

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



Riesgo radiológico debido a la radiactividad natural y  
exhalación de radón de suelos y materiales de  
construcción peruanos

Tesis para obtener el grado académico de Doctor en Física que  
presenta:

**M.Sc. Rafael Ángel Liza Neciosup**

Asesor:

**Dr. Daniel Francisco Palacios Fernandez**

Lima, 2023


## Informe de Similitud

Yo, Daniel Francisco Palacios Fernández, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la Tesis de Doctorado titulada Riesgo Radiológico debido a la radiactividad natural y exhalación de Radón de suelos y materiales de construcción Peruanos, del autor Rafael Ángel Liza Neciosup, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 21%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 27/01/2023. No obstante, se tienen que omitir las referencias 6 y 9 del informe, ya que corresponden a trabajos del mismo alumno. El índice de similitud, omitiendo las referencias señaladas, es de 19%, lo que está dentro del límite establecido.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 30/01/2023

Apellidos y nombres del asesor: Palacios Fernández, Daniel Francisco	
CE: 001490304	Firma 
ORCID: 0000-0001-8248-347X	

## Dedicatoria

*A mi Lez, gracias por todo mi querida esposa.*

*A Noah, mi mayor motivación día a día.*

*A Adri, te adoramos.*

*A mis padres, Rafael y Angélica*

*A Luzmila y Rodri*



*La ciencia es la progresiva aproximación del hombre al mundo real*

*Max Planck*



## Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi esposa por su comprensión y apoyo durante todo este proceso y por toda la paciencia que ha tenido. Sé que no ha sido fácil, pero lo hemos logrado.

Un agradecimiento especial al Dr. Daniel Palacios, mi asesor, por su dedicación y paciencia durante todos estos años. Los consejos y observaciones que me ha brindado han sido de gran importancia. Asimismo, quiero agradecer a la Dra. María Elena López, quien siempre ha estado muy atenta a mi desarrollo desde que comencé mis estudios en la PUCP y de quien aprendí tanto. También quiero agradecer a la profesora Patrizia Pereyra, siempre será un verdadero placer trabajar junto a usted. Muchas gracias por su confianza y motivación constante.

Al Dr. Jesús García, Dr. Hector Alonso y Dr. Jonay González por su amable hospitalidad durante mi estadía en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

A mis compañeros del grupo de investigación GITHUNU, en especial a Jhonny Rojas, César Guevara, Omar Vega y demás miembros, ha sido un placer trabajar junto a ustedes. A mis colegas, amigos y hermanos a quienes he tenido el placer de conocer durante estos años y que de alguna manera han contribuido al desarrollo de esta tesis, a Nhell Cerna y Luis Conde, muchas gracias.

Finalmente, quiero agradecer el financiamiento recibido por CienciActiva de Concytec, a quien agradezco por la beca doctoral.

## Resumen

La exposición al Radón es una preocupación importante debido a su papel en el aumento del riesgo de cáncer de pulmón. Para evaluar el riesgo de exposición, es necesario realizar mediciones de Radón en el aire interior de los hogares, y tener caracterizado el riesgo radiológico debido a los materiales de construcción y tomar medidas de prevención si es necesario. La exhalación de Radón en materiales de construcción se midió empleando el método de acumulación en una cámara cerrada durante un período de 24 horas para muestra disgregada o pulverizada y de 28 días para material compacto. La concentración de Radón en la cámara se mide regularmente durante este período y se utiliza para calcular la tasa de exhalación en masa y en superficie respectivamente. En el caso de suelos, el riesgo radiológico está asociado con la permeabilidad la concentración de Radón en el suelo. La medición de estos parámetros permitió determinar el potencial geogénico de Radón. Los resultados de este estudio muestran que la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  en materiales de construcción y suelos puede variar significativamente. En materiales de construcción, se encontró una tasa de exhalación promedio de  $14.01 \pm 1.04 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , con un rango de  $[4.50 \pm 0.42]$  a  $[22.34 \pm 1.30] \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Además, se encontró una buena correlación entre la concentración total de Radio en los materiales de construcción y la tasa de exhalación de Radón, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.88. Los dos tipos de ladrillo mostraron las tasas de exhalación más altas, posiblemente debido a la cercanía de la zona de extracción de materia prima para su elaboración con regiones con una alta probabilidad de presentar uranio. Por otro lado, las muestras de yeso no mostraron exhalación significativa de  $^{222}\text{Rn}$ , lo que concuerda con la cantidad de Radio en estas muestras. Finalmente, los resultados obtenidos de índices radiológicos de todos los tipos de muestras son importantes ya que demuestran que los materiales de construcción estudiados no representan un riesgo para la salud al usarlos en la construcción de viviendas.

## Abstract

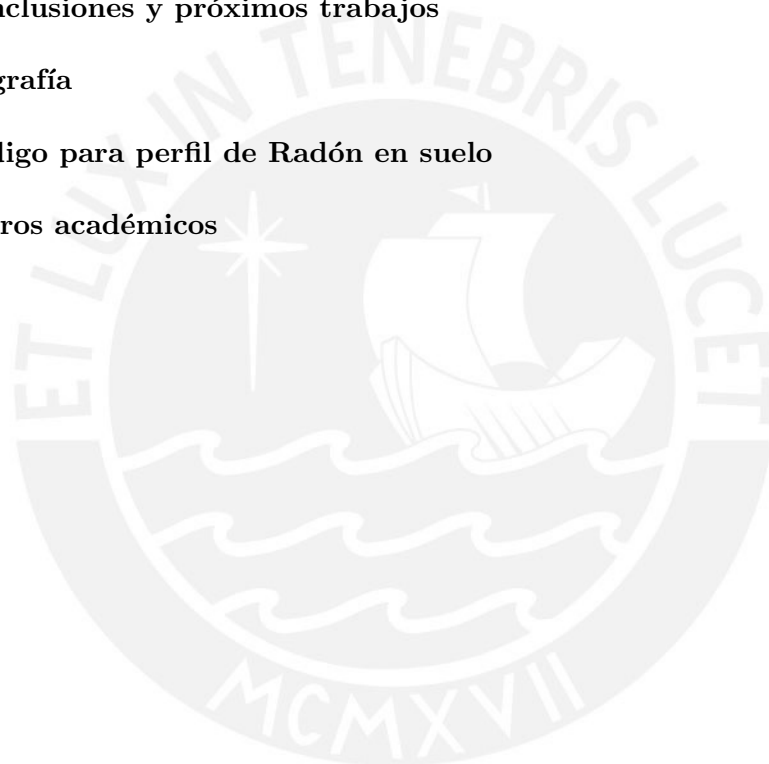
Radon exposure is a major concern due to its role in increasing the risk of lung cancer. To assess radiation exposure risks, measuring radon levels indoor air and characterizing the radiological hazard due to building materials is necessary. The radon exhalation rate in building materials was measured by closed-chamber accumulation over 24 h for dissociated or pulverized samples and 28 days for compacted materials. The Radon concentration in the chamber is measured regularly during this period and is used to calculate the Radon mass exhalation rate and Radon surface exhalation rate, respectively. In the case of soils, the radiological risk is associated with the geogenic potential of Radon. This parameter is obtained from the permeability and the concentration of Radon in the ground. The results of this study show that the radon exhalation rate in building materials and soils can vary significantly. In building materials, an average exhalation rate of  $14.01 \pm 1.04$  mBq  $\text{kg}^{-1}\text{h}^{-1}$  was found, with a range of  $[4.50 \pm 0.42]$  to  $[22.34 \pm 1.30]$  mBq  $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ . In addition, a good correlation was found between the total Radium concentration in building materials and the Radon exhalation rate, with a correlation coefficient ( $R^2$  0.88). The radon exhalation rate in bricks is higher than in other samples. It can be because the area of raw material extraction for the elaboration of bricks is the closest to the uranium-producing possible regions. Gypsum samples did not show significant radon exhalation, which is consistent with the amount of radium in these samples. Finally, the results obtained for radiological indexes (Radium equivalent  $\text{Ra}_{eq}$ , Gamma index  $I_\gamma$ , and External hazard  $\text{H}_{ex}$ ) all types of samples are suitable for use as building materials because they present a low activity concentration.

