumen de la cámara “V” ( $\text{m}^3$ ) se describe mediante la siguiente ecuación:

*Ecuación 1-2: Concentración de Rn en un volumen de aire libre.*

$$C = C_0 e^{(-\lambda^* t)} + E [1 - e^{(-\lambda^* t)}] (\lambda^* V)^{-1}$$

Fuente: (Petropoulos, Anagnostakis y Simopoulos, 2001: p. 4).

Donde:

C= la concentración total de radón ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) en el contenedor en el tiempo de crecimiento t(h)

E= Tasa de exhalación ( $\text{Bq h}^{-1}$ )

$\lambda^*$  = constante de desintegración efectiva ( $\text{h}^{-1}$ ) que considera los efectos de fuga y retrodifusión:  $\lambda^* = \lambda + \lambda_{b,l}$ . Donde, “ $\lambda$ ” es la constante de desintegración del radón y, “ $\lambda_{b,l}$ ” es una constante de desintegración que corrige la eliminación de radón de primer orden mediante la retrodifusión “b” y la fuga “l”.

$C_0$  = la concentración inicial de radón ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) en el contenedor en el momento t (0h). Es decir, el Background o fondo.

La Ecuación (1-2) se derivó respecto al tiempo y el resultado se igualó a una pendiente inicial experimental “ $m_e$ ”. Obteniendo la Ecuación (2-2).

*Ecuación 2-2: Resultado de la derivada de la Ecuación (1-2).*

$$\frac{dC}{dt} = m_e = e^{(-\lambda^*t)}[-C_0 \lambda^* + E(V)^{-1}]$$

$t \rightarrow 0$

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

Donde:

$m_e$  = Pendiente inicial de la curva de crecimiento de radón dentro de la cámara ( $Bq m^{-3} h^{-1}$ ). Se calculó con los datos obtenidos de las 20 primeras horas de medición, mediante un ajuste lineal de mínimos cuadrados.

$\lambda^*$  = Para nuestro caso, la constante de desintegración efectiva solo considera la tasa de fuga e ignora los efectos de retrodifusión por dos factores:

1) El tiempo de acumulación de radón dentro de la cámara (20 h) es menor al tiempo de vida media del  $^{222}\text{Rn}$ .

2) El volumen de la cámara de vidrio es mucho mayor que el volumen de la muestra.

Tomando en cuenta estos dos factores se puede considerar la retrodifusión despreciable. Por lo tanto,  $\lambda^* = \lambda + \lambda_l$ .

En la Ecuación (2-2) si “t” tiende a cero, se obtiene:

*Ecuación 3-2: Pendiente inicial experimental “ $m_e$ ”.*

$$m_e = -C_0(\lambda + \lambda_l) + E(V)^{-1}$$

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

Para finalizar, se despejó la exhalación de radón “E” de la Ecuación (2-2). Obteniendo:

*Ecuación 4-2: Exhalación de radón “E” dentro de una cámara cerrada.*

$$E = V[m_e + C_0(\lambda + \lambda_l)]$$

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

Donde:

E = Es la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  dentro de la cámara cerrada ( $Bq h^{-1}$ )

V = Volumen de aire disponible dentro de la cámara. Se obtuvo con la diferencia del volumen total de la cámara y el volumen del monitor AB7, la celda de lucas, el recipiente de vidrio, y el ventilador. El Volumen efectivo de la cámara cerrada es  $(0.112 \pm 0.001) m^3$

$C_0$  = Concentración de radón de fondo dentro de la cámara. Se realizó un experimento de medición de fondo dentro de la cámara “vacía” por un período de 5 días, obteniendo un valor de  $(45 \pm 6) \text{ Bq m}^{-3}$ .

$\lambda_l$  = La tasa de fuga " $\lambda_l$ " se obtuvo en el marco del proyecto “**Evaluación de elementos radiactivos de la serie del  $^{238}\text{U}$  en el ambiente en pacientes con cáncer**” y tiene un valor de  $(0.0028 \pm 0.003) \text{ h}^{-1}$ .

$\lambda$  = la constante de desintegración “ $\lambda$ ”, se calculó utilizando el tiempo de vida media del  $^{222}\text{Rn}$  y transformando el resultado a horas. Se obtuvo un valor de  $(0.0076) \text{ h}^{-1}$ .

