



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA FÍSICA

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN-222
EN EL SUELO DEL PARAMO DE NAVAG**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICO

AUTOR: ELIZANDRO RENAN GAVILÁNEZ FALCONEZ

DIRECTORA: Dra. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDÓÑEZ

Riobamba - Ecuador

2024

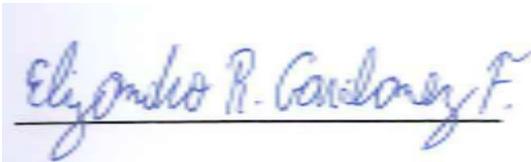
© 2024, **Elizandro Renan Gavilánez Falconez**

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, Elizandro Renan Gavilánez Falconez declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo 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, 29 de febrero del 2024

A handwritten signature in blue ink, reading "Elizandro R. Gavilánez F.", is written over a light blue rectangular background. The signature is cursive and includes a horizontal line underneath the name.

Elizandro Renan Gavilánez Falconez

0953875325

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto de Investigación, **DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN-222 EN EL SUELO DEL PARAMO DE NAVAG**, realizado por el señor: **ELIZANDRO RENAN GAVILANEZ FALCONEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científico, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Dra. Myriam Cecilia Borja Saavedra
PRESIDENTE DE TRIBUNAL


2024-02-29

Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordóñez
DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR


2024-02-29

Biof. Azucena Nataly Bonilla García
ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR


2024-02-29

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado tanto a mi madre Gioconda Falconez Vera y mi padre Renan Gavilánez Dávila, por creer en mí siempre, y tolerarme muchas de mis fallos como persona e hijo, pues a pesar de que varias veces les decepcione, ellos siguieron firmes para que yo lograra obtener mi título y por último y no menos importante, aquellos maestros que ayudaron en mi formación profesional a lo largo de toda esta carrera.

Elizandro

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por haberme brindado la formación académica todos estos años, a cada uno de los profesores que nos compartieron sus conocimientos en cada área de estudio que tomé durante toda la carrera. A mi directora y miembro de este trabajo, Jheny del Carmen Orbe Ordoñez por su permanente asesoría, por su paciencia y por su apoyo durante el transcurso de la realización del Trabajo de Integración Curricular.

Elizandro

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRAC.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	4
1. MARCO TEORICO	4
1.1. Magnitudes básicas.....	4
1.1.1. <i>Actividad</i>	4
1.1.2. <i>Tiempo de vida media</i>	5
1.2. Radón	5
1.2.1. <i>Propiedades del radón</i>	5
1.2.2. <i>Cadena de desintegración del Uranio-238</i>	6
1.2.3. <i>Cadena de desintegración del radón-222</i>	7
1.3. Magnitudes de interés para el estudio.....	8
1.3.1. <i>Concentración de radón</i>	8
1.3.2. <i>Exhalación de radón</i>	8
1.4. Difusión de radón.....	9
1.5. Páramo.....	10
1.6. Textura del suelo.....	11
CAPITULO II.....	12
2. MARCO METODOLOGICO.....	12
2.1. Tipo y diseño de la investigación.....	12
2.2. Zona de estudio.....	12
2.2.1. <i>Configuración experimental para medir el radón en suelo</i>	14
2.2.2. <i>Protocolo weeks para evaluar la concentración de radón en el suelo</i>	18
2.3. Configuración experimental para calcular la tasa de exhalación de radón en muestras de suelo.....	19

2.3.1. Procedimiento para medir la tasa de exhalación de radón de muestras del suelo con la técnica de cámara cerrada	22
CAPITULO III	23
3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	24
3.1. Parámetros ambientales y propiedades del suelo.	24
3.1.1. Sector Sureste	24
3.1.2. Sector Noroeste	24
3.2. Resultados de la concentración de radón del sector Sureste.	25
3.3. Resultados de la concentración de radón del sector Noroeste	26
3.4. Comparación del sector Sureste y sector Noroeste	27
3.5. Tasa de exhalación de superficial y másica de radón desde las muestras de suelo	28
CONCLUSIONES	31
RECOMENDACIONES	32
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Propiedades del radón.....	6
Tabla 1-4: Parámetros ambientales de los puntos de muestreo del páramo del sector Sureste...25	
Tabla 2-4: Parámetros ambientales de los puntos de muestreo del páramo, sector Noroeste.....26	
Tabla 3-4: Tasa de exhalación superficial y másica de radón-222 en muestras de suelo.....31	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1: Cadena de desintegración del uranio-238.....	7
Figura 1- 2: Cadena de desintegración del radón.....	8
Figura 1- 3: El recorrido del radón para llegar a la superficie.....	9
Figura 1- 4: Procedimiento de determinación de textura por el método de sensibilidad al tacto.....	12
Figura 2- 1: Área de estudio (páramo de Navag)	14
Figura 2- 2: Kestrel 3500.....	15
Figura 2- 3: El sistema de detección RAD-7-AMS 427.01 GVP sonda de acero inoxidable.....	15
Figura 2- 4: RAD-7.....	16
Figura 2- 5: Unidad de secado de laboratorio.....	17
Figura 2- 6: AMS 437.01 GVP Sonda de acero inoxidable.....	18
Figura 2- 7: Tubo de plástico.....	18
Figura 2- 8: Barreno Holandés con punto helicoidal.....	19
Figura 2- 9: Técnica de la cámara cerrada y el monitor de radiación Pylon AB7.....	20
Figura 2- 10: El monitor de radiación Pylon AB7.....	21
Figura 2- 11: Detector de Lucas, modelo 600p.....	22
Figura 2- 12: El medidor de temperatura y humedad Ecowitt DS102 USB Data Logger.....	22

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 3- 1 Concentración de radón-222 del sector Sureste.....	27
Gráfico 3- 2: Concentración de radón-222 del sector Noroeste.....	28
Gráfico 3- 3: Concentración de radón de cada sector.....	29
Gráfico 3- 5: Tasa de exhalación de radón desde la muestra de suelo del punto de muestreo S11.....	30
Gráfico 3- 6: Tasa de exhalación de radón desde la muestra de suelo del punto de muestreo N.8.....	30

RESUMEN

En Ecuador, la investigación sobre el radón-222 en suelo es limitada, donde la mayoría de las investigaciones es desarrollada por el GIDAC, esto presenta como tal una gran desventaja como país al no conocer los procesos que ocurren dentro de nuestros suelos y la importancia que tienen en nuestra vida. El presente estudio tiene como objetivo estimar la concentración de radón-222 en el suelo del páramo de Navag en la provincia de Chimborazo y medir la tasa de exhalación superficial y másica. En la zona de estudio se determinaron dos sectores: Sureste y Noroeste con 20 puntos de muestreo en total. La concentración de radón en suelo se midió con un detector de silicio incorporado al monitor RAD-7 y una sonda de acero inoxidable. Además, se calculó la tasa de exhalación de radón-222 de muestras de suelo, recolectadas a 1 metro de profundidad en dos puntos de muestreo de diferente sector, utilizando una celda de Lucas Pylon. Las concentraciones de radón en el sector Sureste que oscilaron entre 2660 ± 120 y 19500 ± 322 Bq/m³, y en el sector Noroeste los valores fluctuaron desde 6440 ± 184 hasta 23000 ± 352 Bq/m³. En el Sureste las tasas de exhalación superficial y másica presentaron valores de 0,705 Bq/m²h y 0,032 Bq/kg h respectivamente, mientras que el Noroeste fueron 0,708 Bq/m²h y 0,034 Bq/kg h respectivamente. En este estudio las concentraciones en el suelo son altas y las exhalaciones de las muestras de suelo son bajas, por lo que se puede suponer que el radón viene de profundidades mayores a 1 metro.

Palabras clave: <CONCENTRACIÓN DE RADÓN> <MUESTRAS DE SUELO> <TASA DE EXHALACIÓN SUPERFICIAL> <TASA DE EXHALACIÓN MÁSCICA> <MONITOR RAD-7>.

0353-DBRA-UPT-2024

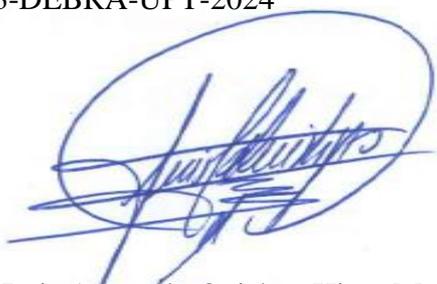


ABSTRAC

In Ecuador, the research about on radon-222 in soil is limited, where most of the research is carried out by the GIDAC, as such this presents a great disadvantage as a country by not knowing the processes that occur within our soils and the importance that they have in our lives. The present study has as an objective to estimate the concentration of radon-222 in the soil of the Navag moor in the province of Chimborazo and measure the exhalation rate superficial and mass. Two sectors were determined in the study area: Southeast and Northwest with 20 sampling points in total. The radon concentration in soil was measured with a silicon detector incorporated into the RAD-7 monitor and a stainless-steel probe. In addition, the radon-222 exhalation rate of soil samples collected at a depth of 1 meter at two sampling points in different sectors was calculated using a Lucas Pylon cell. Radon concentrations in the Southeast sector ranged between 2660 ± 120 and 19500 ± 322 Bq/m³, and in the Northwest sector the values fluctuated from 6440 ± 184 to 23000 ± 352 Bq/m³. In the Southeast, the surface and mass exhalation rates presented values of 0.705 Bq/m²h and 0.032 Bq/kg h respectively, while in the Northwest they were 0.708 Bq/m²h and 0.034 Bq/kg h respectively. In this study, the concentrations in the soil are high and the exhalations of the soil samples are low, so it can be assumed that radon comes from depths greater than 1 meter.

KEYWORDS: <RADON CONCENTRATION>, <SOIL SAMPLES> <SURFACE EXHALATION RATE>, <MASS EXHALATION RATE>, <MONITOR RAD-7>

0353-DEBRA-UPT-2024



Lic. Luis Armando Quishpe Hipo, Mgs.
C.I. 0102801016
DOCENTE INGLES CARRERA DE FISICA

INTRODUCCIÓN

El radón se forma a partir del uranio-238, un elemento radiactivo natural que se descompone en el radio-226 y luego se convierte en radón-222, un gas radiactivo natural, mediante la emisión de partículas alfa. Este gas, único en la cadena radiactiva, es incoloro, inodoro y sin sabor, y se encuentra en la corteza terrestre en rocas o suelos con uranio-238. Con una vida media de 3,8 días, el radón puede llegar a la atmósfera a través de fracturas en el subsuelo, suelos porosos, fallas geológicas y zonas sísmicas. Aunque su dispersión en el aire es limitada debido a su corta vida media, su importancia radica en su contribución a la radiación natural. La concentración de radón se ve afectada por factores atmosféricos como la precipitación, humedad, temperatura y presión barométrica, más que por procesos químicos, ya que el radón es un gas inerte (Kulali, Akkurt y Özgür, 2017, p. 1).