# Índice general

<b>Lista de Figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Conceptos generales . . . . .	1
1.2. Descripción del área de estudio . . . . .	4
1.3. Antecedentes y estado actual del tema . . . . .	4
1.4. Equipos y métodos utilizados . . . . .	5
1.5. Objetivos . . . . .	9
<b>2. Emanación y exhalación de Radón en suelos</b>	<b>11</b>
2.1. Generación y transporte de Radón . . . . .	11
2.1.1. Criterios para la medición de concentración de Radón en suelo	14
2.2. Concentración de Radón en suelo . . . . .	18
2.3. Emanación y exhalación de Radón en suelos . . . . .	24
2.4. Solución numérica al transporte de Radón a partir de datos obtenidos de manera experimental . . . . .	26
2.4.1. Resultados experimentales vs simulados . . . . .	26
<b>3. Relación entre el potencial geogénico de Radón y la concentración de Radón en Lima metropolitana.</b>	<b>31</b>
3.1. Medición de permeabilidad de suelo . . . . .	32
3.2. Potencial geogénico de Radón . . . . .	33
3.3. Mapa predictivo de Radón indoors . . . . .	35
<b>4. Diseño y construcción de un acumulador para la medición de la exhalación de muestras compactas y disgregadas. Emanación y exha- lación de Radón en materiales de construcción.</b>	<b>37</b>
4.1. Diseño de cámara de acumulación . . . . .	37
4.2. Prueba de fuga del acumulador . . . . .	38
4.3. Zona de estabilidad del acumulador . . . . .	41



4.4. Modos de medición . . . . .	44
4.5. Emanación y exhalación de Radón en materiales de construcción . .	47
4.5.1. Exhalación de Radón en masa . . . . .	48
4.5.2. Exhalación superficial de Radón . . . . .	49
4.5.3. Mediciones de tiempo largo vs Mediciones de tiempo corto . .	49
<b>5. Índices radiométricos debido a materiales de construcción y suelos en la ciudad de Lima</b>	<b>55</b>
5.1. Determinación de la dosis gama en materiales de construcción . . . .	56
<b>6. Conclusiones y próximos trabajos</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
<b>A. Código para perfil de Radón en suelo</b>	<b>70</b>
<b>B. Logros académicos</b>	<b>72</b>



# Índice de figuras

1.1. Cadena de decaimiento del $^{238}\text{U}$ [1] . . . . .	2
1.2. Mapa litológico de Lima correspondiente al cuadrángulo 25i [2] . . . .	4
1.3. Equipos de medición activos (a y b) y pasivos (c), empleados en la investigación. . . . .	6
1.4. Radon Jok . . . . .	8
2.1. Representación del fenómeno de emanación de Radón. En los puntos A, B, E, F, G y H, se considera átomos de Radón emanados, mientras que en los puntos C, D e I, se consideran como no emanados [3] . . . .	12
2.2. Exhalación desde el suelo al aire libre . . . . .	13
2.3. Diagrama esquemático de la medición de Radón en el suelo con el RAD7. . . . .	15
2.4. Esfera de gas del suelo. . . . .	16
2.5. Perfil de Radón en suelo en la estación meteorológica de la PUCP . . . .	19
2.6. Zona de medición del perfil de Radón en suelo en la PUCP . . . . .	20
2.7. Perfil de Radón en suelo de cuatro puntos de la zona de medición en la estación meteorológica PUCP . . . . .	20
2.8. Mapa de permeabilidad en suelo . . . . .	21
2.9. Sistema de medición en el terreno donde se indican las coordenadas de los tubos de medición (las mismas coordenadas se emplearan en todos los mapas) . . . . .	22
2.10. Variación de la concentración de $^{222}\text{Rn}$ en suelo a 80 cm de profundidad usando cámara de difusión . . . . .	23
2.11. Esquema de medición de exhalación de Radón en suelo a partir de la norma ISO 11665-7 . . . . .	24
2.12. Mapa de exhalación de Radón en la estación meteorológica PUCP . . . .	26
2.13. Perfil de Radón en suelo a partir de la solución numérica considerando sólo difusión . . . . .	28
2.14. Perfil de Radón en suelo a partir de la solución numérica considerando difusión + convección. . . . .	29

2.15. Comparación de las curvas generadas por resultados experimentales y por solución numérica del perfil de concentración de Radón a diferentes profundidades . . . . .	30
3.1. Medición de permeabilidad en viviendas empleando el Radon-Jok . . .	32
3.2. Potencial Geogenico de Radón e Índice de Radón . . . . .	34
3.3. Mapa de Potencial Geogénico de Radón en el distrito de Pueblo Libre	35
3.4. Mapa predictivo de Radón indoors en los distrios de San Miguel, Pueblo libre (Magdalena vieja), y Jesús María . . . . .	36
4.1. Cámara de acumulación, caja de control de temperatura y humedad, chiller y bomba. . . . .	38
4.2. Prueba de hermeticidad por decaimiento sin cloroformo y sin grasa de vacío . . . . .	40
4.3. Prueba de hermeticidad por decaimiento con cloroformo y con grasa de vacío . . . . .	41
4.4. Arreglo experimental para medir la estabilidad en la cámara de acumulación . . . . .	42
4.5. Evolución de la humedad y dentro de la cámara de acumulación . . .	43
4.6. Zona de estabilidad en la cámara de acumulación . . . . .	44
4.7. Intercomparación en la medición de Rad7 y AG . . . . .	45
4.8. Curva de crecimiento de AG . . . . .	45
4.9. Curva de crecimiento de Rad7 . . . . .	46
4.10. Curva de crecimiento de RTM . . . . .	46
4.11. Diseño experimental de la prueba de hermeticidad del contenedor de acero. . . . .	50
4.12. Comparación de la concentración de Radón de fondo con la concentración de Radón debida a su posible fuga del recipiente cilíndrico con mineral de uranio. . . . .	50
4.13. Curva y pendiente de crecimiento para método largo y corto respectivamente . . . . .	51
4.14. Arreglo experimental para medir la tasa de exhalación de Radón de la muestra contenida en la cámara de acumulación de acero inoxidable empleando RAD7. . . . .	52
5.1. Espectro gamma de diferentes materiales como yeso, ladrillo y muestra de referencia del IAEA . . . . .	56
5.2. Métodos de sellados empleados para el experimento de fugas. . . . .	57
5.3. Cámara de acumulación que contiene el AG y la muestra de mineral de uranio encerrada en el contenedor cilíndrico de plástico para realizar la prueba de hermeticidad . . . . .	57

5.4. Comparación de la concentración de Radón de fondo con la concentración de Radón debida a su posible fuga del recipiente cilíndrico de plástico con mineral de uranio. . . . . 58



# Índice de tablas

1.1. Valores de actividad de concentración de Radioisótopos primarios y tasa de exhalación de Radón en algunos países . . . . .	9
2.1. Datos de modelo esférico de la profundidad mínima de muestreo [4].	17
2.2. Valores de concentración a diferentes profundidades . . . . .	19
2.3. Concentración de $^{222}\text{Rn}$ a 80 cm de profundidad . . . . .	23
2.4. Exhalación de Radón superficial en la estación meteorológica PUCP.	25
2.5. Parámetros empleados en la solución analítica de la ecuación de transporte unidimensional . . . . .	28
3.1. Valores de concentración de Radón y permeabilidad a 70 cm de profundidad y Potencial Geogenico de Radón (PGR) . . . . .	34
4.1. Constantes de fuga . . . . .	47
4.2. Cálculo de la tasa de exhalación de Radón en masa . . . . .	51
4.3. Pendiente "m" y tasa de exhalación másica de Radón "ER" . . . . .	53
5.1. Concentración de actividad de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ y $^{40}\text{K}$ en muestras pulverizadas de materiales de construcción de la costa central peruana.	59
5.2. Valores de los índices radiométricos, Índice gamma, Índice de riesgo externo y Radio equivalente . . . . .	60