## 2.6. Cálculo de la tasa de exhalación superficial

Para el cálculo de tasa de exhalación superficial “ $E_x$ ”, se divide la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  para el área de exhalación de la muestra (recipiente de vidrio):

*Ecuación 5-2: Tasa de exhalación superficial de  $^{222}\text{Rn}$ .*

$$E_x = \frac{E}{A}$$

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

Donde:

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

$E$ = Tasa de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  dentro de la cámara ( $\text{Bq h}^{-1}$ ).

$A$ = área de exhalación de la muestra ( $0.0585 \pm 0.0005) \text{ m}^2$ .

## 2.7. Cálculo de la tasa de exhalación másica

Para el cálculo de tasa de exhalación másica “ $E_m$ ”, se divide la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  para la masa de la muestra de arena:

*Ecuación 6-2: Tasa de exhalación másica de  $^{222}\text{Rn}$ .*

$$E_m = \frac{E}{M}$$

**Realizado por:** Gualli, W. 2021.

Donde:

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

$E$ = Tasa de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  dentro de la cámara ( $\text{Bq h}^{-1}$ ).

$M$ = Peso de la muestra de arena de río ( $\text{Kg}$ ).

## 2.8. Contribución a la concentración de radón *Indoor*

La contribución de la arena de río a la concentración de radón *Indoor*, se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

*Ecuación 7-2: Contribución de la concentración de Rn Indoor.*

$$C_{Rn} = \frac{E_x * S}{V * \lambda_v}$$

Fuente:(Mahur et al., 2008, p. 5).

Donde:

$C_{Rn}$  = Concentración de radón en ambientes interiores a partir de la exhalación de radón ( $Bq\ m^{-3}$ ).

$\lambda_v$  = Tasa de intercambio de aire (se asume normalmente como  $0.5\ h^{-1}$ .)

$V$  = Volumen de una habitación estándar ( $m^3$ )

$E_x$  = Tasa de exhalación superficial de radón ( $Bq\ h^{-1}m^{-2}$ ).

$S$  = Área de exhalación de radón ( $m^2$ ).

En los cálculos, se asumió que la habitación es una cavidad con  $\frac{S}{V}$  igual a  $2m^{-1}$ .

## 2.9. Dosis efectiva anual promedio por inhalación de $^{222}Rn$

La dosis efectiva anual debido a la inhalación de radón es:

*Ecuación 8-2: Dosis efectiva anual por inhalación de  $^{222}Rn$*

$$D_a = C_{Rn} * 0.4 * 7000h * 9nSv$$

Fuente:(UNSCEAR, 2010, p. 107).

Donde:

$D_a$  = Dosis anual efectiva anual por inhalación de  $^{222}Rn$  (nSv).

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

0.4 = factor de equilibrio para interiores.

7000h = Tiempo medio en horas que la persona inhala el  $^{222}Rn$  en un año.

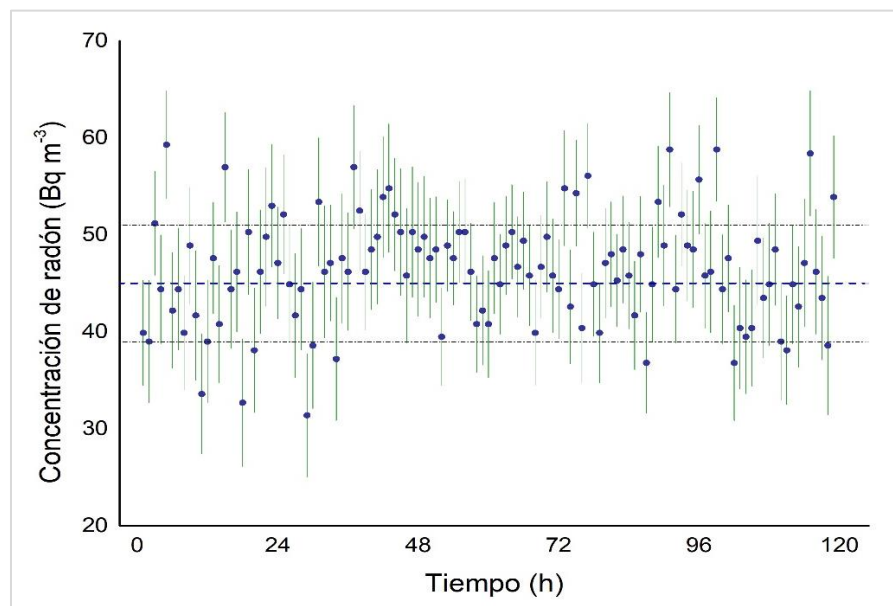
9nSv = Factor de conversión de dosis.