Se han realizado investigaciones en diversas partes del mundo para determinar las concentraciones de radón en el suelo cerca de fallas geológicas. En Italia, específicamente en Calabria, se llevó a cabo un estudio para mapear sistemas de fallas regionales. Los resultados revelaron que las mayores concentraciones de radón, entre 66 y 80 kBq/m³, se encuentran principalmente en estructuras tectónicas recientes, siendo Rossanese la localidad con el valor más alto de 89,91 kBq/m³. A distancias superiores a 2 km, la mayoría de las mediciones fueron inferiores a 6,27 kBq/m³ (Iovine, G., 2018, p.213-215). En Catania, otro estudio del gas radón permitió mapear fallas ocultas en el monte Etna en dos sectores. Se encontraron concentraciones de radón en un rango de 2000 a 8000 Bq/m³, atribuidas a la presencia de porosidad en el suelo y la actividad de fallas activas (Burton, M., et al., 2004, p.1-4).

En Grecia también se realizó un estudio de concentración de radón con el objetivo de mapear fallas activas en la falla de Almopía, se observaron concentraciones en el suelo en el rango de 1000 a 8000 Bq/m³, (Ioannides K., et al, 2003, p. 205-213).

En Eslovenia, se realizaron mediciones de concentración de radón en suelo y tasa de exhalación en la falla tectónica de Ravne. Los resultados mostraron un rango de concentración de 0,9 a 32,9 kBq/m³ y una tasa de exhalación de 3,96 a 150,84 Bq/m²h (Vaupotič, J., et al, 2010, 895–899).

En Turquía se investigó los efectos de los parámetros meteorológicos en la concentración de radón en el suelo, durante nueve meses en periodos de diez minutos; los valores medidos estuvieron entre 0,1-160 kBq/m³ y los valores más bajos de concentración se registraron después de fuertes lluvias, debido a que el agua pudo haber causado la reducción de la permeabilidad del aire en el suelo y los valores más altos de concentración se observaron con alta humedad y baja temperatura en invierno (F. Kulali, I. Akkurt, N. Özgür, 2017, 999-1001).

En Asia y África se desarrollaron investigaciones con respecto a las concentraciones y tasa de exhalación de radón; por ejemplo, en China, se llevaron a cabo mediciones de campo de las concentraciones de radón en el suelo en tres ciudades diferentes del sur y norte de China. En la ciudad Guiyang presento una concentración de radón de $9 \pm 16 \text{ kBq/m}^3$ y una tasa de exhalación de $144 \pm 212,4 \text{ Bq/m}^2\text{h}$, en los suburbios de Beijing $14 \pm 10 \text{ kBq/m}^3$ y $75,6 \pm 46,8 \text{ Bq/m}^2\text{h}$ y en Hohhot de $7 \pm 6 \text{ kBq/m}^3$ y $50,4 \pm 50,4 \text{ Bq/m}^2\text{h}$. Los resultados indicaron una proporción directa entre la tasa de exhalación de radón y el contenido de radio del suelo (Kaina Sun., et al, 2004, p.1113-1117).

En el norte de Jordania, al sureste de la ciudad de Irbid, se estudió las concentraciones de radón en cinco ubicaciones diferentes con el objetivo de demostrar la existencia de una falla. Las concentraciones más altas se observaron cerca de la zona de la falla, con valores de 50 a 25 kBq/m^3 a distancias nulas, y concentraciones menores a 20 m de la falla, con valores de 10 a 5 kBq/m^3 demostrando la existencia de una falla geológica en dicho lugar (Al-Tamimi, M. H., & Abumurad, K. M., 2001, p 397 400).

En Estados Unidos, se desarrolló varias investigaciones relacionadas con la concentración de radón, por ejemplo, en Texas, Estados Unidos, se estudiaron las concentraciones de radón alrededor de una falla inactiva en las montañas East Franklin en el Paso al oeste de Texas. Se registraron concentraciones que variaban entre $1,05 \pm 0,05 \text{ kBq/m}^3$ y $9,35 \pm 0,159 \text{ kBq/m}^3$ (López, J. A., et al, 2016, p. 265-275).

En Colombia realizaron una investigación donde asocia el gas radón y la sismicidad en la región volcánica de los Coconucos y se observó que el 80 % de los casos existe un aumento en la concentración de radón por encima de los 118400 Bq/m^3 , y que las variaciones entre medidas superiores a los 3700 Bq/m^3 están relacionadas con sismos de una magnitud superior de 2,8 en la escala de Richter (Luisa F. Meza et al, 2017, p. 101-114).

En México, se estudió la concentración de radón en la ciudad de Morelia donde hay la falla La Paloma y la falla La Colina, potencialmente sísmicas, obteniéndose valores promedio que oscilan entre 68,45 y 20017 Bq/m^3 , con un promedio de 4028,56 Bq/m^3 . Se registraron concentraciones específicas para diferentes fallas, como La Paloma, la falla central Camionera y otras (Octavia Lázaro -Mancilla et al, 2020, p. 157-177). En baja California se midieron las concentraciones de gas radón, en una dirección transversal sesgado a la Falla Imperial de la colonia Castro de Mexicali, el rango de concentración de radón es de $22,2 \pm 44,4 \text{ Bq/m}^3$ hasta $3508,7 \pm 688,2 \text{ Bq/m}^3$, se concluyó que la Falla Imperial presenta varias trazas lo que nos lleva a pensar en la existencia de agrietamientos paralelos y no solo en una traza de la falla (Mancilla, O. L., et al, 2006, p.6-8).

En Ecuador los estudios sobre la concentración de radón en suelos se deben al GIDAC; una de las investigaciones sobre radón en suelos en el país, fue en la provincia de Chimborazo en el

cantón Riobamba perpendicular a la falla Pallatanga donde la concentración de radón más alta se presentó en la parroquia Calpi con de $19900 \pm 340 \text{ Bq/m}^3$, también se observó que los puntos más cercanos a la falla Pallatanga fluctuaron entre 2570 a 3930 Bq/m^3 (Darwin H. Jerson C, 2022). En el sector de Cajabamba donde se determinó concentraciones de radón desde 2510 ± 123 hasta $42000 \pm 503 \text{ Bq/m}^3$, además de que la concentración es mayor en puntos de mayor altitud y no existe ninguna correlación entre la concentración de radón y el pH y la conductividad del suelo. (Evelin G. Kathya N, 2022).

En la provincia de Azuay se investigó una correlación entre las variables meteorológicas y físicas del suelo con la concentración de radón en 8 puntos de estaciones meteorológicas de la periferia de la ciudad de Cuenca; se utilizó una cámara de difusión de radón, con membrana y sin membrana; la mayor concentración de radón, sin membrana fue en la estación meteorológica Baños con un valor de 4926 Bq/m^3 , mientras que la concentración más pequeña fue en la estación meteorológica Sayausi con un valor de 75 Bq/m^3 , en cambio la concentración de radón con membrana fue en la estación meteorológica de Tixán con un valor de 2610 Bq/m^3 y la menor fue en la estación meteorológica de Santa Ana con un valor de 10 Bq/m^3 ; se concluyó que la variación de la concentración de radón se debe en los diferentes tipos de suelo y que la única variable meteorológica que no sufrió cambio alguno fue la precipitación (González. M., Karina. M., 2018, p.40-55).

Esta investigación tiene como objetivo medir las concentraciones de radón en suelo en el páramo de Navag, además también recolectar muestras para calcular la tasa de exhalación superficial y másica de radón usando un detector de silicio para medidas de suelo y en una celda de Lucas y Pylon AB7.

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO

1.1. Magnitudes básicas

1.1.1. Actividad

La actividad se la conoce como la rapidez con la que un elemento radiactivo decae en otro. Es el número de desintegraciones que suceden en un determinado tiempo. Esto no es afectado por agentes externos como la temperatura, presión, ni por factores físicos o químicos. Una forma matemática que describe la actividad es:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (1)$$

Donde “A” es la actividad radiactiva, “N” es la muestra del material, “t” el tiempo transcurrido y el signo menos nos indica que la muestra irá disminuyendo con el pasar del tiempo, pero su magnitud siempre se la representa de forma positiva. Esta expresión se “deduce a partir de considerar que la actividad de una muestra radiactiva es directamente proporcional al número de radionúclidos contenidos en la misma” (Zepeda, 2006, p.22). Y matemáticamente se la representa así:

$$A = \lambda * N \quad (2)$$

Donde λ es la constante de decaimiento radioactivo que representa el número de radionúclidos de una muestra que se encuentran en cualquier momento del tiempo que se desintegra. Esta constante es propia de cada radionúclido. Entonces el número de nucleidos presentes en la muestra después de pasar un tiempo se la puede denotar de la siguiente forma:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Donde “N” representa el número de nucleidos después de un tiempo determinado y “ N_0 ” el número de nucleidos iniciales con la que empieza la muestra. Con todo esto podemos encontrar la actividad final luego de pasar un tiempo determinado:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

En el sistema internacional (SI), la unidad de actividad radiactiva es denominada bequerelios (Bq).

1.1.2. Tiempo de vida media

Es el intervalo de tiempo que tarda una muestra en reducir a la mitad su actividad inicial. Este valor es propio de cada elemento químico y se lo denota como $t_{1/2}$. El tiempo de vida media siempre dependerá de la constante de decaimiento radiactiva, una forma matemática de encontrarla es:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (5)$$

1.2. Radón

El radón-222 es un isotopo que nace del decaimiento del uranio-238 a través de una serie de radionúclidos de vida más corta hasta llegar al radio-226, que tiene una vida media de 1620 años, este último se desintegra por emisión de partículas alfas directamente al radón-222 cuya vida media es de 3,82 días; el radón-222 también se descompone y da como resultados la liberación de partículas alfa. Dado que las concentraciones promedio de uranio-238 en la mayoría de las rocas y suelos son pequeñas, las concentraciones correspondientes de radón-222 también suelen ser pequeñas. Las concentraciones más grandes de radón-222 generalmente se asocian con rocas graníticas que contienen concentraciones elevadas de uranio-238 (generalmente diez o más partes por millón) (L. Dewayne Cecil y Jaromy R. Green, 2000, p.175).