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Conceptos generales

La radiactividad a la que está expuesto el ser humano tiene dos orígenes, naturales y artificiales. La radiación artificial incluye los procedimientos médicos a los que una persona puede someterse en promedio por año. Por otro lado, la radiactividad natural incluye la radiación terrestre interna y externa, la radiación cósmica, los alimentos, los suelos y el Radón [5]. La corteza terrestre contiene numerosos radioisótopos, y entre ellos el  $^{238}\text{U}$  es particularmente relevante en términos de protección radiológica. Se han identificado yacimientos ricos en  $^{238}\text{U}$  en varias partes del mundo, y en Perú, las regiones de Piura, Puno y Cusco tienen una cantidad probable de 13000, 12200 y 521.76 toneladas, respectivamente. Además, en Lima se estima que hay 5.28 toneladas de óxido de uranio  $\text{U}_3\text{O}_8$  [6]. La distribución desigual del  $^{238}\text{U}$  en la corteza terrestre es un tema de gran interés debido a los productos de decaimiento que pueden causar daño a la cadena de ADN si se inhalan. El  $^{226}\text{Ra}$ , uno de los productos de decaimiento del  $^{238}\text{U}$ , se descompone en un elemento único en su cadena de decaimiento, el gas Radón, cuya progenie puede quedar atrapada en los pulmones y generar daño a la cadena de ADN.

En la Figura 1.1 se puede observar la cadena de decaimiento del  $^{238}\text{U}$ .

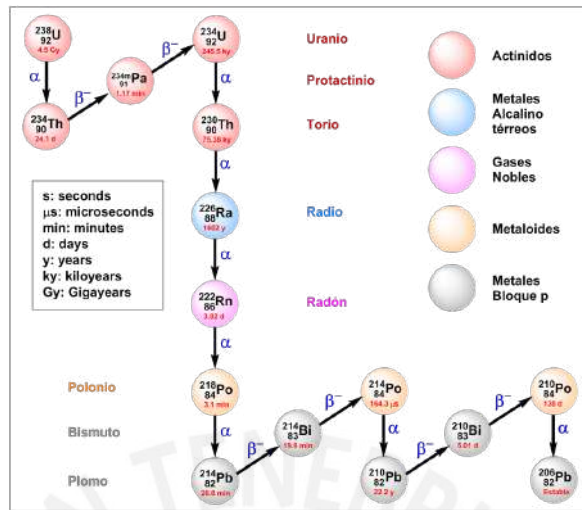


Figura 1.1: Cadena de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  [1]

El Radón es un gas inodoro e incoloro que se produce como un producto de descomposición del uranio y del radio presentes en la corteza terrestre. La generación de Radón ocurre cuando un núcleo de radio decae y emite una partícula alfa, lo que convierte al núcleo en uno de Radón.

La generación y transporte de  $^{222}\text{Rn}$  en un material poroso conlleva un análisis de la concentración y distribución de  $^{226}\text{Ra}$  en los granos del material poroso. Esta distribución puede ser uniforme o superficial [7] afectando la cantidad de Radón emanado, mientras que factores físicos como la permeabilidad, tortuosidad, contenido de humedad, tamaño de grano, entre otros pueden afectar el transporte de Radón.

El Radón generado en las rocas y suelos puede migrar a través del medio por difusión y/o convección, y su exhalación se refiere al proceso en el que el gas Radón escapa del material y entra en la atmósfera [8]. En el interior de edificios y viviendas, el Radón puede acumularse a través de la exhalación y aumentar los niveles de radiación. La exposición a altos niveles de Radón contribuye significativamente al riesgo de desarrollar cáncer de pulmón y es la segunda causa principal de esta enfermedad, después del tabaquismo [9]. En varios países del mundo, se han llevado a cabo estudios exhaustivos para comprender mejor la relación entre la exposición al Radón y la incidencia del cáncer de pulmón. Estos estudios han permitido identificar áreas geográficas con concentraciones más altas de Radón, así como identificar las prácticas de construcción que pueden contribuir a la acumulación de este gas en el interior de las viviendas. Como resultado, las autoridades sanitarias han implementado medidas para monitorear y controlar los niveles de Radón en áreas de alto riesgo, fomentando la realización de pruebas de detección y promoviendo la adopción de técnicas de mitigación en la construcción de nuevos hogares.

La construcción de viviendas implica el uso de una variedad de materiales, algu-

nos de los cuales contienen radionúclidos naturales. Si los niveles de estos radionúclidos superan los límites permitidos, pueden presentar una amenaza para la salud de las personas que habitan en estas viviendas. En los últimos años se ha observado un incremento en la atención hacia el análisis del efecto radiológico de estos materiales para evaluar sus contribuciones a las dosis de exposición externa e interna, especialmente en los casos que la materia prima para la elaboración de los materiales de construcción (MC), proviene de zonas con relativo alto contenido de radionúclidos pertenecientes a las series de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , o relaves de la industria minera. Es importante destacar que la exposición externa se refiere a la emisión de radiación gamma por parte de los radioisótopos de origen natural contenidos en los materiales empleados en la edificación de viviendas, los cuales pueden elevar el nivel de radiación de fondo existente. Por otro lado, la exposición interna esta mayoritariamente relacionada a la inhalación de la progenie del  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{220}\text{Rn}$  (Torón).

Para reducir el riesgo de exposición a la radiactividad natural y exhalación de Radón en materiales de construcción, se pueden tomar medidas preventivas, como seleccionar cuidadosamente los materiales de construcción, garantizar una adecuada ventilación en los edificios y realizar pruebas y mediciones regulares para monitorear los niveles de radiación. Los materiales de construcción que contienen radiactividad natural se conocen como materiales NORM, y se utilizan ampliamente en la construcción de edificios, carreteras, puentes y otras infraestructuras, como granito, piedra caliza, arcilla y otros tipos de rocas y minerales. Además, algunos materiales de construcción pueden ser contaminados con elementos radiactivos durante su proceso de fabricación, transporte y almacenamiento, y se conocen como materiales TNORM. Por ejemplo, la ocurrencia de fenómenos naturales como la erosión, las precipitaciones, los terremotos, las erupciones volcánicas, etc., ocasionan aluviones, huaicos, deslizamientos de tierra y rocas, entre otros, puede ocasionar que materiales con un relativo alto contenido de metales pesados, especialmente materiales que contienen isótopos radiactivos naturales, NORM, y relaves mineros, sean transportados desde zonas mineras distantes a zonas pobladas y/o de extracción de materiales de construcción [2]. Como es sabido, la mayoría de los relaves mineros tienen un alto contenido de NORM, por lo que la industria minera es considerada generadora de TE-NORM [10].

La radiactividad natural y la exhalación de Radón en materiales de construcción pueden variar significativamente según su origen geológico y su proceso de fabricación. Por lo tanto, es crucial realizar mediciones y análisis detallados de los materiales de construcción para determinar su radiactividad natural y exhalación de Radón.



## 1.2. Descripción del área de estudio

Las mediciones de concentración de Radón en suelo y de materiales de construcción se ha realizado en algunos distritos de Lima metropolitana con características de suelo muy similares desde un punto de vista de seguridad para la construcción de viviendas. En la Figura 1.2 se puede ver el mapa litológico del cuadrángulo 25i correspondiente a Lima metropolitana.