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Concentración de radón de fondo dentro de la cámara (Background)

El Gráfico 1-3 muestra la concentración de radón de fondo dentro de la cámara vacía, medida durante 5 días, con un intervalo de medida de una hora. Se observó una concentración media de  $(45 \pm 6) \text{ Bq m}^{-3}$  ( $1 \sigma$ ).

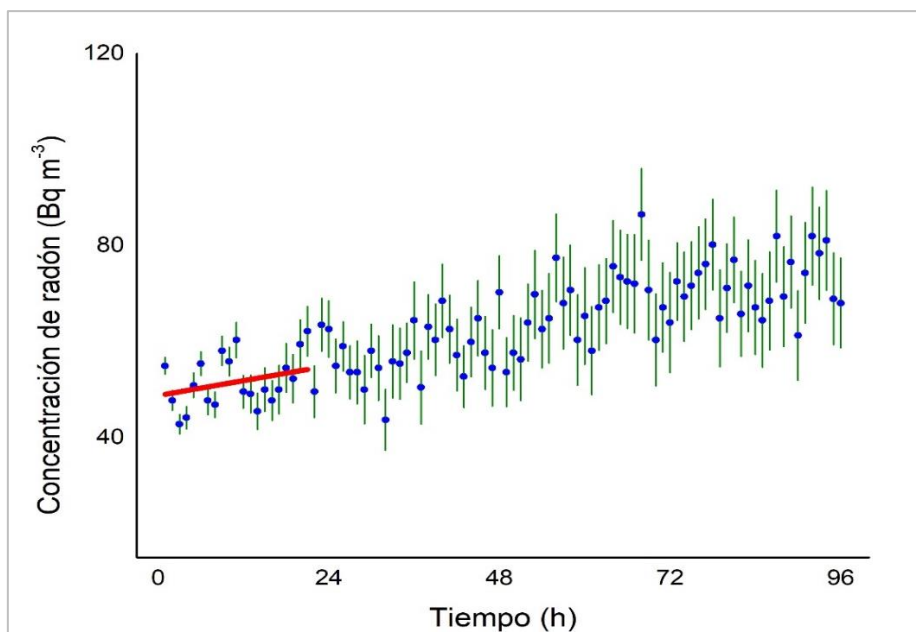


**Gráfico 1-3:** Concentración media de radón dentro de la cámara vacía

Realizado por: Gualli, W. 2022.

#### 3.2. Curva de acumulación de radón

El Gráfico (2-3) presenta, a manera de ejemplo, la curva de acumulación de radón dentro de la cámara en función del tiempo de la muestra de arena del río Guamote, usando la metodología explicada en la Sección (2.5) del Capítulo II.