1.2.1. Propiedades del radón

Es un gas noble incoloro, inodoro e insípido, un número atómico 86, posee 136 electrones, su núcleo es estable, es el que más abundante, pues se encuentra en el aire, en el agua, las rocas y en suelos, siendo el más radiactivo entre los gases nobles, pues presenta el 50% de radiación en el medio ambiente; es un gas inerte, por ende, no se mezcla ni reacciona con ningún elemento y es peligroso inhalarlo (Gustavo Garzón., 2009, p.21). Al ser un gas noble es químicamente inerte, y por lo tanto su comportamiento está determinado por 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 (Marta Fuente Lastra., 2016, p.3). Las características fisicoquímicas y radiológicas se pueden observar en la siguiente tabla 1-1

Tabla 1-1. Propiedades del radón

Formula molecular	Rn
Número atómico	86
Peso molecular	222
Configuración electrónica	$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$
Niveles electrónicos	2, 8, 18, 32, 18, 8
Orbital extremo	$6p^6$
Número de valencia	+4 +6 +8
Primer potencial de ionización	10,75 eV
Temperatura de fusión	-71°C
Temperatura de ebullición	-61°C
Energía alfa	5590.3 KeV
Vida media	3.8232 días
Estado	Gaseoso
Aspecto	Incoloro

Fuente: INGEOMINAS, 2009

Realizado por: Gavilánez E., 2023.

1.2.2. Cadena de desintegración del Uranio-238

El uranio-238 es un elemento radiactivo natural que está presente en todas las rocas y suelos en diversas concentraciones. La desintegración del uranio-238 a través de una serie de radionucleidos de vida más corta, primero sufre una desintegración alfa para formar el torio-234, después sufre dos desintegraciones beta y se convierte en protactinium-234 y uranio-234, luego pasa a tener dos desintegraciones alfa, pasando al torio-230 y finalmente radio-226, que tiene una vida media de 1620 años. El radio-226 se desintegra mediante emisión de partículas alfa directamente en radón-222 como se puede apreciar en la Figura 1-1 (L. Dewayne Cecil y Jaromy R. Green, 2000, p.175).

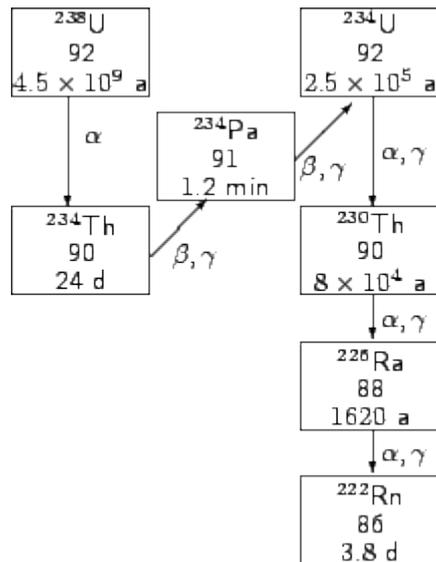


Figura 1- 5: Cadena de desintegración del uranio-238.

Fuente: Universidad de Granada, 2023

1.2.3. Cadena de desintegración del radón-222

Cuando el núcleo del radón se desintegra, libera una partícula alfa con una energía de 5,49 MeV, convirtiéndose en polonio-218. Es relevante señalar que el núcleo de polonio-218 no puede revertir su proceso para regresar a ser radón. Los átomos de polonio, clasificados como metales, tienden a adherirse a las superficies con las que entran en contacto. Al desintegrarse, los núcleos de polonio-218 emiten una partícula alfa de 6,00 MeV, transformándose en plomo-214. Este último emite radiación beta y se convierte en bismuto-214, que, a su vez, mediante otra emisión de radiación beta, se transforma en polonio-214. Este polonio-214, al desintegrarse, emite una partícula alfa de 7,69 MeV, dando lugar al plomo-210. Este último, tras experimentar una desintegración beta, se convierte en bismuto-210, que a su vez sufre otra desintegración beta para transformarse en polonio-210. El polonio-210 experimenta una última desintegración con una partícula alfa de 5,30 MeV, culminando en la formación de plomo-206. Es crucial destacar que el plomo-206 es estable y no experimenta ningún tipo de decaimiento radiactivo subsiguiente, como se ilustra en la Figura 1-2 (DURRIDGE Company Inc., 2014, p.34).

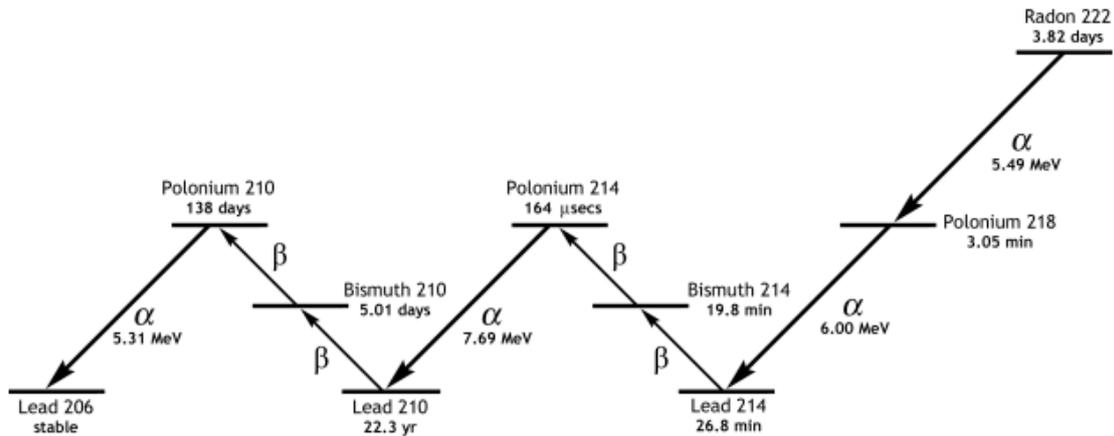


Figura 1- 6: Cadena de desintegración del radón.

Fuente: DURRIDGE Radon Capture & Analytics. 2014.

1.3. Magnitudes de interés para el estudio

1.3.1. Concentración de radón

La concentración de radón mide el nivel de radioactividad en el aire debido al radón, se mide en bequerelios por metro cubico, donde el bequerelio representa una desintegración atómica por segundo (J. Donald Appleton, 2012, p.241). El estudio de la concentración de radón desempeña un papel fundamental al detectar sistemas de fallas o fracturas en la corteza terrestre. Además, actúa como trazador atmosférico para determinar la circulación y ventilación en minas, cuevas y estudios hidrogeológicos. La variabilidad en la concentración de radón está vinculada a actividades tectónicas y volcánicas en desarrollo, siendo áreas propensas a estos fenómenos las que presentan mayores concentraciones debido a alteraciones en la permeabilidad del suelo. Otros procesos dinámicos, como la micro fracturación de rocas por esfuerzos relacionados con eventos intrusivos, el aumento del flujo térmico o las descargas de vapor, pueden incrementar el flujo de radón en la superficie. Estas observaciones son cruciales para la detección y comprensión de fenómenos geológicos y ambientales (Luiza F. Meza, 2018, p.102).

1.3.2. Exhalación de radón

La exhalación de radón-222 ocurre cuando el radio-226, el cual está atrapado en los granos y minerales del entorno, sufre una desintegración, esto genera energía de retroceso el cual permite que el radón-222 alcance el espacio intersticial entre los granos y sean expulsados hacia la matriz solida del material, como se ilustra en la Figura 1-3; como condición, la desintegración del radio-226 debe ocurrir en proximidad a la superficie para que este fenómeno se produzca; una vez los

átomos de radón se encuentran en el espacio intersticial, estos pueden ascender hacia la superficie mediante difusión o advección del terreno, y una vez el radón libre en la atmosfera, termina el fenómeno de la exhalación de radón. La cantidad que se libera al aire atmosférico por unidad de tiempo y superficie se denomina tasa superficial de exhalación de radón, y esta influenciada por las características físicas del suelo y las condiciones meteorológicas (Marta Fuente Lastra, 2016, p.7).

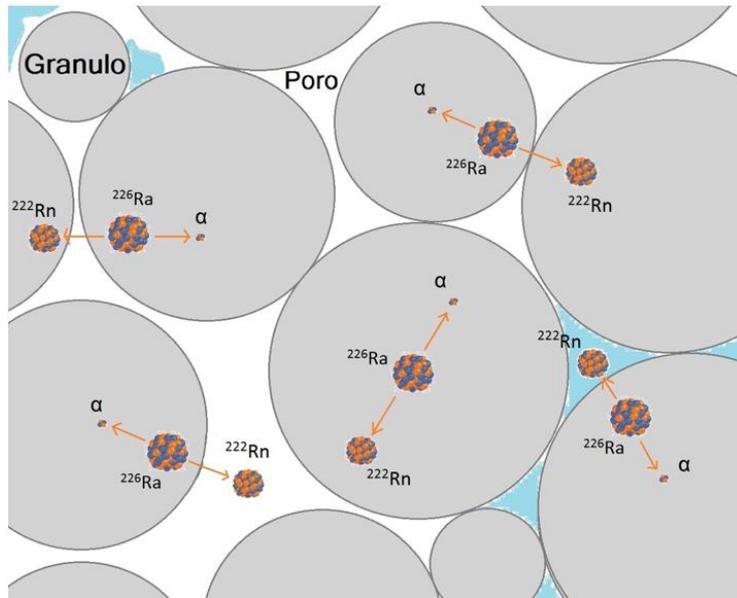


Figura 1- 7: Mecanismos de liberación de radón a partir de granos minerales.

Fuente: Fuente Lastra, Marta., 2023.