Figura 1.2: Mapa litológico de Lima correspondiente al cuadrángulo 25i [2]

De acuerdo a lo señalado por Palacios et al [11] los suelos de esta zona de Lima presenta una distribución casi uniforme en cuanto a depósitos aluviales. Por otro lado, la zona norte y sur de Lima presenta ligeras variaciones con apariciones de rocas plutónicas y volcánicas, lo que podría inferir una mayor presencia de radioisótopos naturales.

## 1.3. Antecedentes y estado actual del tema

La radiactividad natural y la exhalación de Radón han sido temas de interés en todo el mundo debido a su posible impacto en la salud humana. Existen estudios previos en Perú sobre la radiactividad natural en suelos y materiales de construcción, pero no existen estudios exhaustivos sobre la exhalación de Radón en el país.

En Lima, desde el año 2014 se han realizado mediciones de Radón en interiores empleando detectores de trazas LR-115. Los resultados de estas mediciones se pueden resumir en los trabajos de:

- [12], donde se realizó la medición de niveles de  $^{222}\text{Rn}$  en viviendas de Lima durante otoño a primavera de 2014, utilizando detectores pasivos SSNTDs. Los resultados indican presencia de  $^{222}\text{Rn}$  pero no discriminan sus descendientes.
- [13], este trabajo mide los niveles de  $^{222}\text{Rn}$  y su progenie en interiores de viviendas en San Martín de Porres, usando detectores pasivos de huellas nucleares. Se determinó un rango de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  y se elaboró un mapa para este distrito de Lima metropolitana.
- [14], en este trabajo se presentan las mediciones de Radón en viviendas de Lima Metropolitana utilizando dos monitores pasivos de Radón y detectores LR-115.
- [2], en este estudio determinó la concentración de Radón en el suelo de Lima usando detectores de huellas nucleares tipo LR-115 en 20 agujeros distribuidos en 15 distritos de la ciudad. Los valores de Radón variaron de 0.1 a 64.3 kBq/m<sup>3</sup>. Las concentraciones más altas se encontraron en áreas de depósitos aluviales cuyo material parental fue removido por los ríos Chillón y Huaycoloro. Las concentraciones de Radón fueron mayores en áreas cercanas a volcanes y menos distantes de ríos.

En estos trabajos de investigación, llama la atención la existencia de medición de concentración de Radón en interiores superior a los 200 Bq.m<sup>-3</sup> (límite propuesto por el Instituto peruano de energía nuclear), así como concentraciones de Radón en suelo por encima de los 50 kBq.m<sup>-3</sup> clasificados como de alto riesgo de acuerdo a lo señalado por [15].

#### 1.4. Equipos y métodos utilizados

La cuantificación de este gas radiactivo ha implicado el desarrollo de múltiples equipos de medición, los cuales se pueden clasificar en dos tipos según el método que empleen: pasivos o activos.

El método pasivo conlleva el uso de carbón activado, detectores de trazas, electrets o incluso equipos electrónicos como el RedElec Recon, entre otros. En este método, se llevan a cabo mediciones de exposición prolongadas con una duración que puede variar entre varios días y varios meses. Los detectores de trazas, que son dispositivos integradores, son útiles para realizar mediciones a gran escala, como por ejemplo, evaluar la concentración en hogares.

El modo de medición de los detectores de trazas consiste en colocarlos en un ambiente donde se presume existe una concentración de Radón que se quiere medir durante un tiempo promedio de 1 a 3 meses, según la naturaleza del estudio. El inconveniente de este método es que no se puede conocer de manera instantánea la concentración de Radón, ya que es necesario enviar estos dispositivos a un laboratorio para su análisis y obtener el valor estimado de la concentración promedio de Radón.

Por otro lado, los dispositivos de medición activos emplean un sistema electrónico que permite la cuantificación del nivel de Radón en cuestión de minutos u horas. Estos dispositivos son adecuados cuando se quiere analizar el comportamiento del gas en un ambiente, puntos de fuga, zonas de concentración anómala y su comportamiento ante la variación de las condiciones ambientales.



Figura 1.3: Equipos de medición activos (a y b) y pasivos (c), empleados en la investigación.

En la Figura 1.3 se pueden observar los dispositivos de medición activa como el Rad7 (DurrIDGE), RadElec Recon (Rad Elec Inc) y AlphaGuard (Bertin Technologies). El dispositivo RadElec Recon trabaja únicamente en modo difusión, mientras que el Rad7 lo hace sólo en modo de flujo. El equipo AlphaGuard es ampliamente reconocido y es utilizado como referencia por varios laboratorios, y es capaz de operar en ambos modos de medición.

La determinación de los niveles de concentración de Radón en el suelo o la exhalación de Radón de los MC requiere, no solo el uso de instrumentos comercialmente disponibles, sino también la creación de sistemas específicos que permitan generar las condiciones necesarias para llevar a cabo dichas mediciones.

En ese sentido, se pueden mencionar dos métodos para medir la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  a partir del funcionamiento de un acumulador de Radón (también llamado cámara de acumulación). El primero es el método de cámara sellada, el cual es ampliamente utilizado para determinar la tasa de exhalación de Radón de los MC, de acuerdo a [16]. Este procedimiento se basa en la colocación de una muestra en un contenedor herméticamente cerrado y la medición del aumento de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  dentro del contenedor mediante un dispositivo que registra la variación de dicha concentración. Esta técnica es ampliamente utilizada para determinar la

tasa de exhalación de Radón en los MC. Otro método utilizado para medir la tasa de exhalación de Radón en los MC es el método de cámara abierta. Este método consiste en determinar la cantidad de  $^{222}\text{Rn}$  en acumuladores que tienen una buena ventilación y que se encuentran en condiciones de concentración próximas a cero. De esta manera, el Radón presente en el acumulador se retira continuamente a través de un flujo constante de aire que se extrae del acumulador, por lo que la tasa de intercambio Radón - Aire ambiental es conocida. Este método proporciona una medida de la tasa de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  de los MC [17].

En este estudio, se presenta la cámara de acumulación diseñada para el estudio de exhalación de Radón, así como el tiempo de acumulación, modo de medir el  $^{222}\text{Rn}$  exhalado, y la metodología para medir de manera precisa y estructurada. Los detectores empleados para la detección de  $^{222}\text{Rn}$  en la cámara de acumulación pueden ser detectores pasivos integradores que no ofrecen una serie temporal de datos (por ejemplo, detectores de trazas como CR-39 y LR-115) o dispositivos activos que ofrecen serie temporal de concentraciones de Radón cuyos tiempos de integración que pueden variar desde minutos hasta días. En la literatura especializada existen diversas propuestas para determinar la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  en materiales de construcción, así como en suelos, que incluye la norma ISO 11665-7:2012 (Método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie). El tiempo de medición de la exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  en un acumulador de Radón, puede ser tan largo, como el equivalente a 7 vidas medias del Radón (tiempo necesario para alcanzar el equilibrio entre las actividades de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{226}\text{Ra}$ ), o tan corto como una medición de sólo 24 horas. El estudio de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  por unidad de masa o por unidad de área está ligado al estado de la muestra (sólida o pulverizada) [18]. En el presente estudio se realizan las mediciones de exhalación de materiales de construcción y muestras de suelo por método corto en los casos que, bajo el criterio propuesto por [19] (ver sección 2.4) lo permite y en los casos que no es viable aplicar este criterio, se mide por método largo de 28 días. Además se han diseñado y construido equipos especiales para llevar a cabo el estudio de la exhalación de material compacto y pulverizado (disgregado), el detalle se puede ver en la sección 2.4. Los datos recogidos se han tratado estadísticamente siguiendo procedimientos estandarizados.