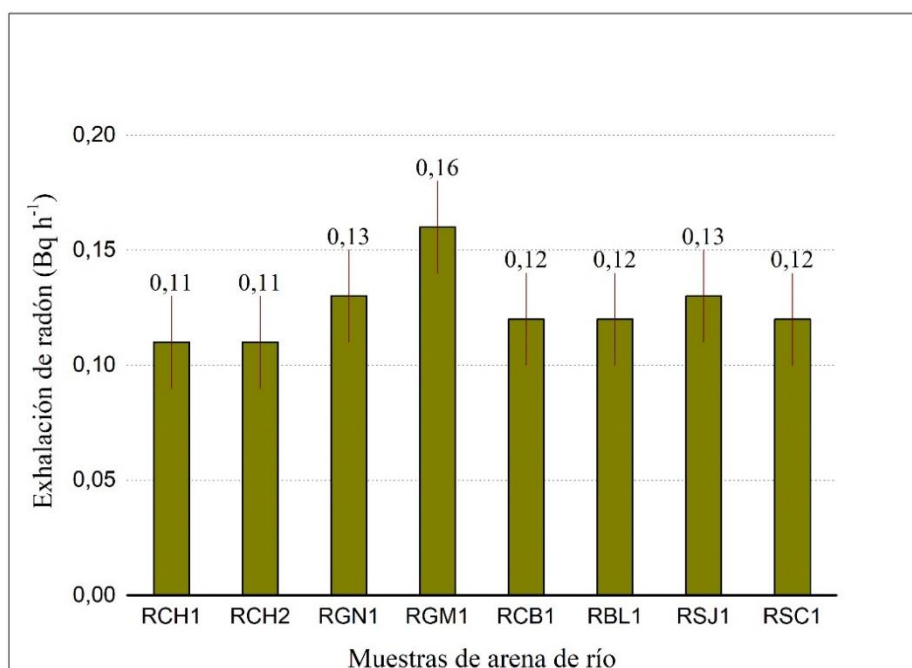


**Gráfico 2-3:** Curva de acumulación de  $^{222}\text{Rn}$  de la muestra de arena del río Guamote

Realizado por: Gualli, W. 2022.

### 3.3. Exhalación de $^{222}\text{Rn}$

En el Gráfico (3-3) se puede observar los resultados de las tasas exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  de las muestras estudiadas utilizando la Ecuación (4-2).



**Gráfico 3-3:** Exhalación de radón de las muestras de arena de río

Realizado por: Gualli, W. 2022.



### 3.4. Tasa de exhalación superficial de $^{222}\text{Rn}$

La Tabla (1-3) presenta los resultados de las tasas de exhalación superficial, el valor mínimo corresponde a las muestras del río Chambo ( $1.83 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) y el valor máximo, a la muestra del río Guamote ( $2.69 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ).

**Tabla 1-3:** Tasa de exhalación superficial de radón-222 de las muestras de río

Código Muestra	Río	Tasa de exhalación superficial ( $\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )	Error absoluto ( $\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
RCH1	Chambo	1,83	0,52
RCH2	Chambo	1,83	0,49
RGN1	Guano	2,29	0,60
RGM1	Guamote	2,69	0,63
RCB1	Chibunga	2,13	0,64
RBL1	Blanco	2,06	0,58
RSJ1	San juan	2,30	0,54
RSC1	Sicalpa	2,05	0,56

Realizado por: Gualli, William, 2021.

### 3.5. Tasa de exhalación másica de $^{222}\text{Rn}$

La Tabla (2-3) muestra las tasas de exhalación másica de  $^{222}\text{Rn}$  de las muestras de arena. El rango de valores va desde  $0.03$  a  $0.04 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

**Tabla 2-3:** Tasa de exhalación másica de  $^{222}\text{Rn}$  de las muestras de arena

Código Muestra	Río	Tasa de exhalación másica ( $\text{Bq h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )	Error absoluto ( $\text{Bq h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )
RCH1	Chambo	0,03	0,01

RCH2	Chambo	0,03	0,01
RGN1	Guano	0,04	0,01
RGM1	Guamote	0,04	0,01
RCB1	Chibunga	0,03	0,01
RBL1	Blanco	0,03	0,01
RSJ1	San juan	0,04	0,01
RSC1	Sicalpa	0,03	0,01

Realizado por: Gualli, William, 2021.

### 3.6. Contribución a la concentración de $^{222}\text{Rn}$ “Indoor”

En la Tabla (3-3) se observa que en la muestra de arena RCH1, del río Chambo, presenta la contribución más baja ( $7.32 \pm 2,09$ )  $\text{Bq m}^{-3}$ , y la muestra de arena RGM1, del río Guamote, presenta la contribución más alta ( $10.76 \pm 2.52$ )  $\text{Bq m}^{-3}$ .

**Tabla 3-3:** Contribución a la concentración de radón *Indoor* de las muestras

Código Muestra	Río	Contribución de la concentración de radón ( $\text{Bq m}^{-3}$ )	Error absoluto ( $\text{Bq m}^{-3}$ )
RCH1	Chambo	7,32	2,09
RCH2	Chambo	7,33	1,96
RGN1	Guano	9,16	2,38
RGM1	Guamote	10,76	2,52
RCB1	Chibunga	8,51	2,57
RBL1	Blanco	8,25	2,31
RSJ1	San juan	9,22	2,15
RSC1	Sicalpa	8,20	2,24

Realizado por: Gualli, William, 2021.