1.4. Difusión de radón

Se entiende por difusión de radón al proceso de migración partiendo de un soluto originario con elevada concentración a una región de menor concentración, es decir el flujo de radón por difusión depende de la variación de concentración del gas en una sección del medio donde se haya disuelto, ya sean los poros de un material o en algún fluido, mientras más porosidad, la difusión será más amplia (z, et al, 2010 p. 12). La ley de Fick describe de manera general este fenómeno y enuncia que la velocidad de difusión por unidad de área (\vec{J}), es decir el número de moléculas que atraviesa un área determinada por unidad de tiempo, depende del gradiente de la concentración ($\vec{\nabla}C$) y de un coeficiente propio de cada sistema llamado coeficiente de difusión (D).

$$\vec{J} = -D\vec{\nabla}C$$

El signo menos se debe a que las partículas migran de un punto de mayor concentración a uno de menor concentración (Ashby, et al, 2005 p. 289). El coeficiente de difusión nos da información

sobre la facilidad con que un determinado soluto se mueve en un solvente en particular. A su vez J en componentes puede ser expresada como:

$$J_i = \frac{1}{A} \frac{dn_i}{dt}$$

Donde “A” es la magnitud del área por la que fluyen las moléculas, “ n_i ” número de moléculas que fluyen en la dirección “i” ésimas. Pudiendo entonces reescribirse la ley de Fick como:

$$\frac{1}{A} \frac{dn_i}{dt} = -D \frac{\partial C}{\partial x_i}$$

El proceso de difusión del radón a través de materiales se describe mediante el coeficiente de difusión D. La longitud de difusión del radón L puede calcularse a partir del coeficiente de difusión D como $L = (D/\lambda)^{1/2}$. La longitud de difusión se define como la distancia característica recorrida por los átomos de radón durante su vida media. Otra definición popular de la longitud de difusión del radón es la distancia a través de la cual la concentración de radón disminuye hasta el 37% (porque $e^{-1} = 0,37$) de su valor inicial. En contraste con el coeficiente de difusión D, que es independiente del espesor del elemento, el flujo a través de una muestra disminuye con el espesor (Klover, 2012 p. 205).

1.5. Páramo

Los páramos son ecosistemas neotropicales únicos, formados en altitudes elevadas y destacados por su flora y fauna endémicas. Se caracterizan por su superficie llana, poco fértil, desértica y bajas temperaturas. El suelo de los páramos regula y almacenan agua de las precipitaciones y del descongelamiento de la nieve de los nevados. La flora nativa y la descomposición lenta de materia orgánica, que se acumula en una capa gruesa, contribuyen a la coloración negra del suelo. Además, la red de raíces de la cubierta vegetal propio de los páramos mantiene el suelo en buen estado (Patricio Mena Váconez & Robert Hofstede, 2006, p.92).

En Ecuador, los páramos, situados a una altitud promedio de 3300 msnm, abarcan el 7% del territorio nacional. Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial al suministrar agua a los valles interandinos y a las poblaciones circundantes. Esta función se atribuye a la acumulación de materia orgánica, ceniza volcánica y la morfología de ciertas plantas. Además, los páramos son significativos sumideros de carbono, almacenando seis veces más carbono que los bosques tropicales. La vegetación en los páramos se caracteriza por la ausencia de árboles y la presencia de vegetación herbácea, destacando pastos, cojines, rosetas y pequeños arbustos (Guillermo Chuncho, 2019, p.72).

1.6. Textura del suelo

La textura del suelo, que refleja el contenido relativo de partículas de diferentes tamaños como arena, limo y arcilla, influye en la facilidad de trabajar el suelo, su capacidad para retener agua y aire, así como la velocidad de penetración y atravesamiento del agua en el suelo. En la evaluación de la textura en la zona de estudio, se tomó un puñado de tierra, se hidrató con gotas de agua hasta formar una masa y se evaluó apretándolo, utilizando el criterio ilustrado en la Figura 1-4 para determinar el tipo de textura del suelo (Ciancaglini N., 2010, p.1).

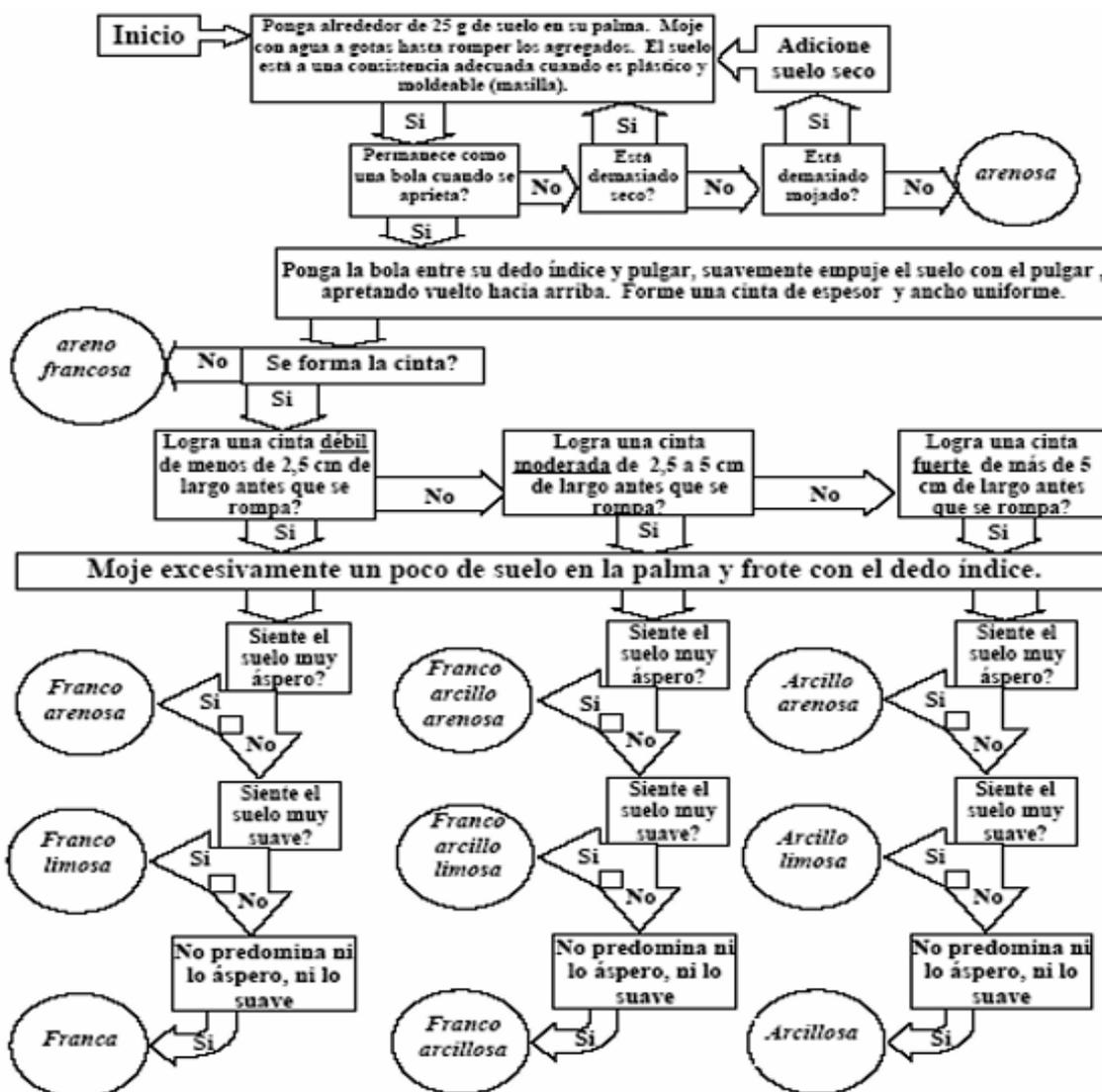


Figura 1- 8: Procedimiento de determinación de textura por el método de sensibilidad al tacto.

Fuente: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2010.

CAPITULO II

2. MARCO METODOLOGICO

2.1. Tipo y diseño de la investigación

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a la recopilación y análisis de datos numéricos, ya que busca aplicar los resultados obtenidos en la práctica, podemos clasificarla como aplicada; la podemos categorizar como exploratoria según el nivel de profundización en el objeto de estudio, esta investigación se clasifica como no experimental debido a la manipulación de variables; en cuanto al tipo de inferencia utilizado es deductivo y debido al tiempo empleado para realizar el proyecto, es un periodo temporal transversal.

2.2. Zona de estudio

La Figura 2-1 muestra la zona de estudio ubicada en el páramo de Navag, ubicada en la parroquia Juan de Velasco, en el cantón Colta, en la provincia de Chimborazo; se puede acceder por la carretera panamericana desde Riobamba; de toda la superficie del páramo, solo tomaremos como zona de muestreo 4,6 Km². Con la ayuda de Google Earth se determinaron 20 puntos de muestreo a una distancia de 500 m, para tener una densidad de 4 puntos/km². La línea roja separa la zona de estudio en dos sectores, el sector Noroeste a la izquierda y el sector Sureste a la derecha; existe la hipótesis de que en el páramo de Navag pasa la falla Pallatanga, fue formada por la colisión de la placa del Nazca y la placa Sudamericana, la cual atraviesa tres países, Ecuador, Colombia y Venezuela.



Figura 2- 13: Área de estudio (páramo de Navag)

Realizado por: Gavilánez E., 2023.

Para medir los parámetros ambientales, se utilizó el medidor climatológico Kestrel 3500 (ver Figura 2-2), con la capacidad de medir variables ambientales, tales como la temperatura del aire, presión barométrica, velocidad del aire y humedad relativa.



Figura 2- 14: Kestrel 3500

Fuente: Kestrel Instruments, 2023

2.2.1. Configuración experimental para medir el radón en suelo

En la Figura 2-3 muestra el sistema de detección RAD-7 – AMS 427.01 GVP Sonda de acero inoxidable para la medición de radón en el suelo.

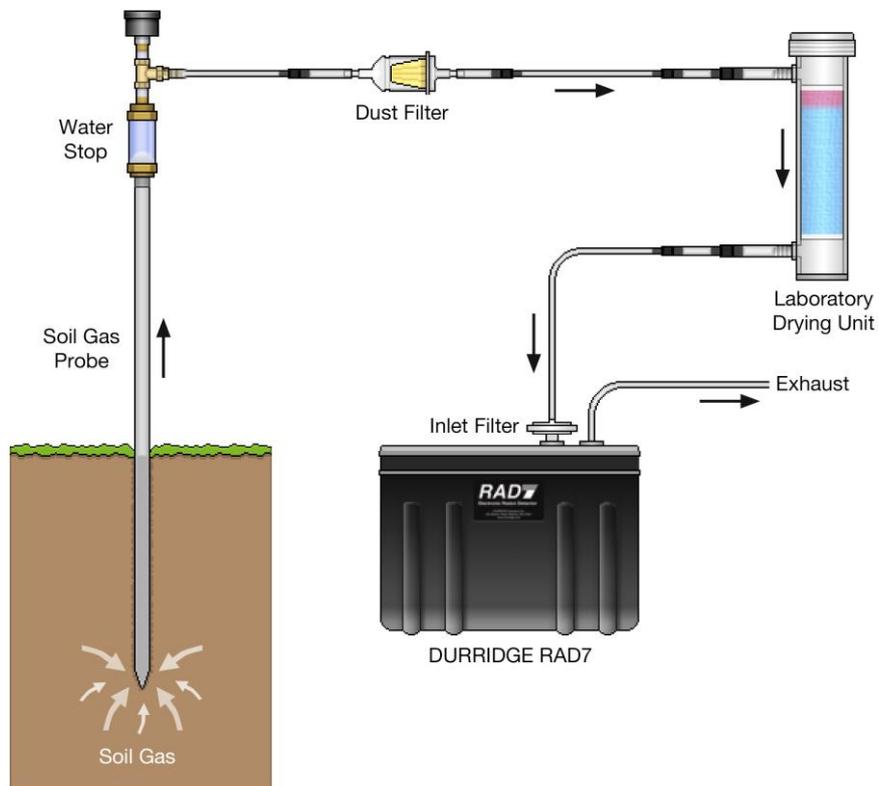


Figura 2- 15: El sistema de detección RAD-7-AMS 427.01 GVP sonda de acero inoxidable.