La medición de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  y el valor de permeabilidad del suelo permiten determinar el potencial geogénico de Radón, el cual conceptualmente se refiere a la capacidad que tiene el suelo de liberar Radón a la atmósfera. Las mediciones de Radón se realizaron con el instrumento Rad7, mientras que las mediciones de permeabilidad se realizaron con el equipo Radon-Jok (Figura 1.4). Cada uno de los equipos mencionados tiene su propio protocolo de medición, pero debido a las características físicas de los suelos en los sitios de estudio fue necesario realizar modificaciones a los protocolos de medición establecidos por el fabricante. La validez

de los resultados se discute en la presente tesis a partir de propuestas teóricas y resultados obtenidos en estudios experimentales. Finalmente, en esta tesis se investiga una posible relación entre la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en viviendas de un distrito de Lima Metropolitana y el Potencial Radón Geogénico. Para ello, se han realizado mediciones de Radón en suelo en el distrito y también en distritos cercanos para obtener una mejor aproximación. La elección del distrito de Pueblo Libre fue por su facilidad de acceso y cercanía a viviendas donde se había medido previamente la concentración de Radón.



Figura 1.4: Radon Jok

La medición de Radón en suelo es importante porque nos permite estimar el Potencial Geogénico de Radón (PGR), el cual es un parámetro espacial que indica la probabilidad de encontrar niveles altos de Radón en interiores en una región específica. Estas zonas con elevadas concentración se conocen como prone Radon. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el suelo no es la única fuente de concentración de Radón en viviendas, los materiales de construcción también pueden contribuir significativamente. Por lo tanto, la medición de Radón en suelo es esencial para identificar estas zonas propensas y tomar medidas para mitigar los riesgos asociados al Radón y reducir la exposición humana. Una forma de hacer esto es mediante la elaboración de un mapa de Radón Geogénico, el cual permite identificar regiones donde se pueden esperar concentraciones de Radón elevadas en interiores debido a su origen geogénico [20].

Los materiales de construcción se puede analizar desde dos perspectivas: En estudios realizados por [21] y [22] se entiende que el origen principal del Radón en los hogares es el suelo y que la finalidad de los materiales de construcción utilizados en estas edificaciones tienen como función impedir la entrada de  $^{222}\text{Rn}$  desde el

exterior. En contraste con los estudios anteriores, se plantea que los materiales de construcción son una fuente significativa para la acumulación de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior. Es importante tener en cuenta el lugar de donde se extraen los materiales que se utilizan para construir, ya sea los materiales básicos o las canteras de los agregados utilizados en su elaboración debido a su origen geológico. En la tabla 1.1 se presentan algunos valores de concentración de Radioisótopos primarios como  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  obtenidos en diferentes estudios en el América del Sur y en otros países”.

Tabla 1.1: Valores de actividad de concentración de Radioisótopos primarios y tasa de exhalación de Radón en algunos países

Pais	Muestra	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Tasa de Exhalación de Radón ( $\text{mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	Referencias
Ecuador	Ladrillo	-	-	-	300	[23]
	Granito	-	-	-	90	
	Concreto	-	-	-	320	
China	Ladrillo	14.35	38.8	678.1	-	[24]
	Cerámica	172.35	135.5	351.4	-	
	Granito	355.9	317.9	1636.5	-	
	Concreto	15.85	50.7	605.35	-	
Cuba	Ladrillo	57	12	857	-	[25]
	Cemento	23	11	467	-	
	Concreto	25	12	595	-	
	Grava	20	13	134	-	
	Arena	17	16	208	-	
Iran	Ladrillo	301	28	338	-	[26]
	Cemento	31	15	231	-	
	Granito	38	47	917	-	
	Cerámica	32	27	292	-	
	Yeso	12	14	116	-	
India	Cemento	143	40	294	-	[27]
	Ladrillo	74	53	377	-	
	Arena	36	-	601	-	
China	Ladrillo de fresno	134	123.8	455	11	[28]
	Ladrillo gris	1185	77.5	643.8	45.7	
Brazil	Concreto	13.8	29.7	434.5	2.65	[29]
	Mortero de cemento	12.6	29.6	361.8	1.99	

## 1.5. Objetivos

### Generales:

- Evaluar posibles riesgos Radiológicos para la salud humana debido a la radiactividad natural y exhalación de Radón de suelos y principales materiales empleados en la edificación de viviendas en algunos distritos de Lima Metropolitana.

### Específicos:

- Diseñar y construir una cámara de acumulación de Radón, con condiciones controladas de temperatura y humedad, para la realización de estudios de exhalación. Aplicarla en el estudio de muestras de materiales seleccionados.

- Determinar cuáles de los materiales de construcción investigados no generan riesgo de exposición radiactiva tomando como base la tasa de exhalación másica y/o superficial de Radón.
- Calcular índices de radiación gamma para los materiales analizados a partir de las concentraciones de actividades de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  y estimar el riesgo Radiológico por el empleo de los materiales de construcción estudiados.
- Evaluar la posible relación entre niveles de Radón en viviendas, encontrados en estudio previo, y el potencial geogénico del Radón encontrados en este estudio en un distrito de la ciudad de Lima.



## Capítulo 2

# Emanación y exhalación de Radón en suelos

En el análisis de la generación y transporte de Radón a través de materiales porosos es importante esclarecer la diferencia que existe entre emanación y exhalación de este gas a través del material. En el presente capítulo se presentan y desarrollan los conceptos necesarios para entender el proceso de emanación y exhalación de Radón, además se presentan los cálculos realizados para adaptar los protocolos de medición de los equipos a la realidad del sitio de medición.

### 2.1. Generación y transporte de Radón

La emanación se refiere al proceso mediante el cual el ion de Radón se genera en el interior de un material y puede escapar hacia el espacio intersticial [30]. La cantidad de iones de Radón que se producen, es decir, los átomos que escapan y los que quedan atrapados en el interior del material, depende directamente del contenido de Radio total en el material.

Por otro lado, la cantidad de iones de Radón capaces de escapar del material y llegar al espacio intersticial está directamente relacionada con la cantidad de átomos de radio presentes en el material, conocida como Radio efectivo [31]. Es la cantidad de Radio efectivo la que determina la cantidad de iones de Radón con la energía suficiente para escapar, despreciando los átomos que pueden escapar e incrustarse en otro material.

El concepto de Radio efectivo es esencial en el proceso de exhalación, ya que a partir de él se genera el Radón que se libera y transporta a través del material. La combinación de Radio efectivo ( $Ra_{\text{eff}}$ ) y Radio total ( $Ra_{\text{tot}}$ ) permite definir la fracción de emanación, también conocida como coeficiente de emanación [32], a través de la siguiente ecuación:



$$f = \frac{Ra_{eff}}{Ra_{tot}} \quad (2.1)$$

De acuerdo con [3], la Figura 2.1 detalla las principales vías de emanación del Radón, donde las fuerzas que permiten la emanación son el retroceso debido a la desintegración alfa del Radio y la posterior difusión en el medio [33]. Este proceso de difusión solo se produce si la energía de retroceso por el decaimiento alfa permite que los átomos de Radón se depositen en los mismos granos (puntos: C, D, E, F e I) y no en el poro que puede contener aire o agua o ambos.