### 3.7. Dosis efectiva anual

En la Tabla (5-3) se encuentran los valores de dosis efectiva debido a la exhalación de gas  $^{222}\text{Rn}$  desde las muestras de arena. El valor más bajo se presenta en las muestras de arena (RCH1 y RCH2) pertenecientes al río Chambo, con valores similares de  $(0.18 \pm 0.05) \text{ mSv y}^{-1}$ . La dosis más alta se observó en la muestra RGM1, del río Guamote, con una dosis efectiva anual de  $(0.27 \pm 0.06) \text{ mSv y}^{-1}$ .

**Tabla 4-3:** Dosis efectiva anual de las muestras de arena

Código Muestra	Río	Dosis efectiva anual ( $\text{mSv y}^{-1}$ )	Error absoluto ( $\text{mSv y}^{-1}$ )
RCH1	Chambo	0,18	0,05
RCH2	Chambo	0,18	0,05
RGN1	Guano	0,23	0,06
RGM1	Guamote	0,27	0,06
RCB1	Chibunga	0,21	0,06
RBL1	Blanco	0,21	0,06
RSJ1	San juan	0,23	0,05
RSC1	Sicalpa	0,21	0,06

**Realizado por:** Gualli, William, 2021.

## CONCLUSIONES

Las tasas de exhalación superficial y másica de las muestras de arena de los ríos Chambo, Guamote, Guano, Chibunga, San Juan, Blanco, Sicalpa, calculadas mediante un fit lineal de las veinte primeras horas de la curva de acumulación de gas radón dentro de la cámara, presentan valores medios de  $2,1 \pm 0,3 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ( $1 \sigma$ ) y  $0,03 \pm 0,01 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ( $1 \sigma$ ) respectivamente, por lo que se concluye que, *existe muy poca variabilidad de la exhalación en las muestras provenientes de los diferentes ríos.*

El cálculo de la contribución de la arena de río a la concentración de radón en interiores, considerando una habitación como una cavidad, con un área de exhalación el doble del volumen, y una tasa de intercambio de aire de  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , muestra un valor máximo de  $10,8 \pm 2,5 \text{ Bq m}^{-3}$ , correspondiente al río Guamote, por lo que se concluye que, *la contribución máxima es pequeña respecto al nivel de referencia ( $300 \text{ Bq m}^{-3}$ ) establecido por la Unión Europea en la directiva EURATOM 2013/59.*

La dosis efectiva anual causada por la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  de la arena del río Chambo y sus afluentes, va desde 0.18 hasta  $0,27 \text{ mSv y}^{-1}$ , por lo que es evidente que, *la dosis efectiva anual de este material de construcción es inferior al valor de referencia para el fondo de radioactividad natural ( $1,1 \text{ mSv y}^{-1}$ ) (UNSCEAR, 2006).*

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar estudios de la arena proveniente de ríos de otras regiones del país.

Se recomienda evitar el muestreo directo en los ríos, y recoger las muestras directamente de las minas o canteras.

## GLOSARIO

**Carcinógeno:** es un agente con la capacidad de causar cáncer en humanos. Los carcinógenos pueden ser naturales, como la aflatoxina que es producida por un hongo y a veces se encuentran en el grano almacenados, o artificiales, como el asbesto o el humo del tabaco. Los carcinógenos actúan interactuando con el ADN de una célula e induciendo mutaciones genéticas (Institute National Human Genome Research, 2020, p. 1).

**Carcinogenicidad:** Capacidad que presenta un determinada sustancia o agente que puede considerarse como carcinogénica para el hombre. Se dispone de suficientes elementos para suponer que la exposición del hombre a tales sustancias puede producir cáncer. Dicha presunción se fundamenta generalmente en estudios apropiados a largo plazo en animales y/o en otro tipo de información pertinente (INSST, 1999, p. 2).

**Genotóxico:** Tóxico (dañino) para el ADN. Las sustancias genotóxicas pueden unirse directamente al ADN o actuar indirectamente mediante la afectación de las enzimas involucradas en la replicación del ADN y causando, en consecuencia, mutaciones que pueden o no desembocar en un cáncer. Las sustancias genotóxicas no son necesariamente cancerígenas, pero la mayor parte de los cancerígenos son genotóxicos (GreenFacts, 2010, p. 1).