Fuente: DURRIDGE Radon Capture & Analytics, 2023.

RAD-7

La Figura 2-4 muestra el RAD-7, un instrumento portátil que hace monitoreo continuo a largo plazo de las concentraciones de radón y torón, tanto en el aire como el suelo, el cual utiliza la técnica de espectrometría de trazas alfa para detectar y medir la concentración de radón y las desintegraciones alfa, por medio de un material semiconductor que convierte la radiación alfa en una señal eléctrica, para así determinar la energía de cada partícula alfa y saber qué tipo de isotopo corresponde para diferenciar entre el radón y torón; el RAD-7 también es inmune a la acumulación de partículas de plomo-210, por ende la radiación de fondo es insignificante, debido a que hace análisis de espectro en tiempo real posee un microprocesador de fácil manejo; los resultados se pueden mostrar en una pantalla LCD, imprimirlos o descargarlos en una PC (RAD-7 Manual Spanish, 2014).

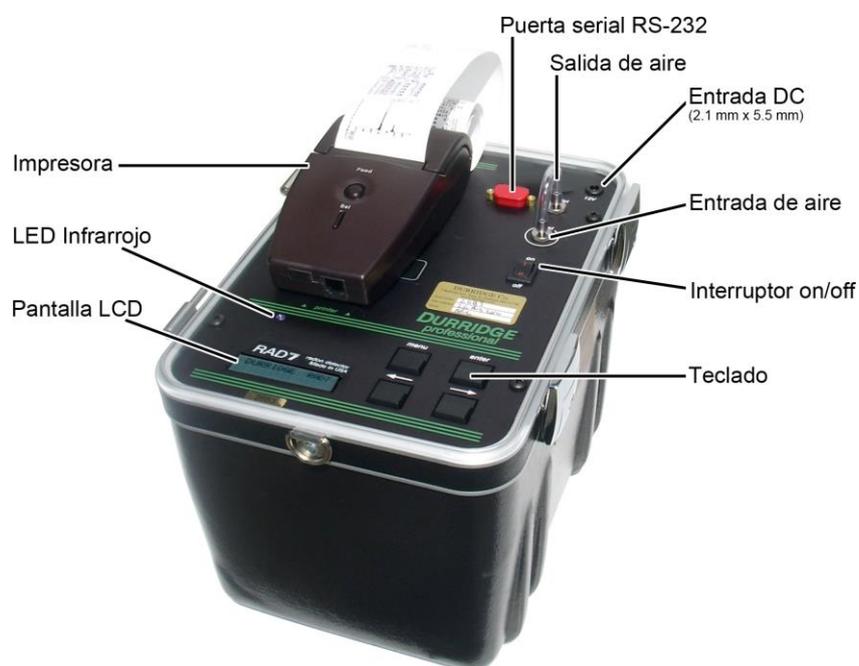


Figura 2- 16: RAD-7.

Fuente: DURRIDGE Radon Capture & Analytics, 2014.

RAD-7 tiene una unidad de secado, es un tubo acrílico transparente como se muestra en la Figura 2-5, que contiene aproximadamente 500 gramos de desecante Drierite, el cual es sulfato de calcio que permite absorber 10% de su peso en agua; su función es el secado rápido y eficiente de gases.



Figura 2- 17: Unidad de secado de laboratorio.

Fuente: Autor, 2023.

AMS 427.01 GVP

La Figura 2-6 muestra la sonda de acero inoxidable, donde la parte inferior posee una punta con orificios a lo largo de esta para la entrada de gas, y en la parte superior consta un medidor de vacío montado en una válvula de cierre de agua y posee una longitud de 1,5 m (Soli Gas Probe Manual, 2022).

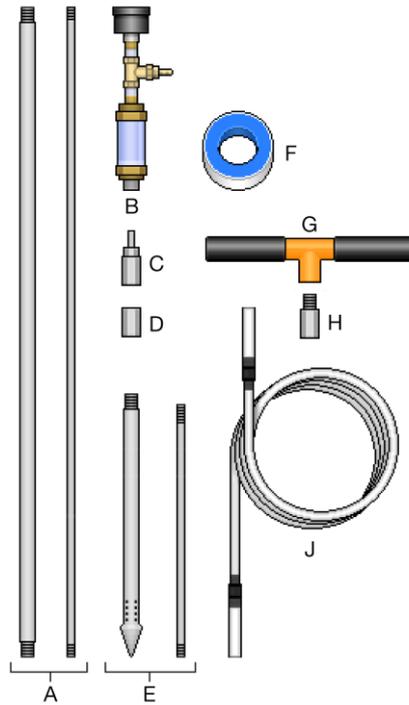


Figura 2- 18: AMS 437.01 GVP Sonda de acero inoxidable.

Fuente: DURRIDGE Radon Capture & Analytics, 2022.

La sonda de acero inoxidable viene incluida con un tubo de plástico como en la Figura 2-7; posee tres metros de largo y un diámetro interno de 0,31 cm (Soli Gas Probe Manual, 2022).



Figura 2- 19: Tubo de plástico.

Fuente: DURRIDGE Radon Capture & Analytics, 2022.

Además, para perforar la tierra se usó un barreno tipo holandés Edelman Arcilla como en la Figura 2-8 el cual posee una altura de 1,40 cm, usado en la perforación de suelos debido a que permite una fricción mínima durante la perforación por su tornillo helicoidal, el cual permite extraer material sólido con esfuerzo del usuario.



Figura 2- 20: Barreno Holandés con punto helicoidal.

Fuente: Inversiones Riguero S.A., 2023.

2.2.2. Protocolo weeks para evaluar la concentración de radón en el suelo

En el campo la medición se realizó siguiendo los siguientes pasos:

1. Se determinó en cada punto de muestreo las coordenadas UTM, usando la aplicación UTM y se midió varias variables meteorológicas con el Kesterl 3500.
2. Se purgó el RAD-7 durante 5 minutos o más tiempo hasta que la humedad alcance 6% según manual antes de conectarlo con la sonda de gas.
3. Se perforó el terreno hasta un metro de profundidad con el barreno tipo holandés. Se insertó la sonda en la perforación, luego se selló con la tierra extraída y yeso.
4. Se conectó el RAD-7 a la sonda de gas por medio de la manguera de plástico, como en la Figura 3-3.
5. Se configuró el RAD-7 con el protocolo Weeks y se realizó una medida de concentración de radón, misma que dura dos horas.

El RAD-7 imprime la concentración de radón en Bq/m³ y el error de la medida.

2.3. Configuración experimental para calcular la tasa de exhalación de radón en muestras de suelo

En la Figura 9-3 se muestra la técnica de cámara cerrada, consta del monitor de radiación Pylon AB7 y la cámara. Adicional se coloca un ventilador pequeño para homogeneizar el aire dentro de la cámara y un medidor de temperatura y humedad ecowitt DS102 USB Data Logger.

Cámara cerrada

Está hecha de vidrio templado, tiene, de largo 50 cm, de ancho 50 cm y de alto 50 cm. Posee una tapa deslizable en la parte superior de la cámara para introducir la muestra de suelo, como se muestra en la Figura 2-9



Figura 2- 21: Técnica de la cámara cerrada y el monitor de radiación Pylon AB7.

Realizado por: Gavilánez E., 2023.

Monitor de radiación Pylon Ab7

La Figura 2-10 muestra el monitor de radiación Pylon AB7, que es un monitor diseñado para medir radón y torón, cuando se combina con un detector apropiado. La unidad es compacta y portátil y está diseñada para que su configuración y uso sean sencillos. Posee una pantalla LCD,

que ayuda con la lectura y el seguimiento de los niveles de radiación; una alta capacidad de almacenamiento; permite conectar con otros dispositivos de monitoreo y también un puerto USB para poder descargar las lecturas y mediciones en documento de Excel (Pylon Electronics Inc. 2019).



Figura 2- 22: El monitor de radiación Pylon AB7.

Fuente: Pylon Electronics Inc, 2019.

La Figura 2-11 muestra una celda de Lucas, modelo 600p, que se acopla al monitor AB7 Pylon. Se considera pasivo porque la muestra de gas se difunde pasivamente dentro de la celda. El extremo abierto está roscado para atornillarse directamente al soporte del tubo fotomultiplicador (PMT) AB7. (Passive Lucas Type Cell Detector Manual, 2019).



Figura 2- 23: Detector de Lucas, modelo 600p

Fuente: Pylon Electronics Inc., 2019.

Medidor de temperatura y humedad Ecowitt DS102 USB Data Logger

La Figura 2-12 muestra un dispositivo que mide la temperatura en un rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y la humedad en un rango de 10% a 99%; cuenta con una pantalla LCD, muestra los valores de temperatura y humedad, y visualizar las lecturas máximas y mínimas; es capaz de almacenar datos de forma continua a intervalos predefinidos o configurables, se almacenan en una memoria Data Logger y se puede descargar los datos a través de una conexión USB para su visualización.



Figura 2- 24: El medidor de temperatura y humedad Ecowitt DS102 USB Data Logger.

Fuente: Ecuador GPS, 2023.