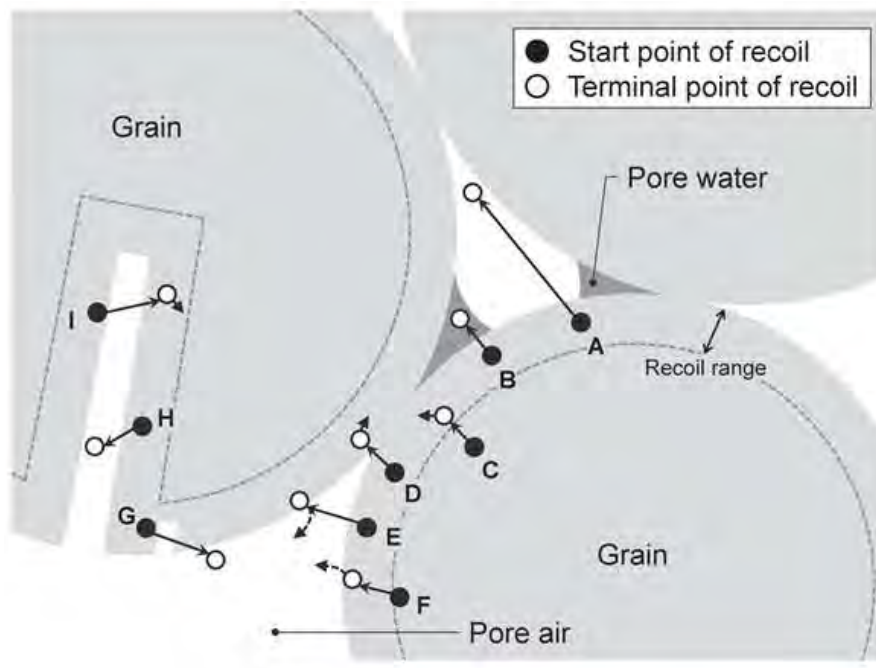


Figura 2.1: Representación del fenómeno de emanación de Radón. En los puntos A, B, E, F, G y H, se considera átomos de Radón emanados, mientras que en los puntos C, D e I, se consideran como no emanados [3] .

Tanto el suelo, como los materiales de construcción y minerales pueden ser considerados como medios porosos, donde el transporte de Radón a través de estos materiales tiene lugar en el sistema de poros llenos de aire [34]. El transporte de Radón considera dos procesos, el primero toma en cuenta la diferencia de concentración de este gas, donde por la ley de Fick el gas se moverá desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración (transporte difusivo de Radón). El segundo proceso considera que el movimiento del gas a través de un medio poroso se debe a una variación de presión y/o temperatura. La ecuación que describe el proceso de transporte de Radón toma en consideración estos dos tipos de transportes: difusivo y convectivo, en la siguiente expresión propuesta por [35] para el caso unidimensional y sin considerar advección:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda C + G \quad (2.2)$$

donde el término  $D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$  se refiere al proceso difusivo, y se considera constante al coeficiente de difusión,  $D$ , el segundo término denota convección, donde  $v$  es la velocidad de Darcy para el transporte de Radón. El tercer término esta relacionado al decaimiento y el último término hace referencia a la generación de Radón (( $\text{Bqm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )), el cual depende de ciertos parámetros como lo planteó [36], y se puede ver en la ecuación 2.3.

$$G = \frac{f \rho_s A_{Ra} \lambda (1 - \epsilon)}{\epsilon} \quad (2.3)$$

donde  $f$  es el coeficiente de emanación,  $\rho_s$  es la densidad del material ( $\text{kgm}^{-3}$ ),  $A_{Ra}$  es el contenido de Radio ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ),  $\lambda = 2,1 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$  es la constante de decaimiento de Radón y  $\epsilon$  es la porosidad del material.

La ecuación 2.2 de transporte de masa describe el flujo de Radón en el suelo y considera al suelo como un medio poroso, homogéneo e isotrópico donde el Radón puede viajar hasta la superficie por difusión (Ley de Fick) y convección (Ley de Darcy). Esta ecuación también se puede aplicar a materiales de construcción, siempre y cuando se tengan en cuenta ciertas consideraciones que se mencionarán en los siguientes capítulos. En resumen, esta ecuación es útil para analizar el flujo de Radón a través de materiales porosos y puede ser utilizada tanto para el suelo como para los materiales de construcción.

En una primera aproximación para entender el transporte de Radón en suelo, se puede considerar a la componente espacial  $z$  como la profundidad de suelo medido desde la superficie como se puede ver en la Figura 2.2.

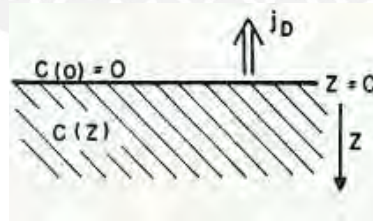


Figura 2.2: Exhalación desde el suelo al aire libre

Si se aplican las condiciones de frontera para la concentración de Radón  $C(z=0) = 0$  en la superficie del suelo y  $C(z = \infty) = C_\infty$  bajo régimen de estado estacionario [37], se obtiene como solución de la ecuación 2.2:

$$C(z) = C_\infty \left( 1 - e^{\left( \frac{v}{2D} + \sqrt{\left( \frac{v}{2D} \right)^2 + \frac{\lambda \epsilon}{D}} \right) z} \right) \quad (2.4)$$

Si el transporte de Radón en el suelo se debe solamente a flujo difusivo, entonces  $v = 0$ , la ecuación 2.4 se puede escribir como:

$$C(z) = C_{\infty}(1 - e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D_e}}z}) \quad (2.5)$$

donde el coeficiente de difusión efectivo es representado por  $D_e$  ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ).

En cuanto al transporte de Radón en materiales porosos, es importante tener en cuenta que la longitud de difusión indicada por el exponente en la ecuación 2.5, es la distancia promedio recorrida por los átomos de Radón en un tiempo equivalente a su vida media. La longitud de difusión es importante porque determina cómo se mueve el Radón a través del medio poroso y cómo se distribuye en diferentes profundidades. Además, la longitud de difusión puede ser utilizada para evaluar la eficiencia de un material o estructura en la reducción de la transmisión de Radón. Es posible estimar la longitud de difusión a partir de la siguiente expresión [38]:

$$L = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \quad (2.6)$$

De manera que introduciendo la ecuación 2.6 en 2.5 se obtiene:

$$C(z) = C_{\infty}(1 - e^{z/L}) \quad (2.7)$$

La última expresión mencionada es útil cuando se estudia el perfil de Radón en el suelo a través de mediciones de concentración de Radón a distintas profundidades. Si se considera que el mecanismo de transporte predominante es el difusivo, es posible ajustar los resultados de las mediciones a la curva descrita por la ecuación 2.7 y determinar el coeficiente de difusión efectiva y la longitud de difusión. Estos valores son importantes porque permiten entender cómo se distribuye el Radón en el suelo y cómo se mueve a través de él.

### 2.1.1. Criterios para la medición de concentración de Radón en suelo

El Radón es un gas radioactivo generado a partir de la desintegración natural del uranio presente en suelos y rocas, y su exposición prolongada puede ser perjudicial para la salud. Por lo tanto, es importante medir la concentración de Radón en el suelo para evaluar el riesgo de exposición por dosis de inhalación y tomar medidas preventivas si es necesario. Un dispositivo comúnmente utilizado para medir la concentración de Radón en el suelo es el Rad7 [39]). Como se puede observar en la Figura 2.3 la sonda que viene con el kit de medición en suelos del Rad7 se introduce a una determinada profundidad para realizar las mediciones, de acuerdo a lo recomendado en el manual del Rad7 se considera que a una profundidad de alrededor de 1 metro

o más, sería suficiente para evitar que la muestra se diluya con aire ambiental [39]. El Rad7 ha demostrado ser una herramienta confiable para medir la concentración de  $^{226}\text{Ra}$  en los gases o poros del suelo [40]; sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar debido a diversos factores como la ubicación geográfica, el contenido de Radio, el tipo de suelo, las condiciones climáticas, entre otros [41]. Por lo tanto, para obtener una medida precisa de la concentración de Radón en el suelo es necesario tomar varias muestras y promediar los resultados. La configuración experimental utilizada para medir las concentraciones de Radón en el gas del suelo con el dispositivo Rad7 se ilustra en la Figura 2.3.