**Isótopo:** Forma de un elemento químico en el que los átomos tienen el mismo número de protones (partes del núcleo de un átomo), pero un número diferente de neutrones (partes de núcleo de un átomo) (Cancer.gov, 2002, p. 1).

**Neurotoxicidad:** es un término que hace referencia a aquellas alteraciones funcionales, estructurales y bioquímicas producidas en el SN y que conllevan a la manifestación de diferentes clases de efectos adversos como consecuencia de una exposición a un producto químico (Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales de España, 1998, p. 2).

**Radiación:** Es una forma de emisión, propagación de energía la cual es transferida en cualquier medio, en forma de ondas electromagnéticas o partículas (Foronuclear.org, 2021, p.4).

**Radioactividad:** Es una reacción nuclear la cual consiste en una descomposición espontanea de un radionúclido el cual es inestable, al momento de decaer este suele emitir radiación, decayendo en un elemento más estable, a este fenómeno de decaimiento se lo atribuye la radioactividad (Foronuclear.org, 2021, p.3).

**Oncogen:** es un gen que ha mutado y contribuye al desarrollo de un cáncer. En su estado normal, no mutado, los oncogenes son llamados proto-oncogenes. Juegan un papel importante en la regulación de la división celular (Institute National Human Genome Research, 2020, p. 3).

## BIBLIOGRAFÍA

**ADAME, B.** "Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen". *Novasinería Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología* [en línea], 2021, (Ecuador) 4 (1), pp. 91-10. [Consulta: 08 diciembre 2021]. ISSN 2361-2654. Disponible en: DOI 10.37135/ns.01.07.05.

**BIKIT, I., et al.** "Granulation effects on the radon emanation rate". *Radiation Protection Dosimetry* [en línea], 2011, (Serbia) 145 (2), pp. 184-188. [Consulta: 10 diciembre 2021]. ISSN 01448420. Disponible en: DOI 10.1093/rpd/ncr055.

**CANCER.GOV.** *DICCIONARIO DE CÁNCER:ISOTOPO* [blog] 2002. [Consulta: 11 marzo 2022]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/isotopo>.

**CEEA.** *REGLAMENTO DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA (Decreto Supremo No. 3640)* [blog]. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: [http://www.calidadsalud.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/Doc/normativa\\_general/DECRETO\\_3640\\_REGLAMENTO\\_DE\\_SEGURIDAD\\_RADIOLÓGICA.pdf](http://www.calidadsalud.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/Doc/normativa_general/DECRETO_3640_REGLAMENTO_DE_SEGURIDAD_RADIOLÓGICA.pdf).

**CHAO, C.Y.H., et al.** "Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests". *Building and Environment* [en línea], 1997, (China) 32 (4), pp. 355-362. [Consulta: 08 diciembre 2021]. ISSN 03601323. Disponible en: DOI 10.1016/S0360-1323(96)00071-6.

**EPA.** *EPA Assessment of Risks from Radon in Homes* [blog]. Washington, DC 20460, 2003. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/402-r-03-003.pdf>.

**EURATOM.** *DIRECTIVA 2013/59/EURATOM* [blog]. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>.

**FORONUCLEAR.ORG.** *Sobre protección radiológica y radiación* [blog]. 2021. [Consulta: 11 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-proteccion-radiologica-y-radiacion/que-es-la->





radio se desintegra.

**MAHUR, A.K., et al.** "An investigation of radon exhalation rate and estimation of radiation doses in coal and fly ash samples". *Applied Radiation and Isotopes* [en línea], 2008, (India) 66 (3), pp. 401-406. [Consulta: 12 diciembre 2021]. ISSN 09698043. Disponible en: DOI 10.1016/j.apradiso.2007.10.006.

**MARIA, B.** NTP 440: Radón en ambientes interiores. *Ministerio de trabajo y asuntos sociales de España* [en línea], 1995, pp. 1-7. Disponible en: [https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp\\_440.pdf](https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_440.pdf).

**MEER.** 2007. *NORMA TECNICA GESTION DESECHOS RADIATIVOS* [en línea]. 2007. Quito - Ecuador: s.n. Disponible en: [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-11/Documento-Acuerdo\\_283\\_NORMA TECNICA GESTION DESECHOS RADIATIVOS.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-11/Documento-Acuerdo_283_NORMA TECNICA GESTION DESECHOS RADIATIVOS.pdf).