2.3.1. Procedimiento para medir la tasa de exhalación de radón de muestras del suelo con la técnica de cámara cerrada

Pasos para la medición de exhalación de gas radón:

1. Se perforó la tierra con una hoyadora hasta un metro de profundidad
2. Se recolectó la muestra de aproximadamente 1.5 Kg en una funda ziploc.
3. Se tamizó la muestra de suelo con un tamiz de un micrómetro; luego se pesó la muestra.
4. Se colocó la muestra en un recipiente de vidrio de dimensiones de 29,5 cm de largo, 20 de ancho y una altura de 10 cm y se inserta en la cámara y se selló herméticamente
5. Se configuró el monitor de radiación Pylon AB7 para que mida a cada hora la concentración de radón dentro de la cámara.
6. Transcurrido el periodo de medición de 3 días, se retiró la muestra de la cámara.
7. Se calculó la tasa inicial de exhalación superficial de radón usando la ecuación (6) (Chao, C, et al, 1997, p.358)

$$E_0 = \left(M_e - \frac{q}{V} C_0 \right) \frac{V}{A} \quad (6)$$

Donde

M_e = Pendiente inicial de la curva de crecimiento del radón-222 dentro de la cámara [$Bq \cdot m^{-3} \cdot hr^{-1}$].

q = Tasa de fuga de la cámara [$m^3 \cdot hr^{-1}$].

V = Volumen efectivo de la cámara [m^3].

C_0 = Concentración media de radón de fondo en EL laboratorio [$Bq \cdot m^{-3}$].

A = Área superficial de la muestra de suelo m^2 .

E_0 = Tasa inicial de exhalación de radón del punto de muestreo [$Bq \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$].

El grupo GIDAC determinó con anterioridad los siguientes valores $C_0=48 \pm 6$ Bq/m³, $q=0,28$ litros/hora y $V=118$ litros.

M_e se calculó usando los 24 primeros puntos de la curva de acumulación de radón dentro de la cámara.

La tasa de exhalación másica de radón-222 se calculó usando la ecuación (7), obtenida reemplazando el área de exhalación en la ecuación (6) por la masa de la muestra:

$$E_0 = \left(M_e - \frac{q}{V} C_0 \right) \frac{V}{M} \quad (7)$$

Donde M es la masa de la muestra recolectada de la zona de estudio.

CAPITULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Parámetros ambientales y propiedades del suelo.

Los resultados de las mediciones de los parámetros ambientales en la zona de estudio se presentarán en dos partes, el sector Sureste y Noroeste.

3.1.1. Sector Sureste

La Tabla 1-4 presenta la textura del suelo, altitud, velocidad del viento, humedad relativa y presión barométrica del sector Sureste de la zona de estudio, valores medidos en diferentes días. La temperatura está en el rango de 21,2 °C y 9,1 °C, la presión barométrica está en el rango 670,9 Hp y 642,8 Hp, la humedad relativa está en el rango de 98,8 % y 42,5 %, la velocidad promedio del aire está en el rango de 2,3 m/s y 0,1 m/s mientras que la velocidad máxima del aire está en el rango de 8 m/s y 0,7 m/s, y la altitud está en el rango de 3891 m y 3570 m. En el sector Sureste se observó 3 texturas del suelo: la franca, el franco limoso, el franco arenosa, siendo la franca y el franco limoso las texturas más frecuentes del sector.

Tabla 1-4: Parámetros ambientales de los puntos de muestreo del páramo del sector Sureste

Punto de muestreo	Textura	Altitud (m)	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)		Humedad relativa (%)	Presión barométrica (hPa)
				Promedio	Máxima		
S.1	Franco – limoso	3714	13	0,3	1,6	88,4	657,7
S.2	Areno – francosa	3891	11	1,4	4	64,3	642,8
S.3	Franca	3816	16,3	0,9	3,3	51,2	651,1
S.4	Franco – limoso	3833	21,2	1,8	4,5	42,5	647,8
S.5	Franco – limoso	3669	13,3	1,7	8	62,2	662,4
S.6	Franca	3773	14,9	2,3	5,4	59,5	653,6
S.7	Areno – francosa	3570	10,8	1,5	5,2	74,4	670,9
S.8	Franco – limoso	3664	10,1	1,5	3,8	72	661,7
S.9	Franca	3794	9,5	1,2	3,6	64,8	652,4
S.10	Franca	3803	9,1	0,3	0,7	79,4	649,9
S.11	Areno - francosa	3823	14,8	0,1	0,9	51,8	648,1
Media aritmética		3759,1	13,1	1,2	3,7	64,6	654,4
Desviación estándar		94,1	3,6	0,7	2,1	13,4	8,1

Realizado por: Gavilán E., 2023.

3.1.2. Sector Noroeste

La Tabla 2-4 presenta la textura del suelo la altitud, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y presión barométrica del sector Noroeste de la zona de estudio, valores medidos en diferentes días. La temperatura está en el rango de 18,1 °C y 6,9 °C, la altitud del lugar está en el

rango de 3875 m y 3653 m, la presión barométrica está en el rango 664 Hp y 649,1 Hp, la humedad relativa del lugar está en el rango de 98,9% y 48,1 %, la velocidad promedio del aire está en el rango de 1,1 m/s y 0,3 m/s y la velocidad máxima está en el rango de 2,9 m/s y 1,4 m/s. En el sector Noroeste se observó 4 texturas del suelo: el franco limoso, el franco arenoso, el franco francosa y franca siendo el franco francosa la textura más frecuente del sector.

Tabla 2-4: Parámetros ambientales de los puntos de muestreo del páramo, sector Noroeste

Punto de muestreo	Textura	Altitud (m)	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)		Humedad relativa (%)	Presión barométrica (hPa)
				Promedio	Máxima		
N.1	Franco - limoso	3673	15,9	0,6	1,8	55	664
N.2	Franco - limoso	3653	16,4	0,5	1,4	61,1	662,5
N.3	Franco - arenoso	3825	16,5	1,1	2,9	54,4	649,2
N.4	Areno - francosa	3796	6,9	0,8	2,7	98,8	653,3
N.5	Franco - limoso	3687	12,4	0,9	1,6	71	659,8
N.6	Areno - francosa	3875	17,5	0,4	1,5	54,3	649,1
N.7	Areno - francosa	3821	14,2	0,7	1,8	68,6	649,5
N.8	Areno - francosa	3827	18,1	0,3	1,4	48,1	650,3
N.9	Franca	3813	16,7	0,6	2,9	55	649,9
Media aritmética		3774,4	15	0,6	2	63	654,2
Desviación estándar		80,8	3,5	0,3	0,6	15,3	6,2

Realizado por: Gavilánez E. 2023

3.2.Resultados de la concentración de radón del sector Sureste.

El Gráfico 3-1 muestra las concentraciones de radón en cada punto de muestreo del sector Sureste de la zona de estudio; se observó que la mayor concentración de radón-222, es del punto S.3 con un valor de 19500 ± 322 Bq/m³, el cual se encuentra a una altitud de 3814 m, la menor concentración de radón-222 se observó en el punto S.10 con un valor de 2660 ± 120 Bq/m³, a una altitud de 3803 m. La línea naranja muestra la concentración promedio del sector Sureste es de $10739,09 \pm 5045,02$ Bq/m³, se puede ver que la mayoría de los puntos de este sector están por debajo del promedio.

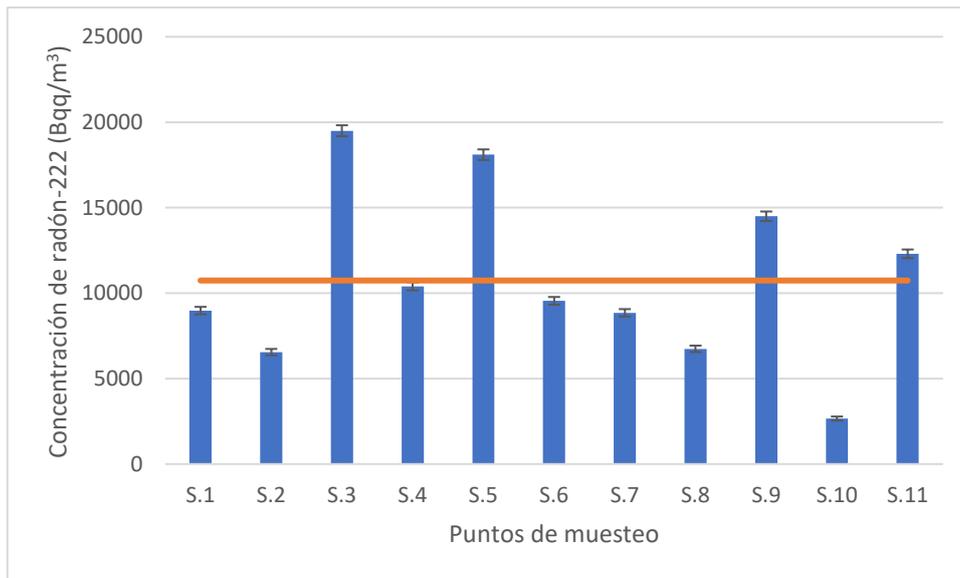


Gráfico 3- 4 Concentración de radón-222 del sector Sureste.

Realizado por: Gavilánez E. 2023

3.3.Resultados de la concentración de radón del sector Noroeste

El Gráfico 3-2 muestra las concentraciones de radón en cada punto de muestreo del sector Sureste de la zona de estudio; se observó que la mayor concentración de radón-222 se observó en el punto N.7 con un valor de 23000 ± 352 Bq/m³, y encuentra a una altitud de 3821 m, y la menor concentración de radón-222 se observó punto N.1 con un valor de 6440 ± 184 Bq/m³, él cual se encuentra en una altitud de 3673 m. La línea naranja muestra la concentración promedio del lugar es de $12283,33 \pm 5163,49$ Bq/m³, poco más de la mitad de los puntos se encuentran por debajo del promedio.