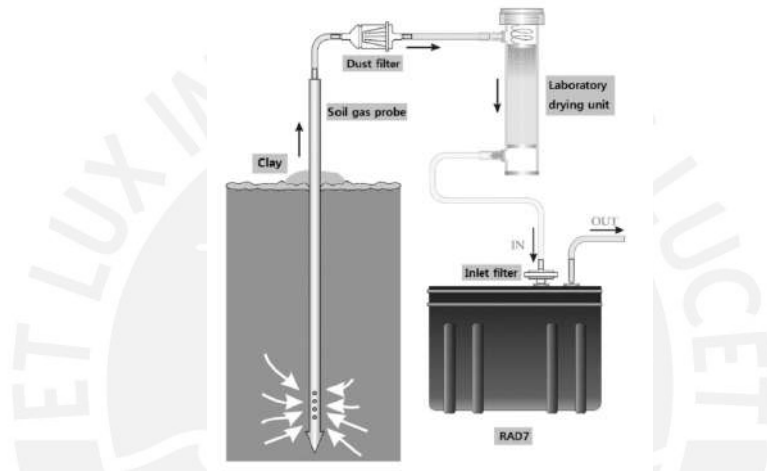


Figura 2.3: Diagrama esquemático de la medición de Radón en el suelo con el RAD7.

En muchos terrenos de estudio es imposible, por su misma naturaleza (suelos poco desarrollados, o con exceso de rocas), introducir la sonda a la profundidad recomendada por el fabricante. [42] señalan que en el sur de Italia se tomaron muestras de gas del suelo a profundidades en el rango de 0.5 a 0.8 m en áreas urbanas. Sin embargo, [43] advierten que realizar mediciones a estas profundidades podría verse afectado por el gradiente de concentraciones de Radón debido a la profundidad en el suelo. [4] realizaron un análisis sobre los problemas en la medición de Radón en suelo y el radio de la esfera ( $r$ ) de gas en suelo de la que se extrae el Radón para su cuantificación por lo cual utilizaron la siguiente expresión:

$$r = \left[ \frac{3 \cdot V_s}{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot (1 - s)} \right]^{1/3} \quad (2.8)$$

donde  $V_s$  es el volumen de gas extraído del suelo durante el muestreo (en metros cúbicos),  $s$  es la saturación de agua en suelo, y  $\eta$  es la porosidad del suelo. En la Figura 2.4 se puede ver el radio de la esfera que se genera en la extracción de aire del suelo. En el caso A y B la esfera es adecuada ya que la profundidad a la que se introduce la sonda es  $\geq r$ , de esta manera se garantiza que no se incorpore

aire ambiental. Mientras que en el caso C, el radio se hace más grande y toca la superficie permitiendo el ingreso de aire ambiental al sistema de medición generando una subestimación.

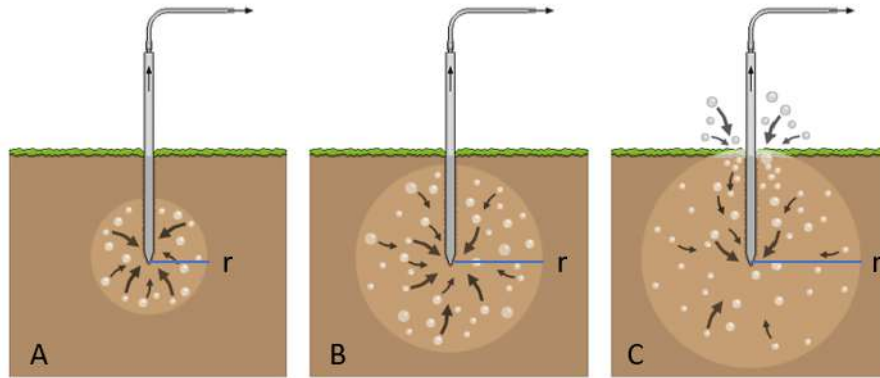


Figura 2.4: Esfera de gas del suelo.

En diferentes investigaciones se ha analizado el volumen de aire extraído cuando se realizan mediciones de concentración de Radón en suelo utilizando el equipo Rad7. A menudo, se siguen el protocolo de medición GRAB que viene preconfigurado en el Rad7, el mismo que se empleará en el presente estudio. Durante el protocolo de muestreo GRAB, se extrae alrededor de 5 litros de aire del suelo en un periodo de 30 minutos. En este protocolo el Rad7 extrae gas del suelo únicamente durante los primeros 5 minutos (aproximadamente 2 L). De acuerdo con el análisis realizado por [4], presentados en la tabla 2.1 si se extraen 5 L de gas en una medición se estima que el radio del bulbo de aire generado en la extracción de gas Radón en suelos saturados ( $s = 0.9$ ) y con una porosidad en el rango de 0.25 a 0.4 se encuentra entre 0.31 m y 0.363 m lo que hace necesario que la sonda sea introducida a una profundidad mayor que el radio del bulbo. Por otro lado, los análisis indican que para suelos de tipo grava aluvial y coluvial con una saturación aproximada de 0.45 y una porosidad entre 0.25 y 0.4, el radio del bulbo que involucra la dilución de la muestra de gas del suelo con el aire atmosférico se encuentra entre 0.176 m y 0.206 m, respectivamente, en función de los valores de porosidad. Por lo tanto, se recomienda introducir la sonda a profundidades superiores a estos valores. Independientemente de la profundidad de medición es importante mantener el sellado perfecto del sistema completo, lo cual ayuda a obtener muestras más precisas y evitar la contaminación del gas del suelo por el aire atmosférico [44].

En Lima los suelos tienen un alto contenido de rocas (gravas), lo cual dificulta en muchos casos introducir la sonda a los 80 cm, como se establece en el protocolo de medición y en las recomendaciones por [44]. La mayoría de los suelos en Lima son conformaciones de afloramientos rocosos y estratos de grava procedentes de depósitos

coluviales y aluviales, donde el valor de porosidad del suelo varia entre 0.25 y 0.4 [45]. Debido a que la mayoría de las mediciones se realizaron en jardines o cerca de ellos, se considera que estos suelos están mayoritariamente saturados, por lo que se asume el valor de saturación  $s = 0.9$ .

Tabla 2.1: Datos de modelo esférico de la profundidad mínima de muestreo [4].

$V_s(m^3)$	$\eta$	s	$\eta_{ef}$	r(m)
0,0002	0,25	0,45	0,1375	0,07
0,0002	0,25	0,9	0,025	0,124
0,0002	0,4	0,45	0,22	0,06
0,0002	0,4	0,9	0,04	0,106
0,001	0,25	0,45	0,1375	0,12
0,001	0,25	0,9	0,025	0,212
0,001	0,4	0,45	0,22	0,103
0,001	0,4	0,9	0,04	0,181
0,005	0,25	0,45	0,1375	0,206
0,005	0,25	0,9	0,025	0,363
0,005	0,4	0,45	0,22	0,176
0,005	0,4	0,9	0,04	0,31
0,025	0,25	0,45	0,1375	0,351
0,025	0,25	0,9	0,025	0,62
0,025	0,4	0,45	0,22	0,3
0,025	0,4	0,9	0,04	0,53

En la ciudad de Lima, los distritos de Pueblo Libre, Lince y Magdalena tienen un tipo de suelo casi uniforme formado por afloramientos rocosos y estratos de grava, mientras que San Miguel también tiene una porción de terreno con estrato superficial de suelos granulares finos y suelos arcillosos [46]. Esta distribución de suelos es interesante debido a que las propiedades de estos terrenos tienen valores de porosidad muy cercanos entre sí (promedio = 0.4), según lo reportado por [45] y en [47].

De acuerdo con los cálculos presentados en la tabla 2.1 y considerando una porosidad promedio de 0.4 para los tipos de suelo analizados en los distritos de Lima metropolitana, se recomienda introducir la sonda a una profundidad mínima de 0.5 metros. Este valor se basa en el análisis de [44], que indica que en casos en los

que se involucran capas rocosas sólidas y superficiales, la mínima profundidad para tomar la medida se puede establecer en 0.5 metros debajo de la superficie.