**MINISTERIO DEL TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES DE ESPAÑA. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO: NEUROTOXICIDAD** [blog]. 1988. [Consulta: 11 marzo 2022]. Disponible en: [https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp\\_487.pdf/29ee25da-9b1b-43c7-be49-0b0a176ef4b5?version=1.0&t=1614698355743#:~:text=La neurotoxicidad es un término,exposición a un producto químico](https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_487.pdf/29ee25da-9b1b-43c7-be49-0b0a176ef4b5?version=1.0&t=1614698355743#:~:text=La neurotoxicidad es un término,exposición a un producto químico).

**NTE INEN 873.** *Arena Normalizada. Requisitos Standard Specification for Standard Sand* [blog]. Quito- Ecuador, 2017. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_873-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_873-2.pdf).

**OMS.** *Manual de la oms sobre el radón en interiores* [blog]. Suiza, 2015. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671\\_spa.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf?sequence=1).

**ORBE, J.** Radon measurement techniques in building materials and water using Italian and Ecuadorian samples (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad de la Calabria, Arcavacata-Italia. 2021. pp. 1-113

- PÉREZ ESCALONA, L., et al.** 2018. "El radón, segunda causa del cáncer de pulmón". Dialnet [en línea], 2018, (Cuba) 13 (1), pp. 235-237. [Consulta: 08 diciembre 2021]. ISSN 1995-6797. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7322780.pdf>
- PETROPOULOS, N.P., et al.** "Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results". Science of the Total Environment [en línea], 2001, (Grecia) 272 (1-3), pp. 109-118. [Consulta: 08 diciembre 2021]. ISSN 00489697. Disponible en: DOI 10.1016/S0048-9697(01)00674-X.
- PYLON ELECTRONICS INC.** *600a and 610a Active Lucas Type Cell Detector Manual*. [blog]. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: <https://pylonelectronics-radon.com/wp-content/uploads/2019/08/DS138R2-AB7.pdf>.
- TENE, T., et al.** "Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of Highland Region of Ecuador". Construction and Building Materials [en línea], 2021, (Ecuador) 293, pp. 1-11. [Consulta: 08 diciembre 2021]. ISSN 09500618. Disponible en: DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.123282.
- THOMPSON, R.E.** *Radon*. 3ra edición. Estados Unidos: Encyclopedia of Toxicology Elsevier, 2014. ISBN 9780123864543, pp. 46-50.
- UNSCEAR.** *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION*. 2da edición. New York- Estados Unidos: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2010. ISBN 9789211422740, pp. 84-156
- WANG, C., XIE, D., YU, C.W. y WANG, H.** "Indoor and Built Evaluation of the effect of cover layer on radon exhalation from building materials". SAGE JOURNALS [en línea], 2021, (China) 30 (9), pp. 1-10. [Consulta: 08 diciembre 2021]. Disponible en: DOI 10.1177/1420326X20963380.
- YOUSEF, H.A., et al.** "Measurement of Radon Exhalation Rate in Some Building Materials Using Nuclear Track Detectors". World Journal of Nuclear Science and Technology [en línea], 2015, (Egipto) 05(03), pp. 141-148. [Consulta: 08 diciembre 2021]. ISSN 2161-6795. Disponible en: DOI 10.4236/wjnst.2015.53014.

## ANEXOS

### ANEXO A: 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Host USB</li> <li>- Cliente USB</li> <li>- Pulso TTL de 5V a través del conector SMA</li> <li>- Puerto Ethernet</li> </ul>
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, 2019: p.13).

Realizado por: Gualli, William, 2021.

**ANEXO B: ESPECIFICACIONES DEL DETECTOR DE CENTELLEO O LUCAS CELL  
PYLON 600P**

<b>Actividad más baja detectable de radón</b>	40 Bq $m^{-3}$
<b>Rango de temperatura de operación</b>	0 a +50°C
<b>Sensibilidad</b>	0.037 cpm / Bqm <sup>-3</sup> .
<b>Dimensiones</b>	7.6x6.1cm (HxD)

**Fuente:** (Pylon Electronics Inc., 2011: p. 11).

**Realizado por:** Gualli, William, 2021.