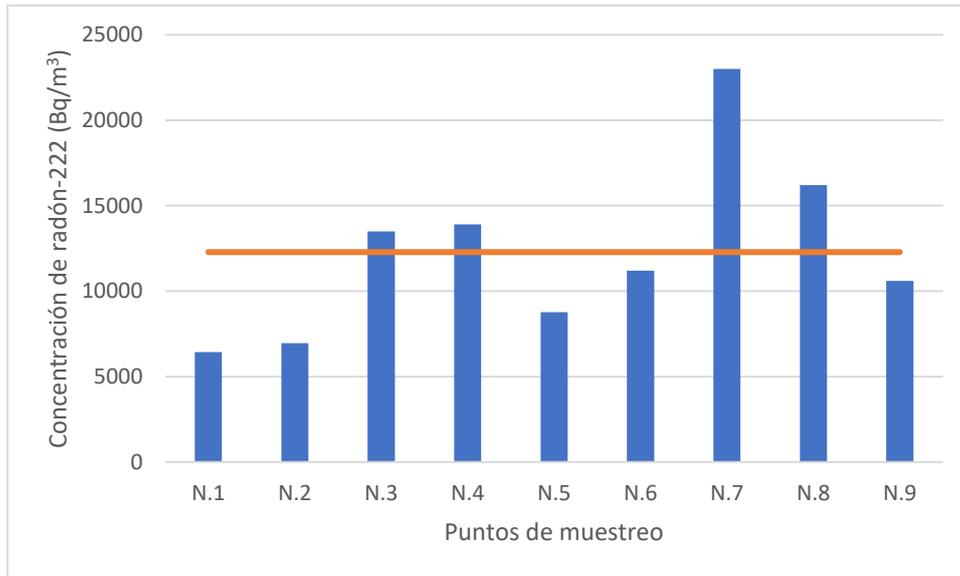


Gráfico 3- 5: Concentración de radón-222 del sector Noroeste.

Realizado por: Gavilánez E. 2023

3.4. Comparación del sector Sureste y sector Noroeste

Los valores medios de temperatura, velocidad promedio del viento, altitud, humedad relativa y presión barométrica reportados en las Tablas 1-4 y 2-4, dentro de las incertidumbres experimentales, muestran compatibilidad entre los dos sectores; en lo que se refiere a la textura del suelo, ambos sectores presentaron las mismas texturas, siendo las texturas más frecuentes de toda la zona de estudio el franco limoso y el areno francosa.

La Figura 3-3 muestra la concentración de radón-222 de los dos sectores Noroeste y Sureste, donde se puede apreciar que el 55 % de los datos superan los 10000 Bq/m³, valor representado por la línea roja.

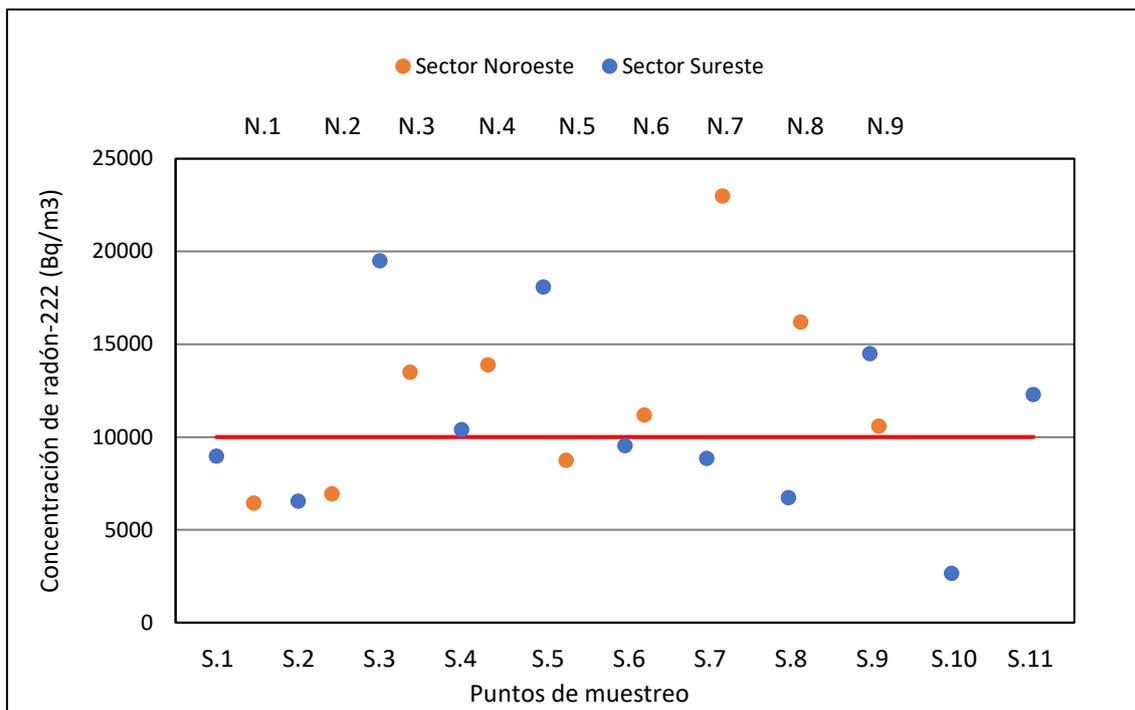


Gráfico 3- 6: Comparación de los niveles de radón en los sectores Sureste y Noroeste.

Realizado por: Gavilánez E. 2023

Los valores observados en este estudio superan la mayoría de las concentraciones de radón medidas en otros sectores de la provincia de Chimborazo, específicamente en las parroquias de San Juan, Calpi y Lizarzaburu, donde se registraron valores máximos de 6583 Bq/m³, 5397 Bq/m³ y 3463 Bq/m³ respectivamente (Guillermo D, Cabascango J, 2022 p 29-33). Estos valores también son superiores a los resultados obtenidos en la provincia del Azuay, donde la concentración máxima de radón fue de 4926 Bq/m³ en la estación meteorológica de Baños (González M, Karina M, 218, p41); incluso es superior a resultados obtenidos en países como Estados Unidos y China, por ejemplo, en Texas, el valor máximo de concentración de radón fue de 9350 Bq/m³ m³ (López, J. A., et al, 2016, p. 265-275) y en China, en los suburbios de Beijing se obtuvo un valor máximo de 14000 Bq/m³ (Kaina Sun., et al, 2004, p.1113-1117).

3.5. Tasa de exhalación de superficial y másica de radón desde las muestras de suelo

Las Gráficas 3-4 y 3-5 presentan las curvas de acumulación de radón dentro de la cámara cerrada de las muestras de suelo recolectadas en los puntos S11 y N8.

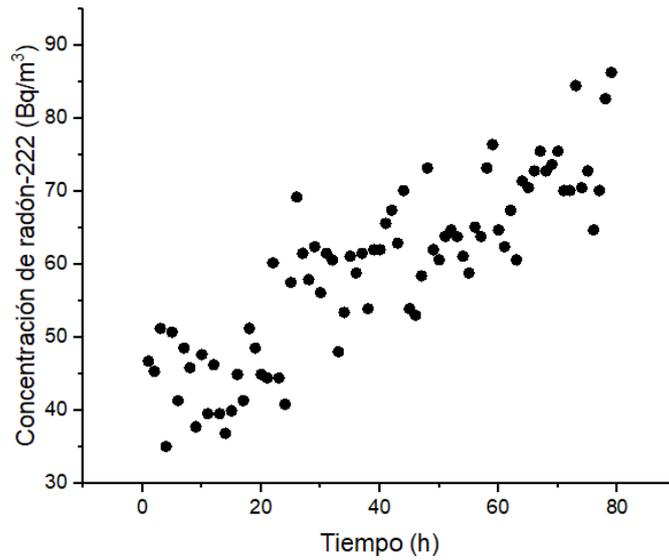


Gráfico 3- 5: Tasa de exhalación de radón de la muestra de suelo del punto de muestreo S.11 del sector Sureste

Realizado por: Gavilánez E. 2023

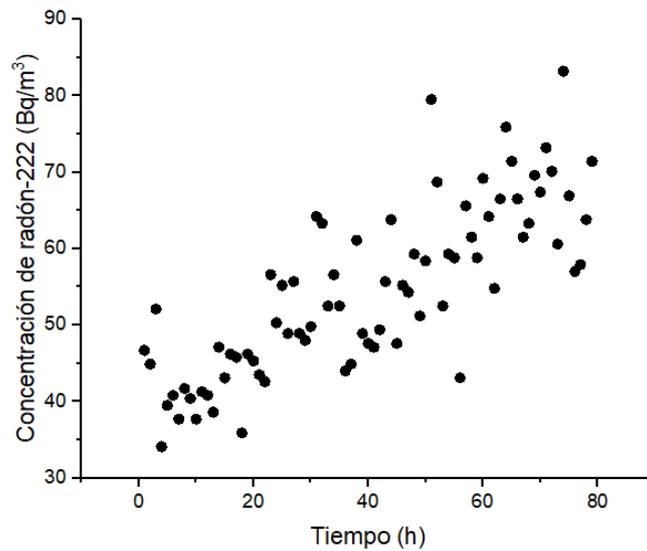


Gráfico 3- 6: Tasa de exhalación de radón de la muestra de suelo del punto de muestreo N.8. del sector Noroeste.

Realizado por: Gavilánez E. 2023

La Tabla 3-4 muestra la tasa de exhalación superficial y másica de radón de las muestras de suelo de los puntos de muestreo N8 y S11 (1244 g y 1315 g respectivamente) calculadas usando las ecuaciones (6) y (7) de la Sección 3.3.1. La pendiente inicial de la curva de crecimiento de radón dentro de la cámara (calculada con los primeros 24 puntos) para el punto S.11 fue $0,4663 \text{ Bq/m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $0,4681 \text{ Bq/m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para el punto N.8.

Tabla 3-4: Tasa de exhalación superficial y másica de radón-222 en muestras de suelo

Punto de muestreo	Tasa de exhalación superficial de radón-222 (Bq/m ² h)	Tasa de exhalación másica de radón-222 (Bq/Kg h)
N.8	0,708	0,034
S.11	0,705	0,032

Realizado por: Gavilánez E. 2023.

Es bien sabido que la concentración de radón es proporcional a la tasa exhalación (Saad, A. F., 2014. P.16), en este estudio las concentraciones en el suelo son altas y las exhalaciones de las muestras de suelo son bajas, por lo que se puede suponer que el radón viene de profundidades mayores.

CONCLUSIONES

Se midió las concentraciones de radón en el suelo del páramo de Navag en una superficie de 4,6 km², donde se estableció 20 puntos de muestreo, 11 puntos ubicados en el sector Sureste y 9 puntos en el sector Noroeste, con una concentración media $10739,09 \pm 5045,02$ Bq/m³ y $12283,33 \pm 5163,49$ Bq/m³ respectivamente.

Se midió los parámetros ambientales en los 20 puntos de muestreo de la zona de estudio, los resultados mostraron que los sectores Sureste y Noroeste presentan valores medios de altitud, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y presión barométrica compatibles dentro de las incertidumbres experimentales (1σ).

En sector Sureste de la zona de estudio, las tasas de exhalación superficial y másica presentaron valores de 0,705 Bq/m²h y 0,032 Bq/kg h respectivamente, mientras que el Noroeste fueron 0,708 Bq/m²h y 0,034 Bq/kg h respectivamente, considerando que las concentraciones en el suelo son altas y las exhalaciones de las muestras de suelo son bajas, se concluye que el radón viene de profundidades mayores a 1 metro.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar las mediciones de concentraciones de radón en otro periodo del año para posibles variaciones respecto a este estudio.

Se recomienda hacer un segundo estudio de la concentración de radón en el páramo de Navag ampliando la zona de estudio.

BIBLIOGRAFIA

1. **AL-TAMIMI, M. H.; ABUMURAD, K. M.** Radon anomalies along faults in North of Jordan. *Radiation Measurements*, 2001, vol. 34, no 1-6, p. 397-400. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00193-7](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00193-7)
2. **APPLETON, J. Donald.** Radon in air and water. En *Essentials of medical geology: Revised edition*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 239-277. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_11
3. **BAIZE, Stéphane, et al.** Active tectonics and earthquake geology along the Pallatanga fault, central Andes of Ecuador. *Frontiers in Earth Science*, 2020, vol. 8, p. 193. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00193>
4. **BURTON, M.; NERI, M.; CONDARELLI, D.** High spatial resolution radon measurements reveal hidden active faults on Mt. Etna. *Geophysical research letters*, 2004, vol. 31, no 7. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2003GL019181>.
5. **CANCHOS LÓPEZ, Víctor Oliver.** Monitoreo de concentración de radón en el distrito de San Juan de Miraflores (Lima-Perú) en el período 2015-2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/15589>.
6. **CECIL, L. Dewayne; GREEN, Jaromy R.** Radon-222. En *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Boston, MA: Springer US, 2000. p. 175-194. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6_6
7. **CHAO, Christopher YH, et al.** Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. *Building and Environment*, 1997, vol. 32, no 4, p. 355-362. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00071-6).

8. **CIANCAGLINI, Nicolás.** Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. *San Juan: Inta EEA*, 2010.

9. **DURRIDGE COMPANY INC.** RAD7 Electronic Radon Detector User Manual. Billerica- USA, 2021. Disponible en: <https://durridge.com/documentation/RAD7%20Manual.pdf>.

10. **DURRIDGE COMPANY INC.** Soil Gas Probe User 's Manual. Billerica-USA, 2018. Disponible en: <https://durridge.com/documentation/Soil%20Gas%20Probe%20Manual.pdf>.

11. **VALENCIA, GUSTAVO GARZÓN.** *El gas radón*. 2009 Colombia. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1932.4800>

12. **GONZÁLEZ MOGROVEJO, Karina Montserrat.** *Correlación de las variables meteorológicas y físicas del suelo, con la concentración de radón en el mismo, en ocho puntos de la periferia de la ciudad de Cuenca, Ecuador*. 2018. Tesis de Licenciatura. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15184>

13. **GUILLCA GUAMÁN, Evelin Liliana; NARANJO BUENAÑO, Kathya Milena.** *Estimación de la concentración de gas radón en suelo mediante el método weeks en la falla Pallatanga en el sector de Cajabamba*. Ecuador 2022. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17676>

14. **HERRERA LLERENA, Darwin Guillermo; CABASCANGO ULCUANGO, Jerson Santiago.** Concentraciones de radón-222 en el suelo de una zona del cantón Riobamba perpendicular a la Falla Pallatanga. 2022. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17495>

15. **IOANNIDES, K., et al.** Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones. *Applied radiation and isotopes*, 2003, vol. 59, no 2-3, p. 205-213. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00164-7)
16. **IOVINE, G., et al.** Soil-gas radon anomalies in three study areas of Central-Northern Calabria (Southern Italy). *Natural Hazards*, 2018, vol. 91, p. 193-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2839-x>
17. **KING, Chi-Yu.** Impulsive radon emanation on a creeping segment of the San Andreas fault, California. *pure and applied geophysics*, 1984, vol. 122, p. 340-352. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00874603>
18. **KOVLER, Konstantin.** Radioactive materials. En *Toxicity of building materials*. Woodhead Publishing, 2012. p. 196-240. Disponible en: <https://doi.org/10.1533/9780857096357.196>.
19. **KULALI, F.; AKKURT, I.; ÖZGÜR, N.** The effect of meteorological parameters on radon concentration in soil gas. *Acta Physica Polonica A*, 2017, vol. 132, no 3, p. 999-1001. Disponible en: <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.999>
20. **LASTRA, Marta Fuente.** Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos. 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10902/9385>
21. **LÁZARO BENAVIDES, Carlos, et al.** Evaluación de los factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores. 2021. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/589>.
22. **LÁZARO-MANCILLA, Octavio, et al.** Concentraciones de gas radón (^{222}Rn) en suelo de la zona urbana de Morelia, Michoacán, México y su relación con fallas potencialmente sísmicas y asociadas con el proceso de subsidencia-fluencia. *Revista Mexicana de*

- Ciencias Geológicas*, 2020, vol. 37, no 2, p. 157-177. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.2.1547>
23. **LIZA, R. R. B., et al.** Tasa de exhalación de ^{222}Rn del suelo en el yacimiento arqueológico Huaca 20. *Radiaciones ionizantes y su impacto*, 2017, vol. 63. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10902/25732>.
24. **LÓPEZ, J. A., et al.** Correlation between underground radon gas and dormant geological faults. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, 2016, vol. 4, no 1, p. 265-275. Disponible en: <https://doi.org/10.15415/jnp.2016.41025>
25. **MANCILLA, Octavio Lázaro; LÓPEZ, Dina L.; LÓPEZ, Jaime Reyes.** Concentración de Gas Radón en el suelo a lo largo de un Perfil Transversal a la Falla Imperial, Colonia Castro, Mexicali y su relación con la ocurrencia de Terremotos y Efectos en la Salud. 2006. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/260788808>
26. **MEZA, Luisa F., et al.** Anomalías de gas radón asociadas a la sismicidad en la región volcánica de los Coconucos (Cauca, Colombia). *Boletín Geológico, Colombia, Cauca*, 2018, no 44, p. 101-114. Disponible en: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.44.2018.37>
27. **MIKLYAEV, P. S., et al.** The results of long-term simultaneous measurements of radon exhalation rate, radon concentrations in soil gas and groundwater in the fault zone. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, vol. 167, p. 109460. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109460>
28. **MOROCHO, Carlos Chunchu; CHUNCHO, Guillermo.** Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 2019, vol. 9, no 2, p. 71-83. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/344180955>.

29. **NIETO FUENTE, Sergio, et al.** Caracterización de un sistema de referencia de exhalación de radón y calibración de distintos dispositivos de medida. 2022. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10902/25732>.
30. **ORBE, Jheny, et al.** An evaluation of radon in drinking water supplies in major cities of the province of Chimborazo, central Andes of Ecuador. *Water*, 2023, vol. 15, no 12, p. 2255. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w15122255>
31. **ORBE, Jheny.** Radon measurement techniques in building materials and water using Italian and Ecuadorian samples (Trabajo de Titulación) (Doctorado). Università della Calabria, Reggio Calabria - Italia. 2019. pp. 17-30.
32. **PAZMIÑO RODRÍGUEZ, Geraldine Micaela.** Influencia de la intervención en los suelos del páramo de Navag-Chimborazo en el contenido de materia orgánica. 2020. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14067>
33. **PENA, P., et al.** Radon in the indoor of habitable and workable zones in the Estado de Mexico; Radon en el interior de zonas habitacionales y laborables del Estado de Mexico. 2003. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20655553>
34. **Pylon Electronics Inc.** Passive Lucas Type Cell Detector Manual. 2019
35. **Pylon Electronics Inc.** Radiation Monitor Manual. 2019
36. **RAMÍREZ GUARDIOLA, Esthela Jenifer.** Evaluación de gas radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) en suelo. Caso de estudio ciudad de Mexicali y zonas conurbadas. 2014. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12930/3161>.

37. **MARTÍN, Rengifo, et al.** Mediciones de gas radón en un segmento de la falla de boconó, estados táchira y mérida. *Boletín de Geología*, 2015, vol. 37, no 2, p. 57-74. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349639271006>
38. **ROJAS HANCCO, Jhonny Jonnatan.** Monitoreo de Radón 222 en la zona sur de Lima. 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7441>
39. **SAAD, A. F.; AL-AWAMI, Hend H.; HUSSEIN, N. A.** Radon exhalation from building materials used in Libya. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 101, p. 15-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.03.030>
40. **SUN, Kainan; GUO, Qiuju; CHENG, Jianping.** The effect of some soil characteristics on soil radon concentration and radon exhalation from soil surface. *Journal of nuclear science and technology*, 2004, vol. 41, no 11, p. 1113-1117. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/18811248.2004.9726337>
41. **THOMAS, Donald M.; CUFF, Kevin E.; COX, Malcolm E.** The association between ground gas radon variations and geologic activity in Hawaii. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, vol. 91, no B12, p. 12186-12198. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/JB091iB12p12186>
42. **VÁSCONEZ, Patricio Mena; HOFSTEDE, Robert.** Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica Los Andes Cent*, 2006, p. 91-109.
43. **VAUPOTIČ, J., et al.** Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne Fault in NW Slovenia. *Natural hazards and earth system sciences*, 2010, vol. 10, no 4, p. 895-899. Disponible en: <https://nhess.copernicus.org/articles/10/895/2010/>
44. **VÁZQUEZ, Borja Frutos; ADÁN, Manuel Olaya.** *Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios*. Consejo de Seguridad Nuclear, 2010.

ANEXOS



Anexo 1: Purga del RAD-7.



Anexo 2: Perforación del suelo a un metro de profundidad.



Anexo 3: Colocación de la sonda de acero inoxidable.



Anexo 4: Conexión de la sonda de acero con el RAD-7.



Anexo 5: impresión de los resultados de la concentración de radón.



Anexo 6: Tamización de las muestras.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 08/05/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR

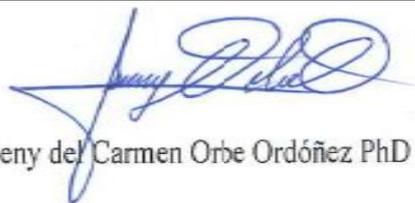
Nombres – Apellidos: Elizandro Renan Gavilánez Falconez

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: Ciencias

Carrera: Física

Título a optar: Físico



Doc. Jheny del Carmen Orbe Ordóñez PhD

Director del Trabajo de Titulación



Biof. Azucena Nataly Bonilla García

Asesor del Trabajo de Titulación