## 2.2. Concentración de Radón en suelo

Es importante conocer los niveles de Radón en el suelo para la planificación y construcción de nuevos edificios debido al riesgo radiológico que implica la exhalación de Radón del suelo. En las nuevas edificaciones se suele emplear una cubierta en el suelo que reduzca los niveles exhalados de Radón al interior de los edificios. Para determinar el diseño confiable de la cubierta de Radón (espesor adecuado de la cubierta y otros parámetros relevantes) es necesario conocer el coeficiente de difusión de Radón en suelo para minimizar el flujo de Radón que llega a la superficie aire-suelo. Varios métodos para medir los coeficientes de difusión del Radón en los suelos se basan en la suposición de que se cumple la ley de Fick. Así, el suelo actúa como un sumidero infinito para el gas Radón.

Para medir la cantidad de  $^{222}\text{Rn}$  presente en el suelo, se utilizó la sonda provista en el equipo RadonJok debido a que en paralelo se realizaban mediciones de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  y permeabilidad del suelo. La sonda empleada cuenta una punta afilada en la parte inferior que se clava en el suelo y facilita la introducción de la sonda a la profundidad deseada para iniciar la medición de una muestra de gas Radón a una profundidad específica. Estas muestras de gas son luego aspiradas por el equipo de medición del Radón, en este caso el RAD7, que utiliza espectrometría alfa para medir la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  a través del  $^{218}\text{Po}$ . El equipo Rad7 tiene programado el protocolo de muestreo GRAB automático para analizar la muestra de gas del suelo, durante el cual se bombea el gas hacia la cámara interna del dispositivo durante 5 minutos hasta que el Radón se mezcle uniformemente con el aire y luego se analiza para determinar la concentración de Radón. El procedimiento empleado fue tomado de la experiencia de [48] en tres ejercicios de comparación internacional.

En este capítulo se presenta un caso de medición del perfil de  $^{222}\text{Rn}$  en el suelo en la estación meteorológica en la Pontificia Universidad Católica del Perú ( Figura 2.6), basado en las consideraciones expuestas en la sección 2.1.1. Las concentraciones de Radón se calculan a diferentes profundidades en incrementos, que pueden ser cada 10 o 15 cm según la facilidad de enterrar la sonda en el terreno para determinar el perfil de Radón en el suelo, a partir del cual se puede determinar el coeficiente de difusión del suelo y la longitud de difusión. Los resultados de la medición de la concentración de Radón en diferentes profundidades se encuentran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores de concentración a diferentes profundidades

Profundidad (m)	$C_{Rn}$ (Bq.m <sup>-3</sup> )	Incertidumbre
0.2	3640	837.2
0.3	5200	1144
0.4	5590	1062.1
0.6	7540	1206.4
0.7	7280	1310.4
0.75	7800	1014

Con los datos obtenidos se realizó un ajuste de datos según la ecuación 2.7.

El perfil de Radón en un punto del suelo de la PUCP se puede ver en la Figura 2.5, donde se muestran la ecuación de ajuste, la longitud de difusión ( $L_D = 0,36m$ ) y el valor del coeficiente de difusión efectiva ( $D_e = 2,7 \times 10^{-7} m^2/s$ ).

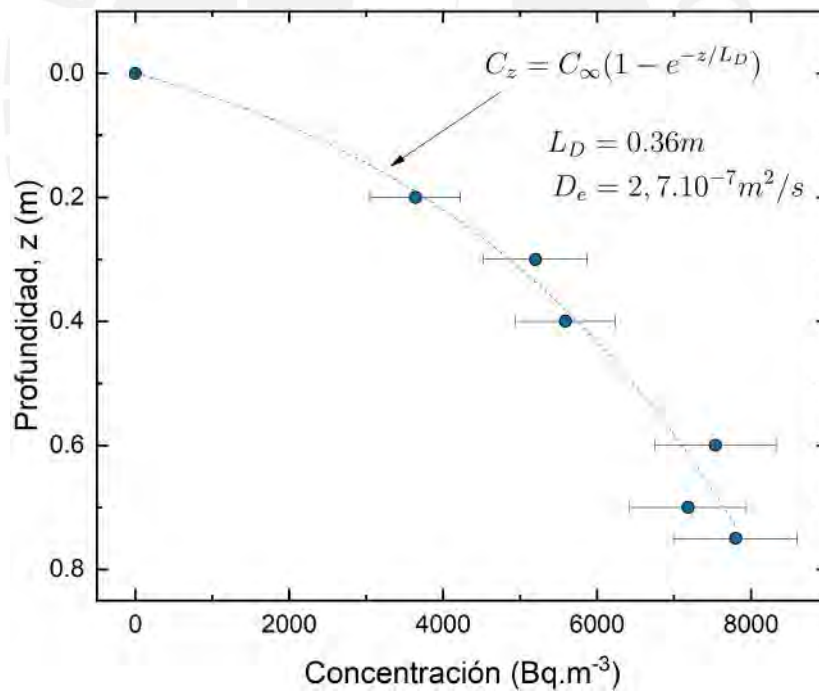


Figura 2.5: Perfil de Radón en suelo en la estación meteorológica de la PUCP





Figura 2.6: Zona de medición del perfil de Radón en suelo en la PUCP

La misma medición se repitió en 6 puntos diferentes en un área de 15 m<sup>2</sup> como se observa en la Figura 2.6 y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 2.7

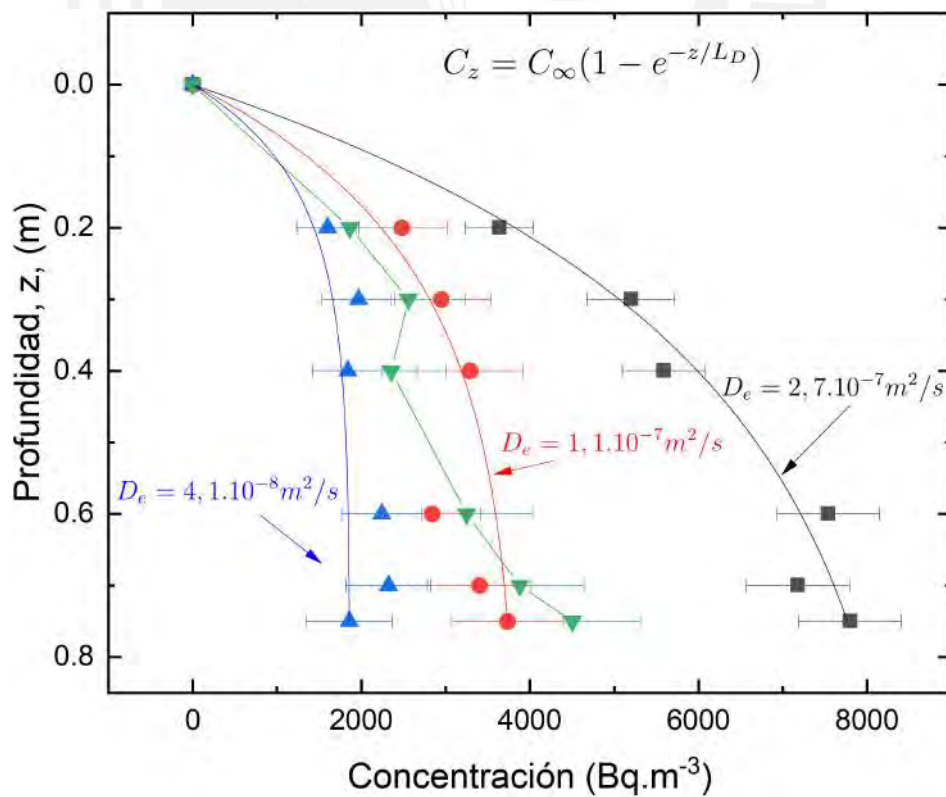


Figura 2.7: Perfil de Radón en suelo de cuatro puntos de la zona de medición en la estación meteorológica PUCP

El perfil verde no pudo ser ajustado a la ecuación propuesta para el comportamiento de Radón por lo que no presenta curva de ajuste, lo mismo sucede con dos perfiles más que no son representados en la gráfica anterior. Los resultados obtenidos son consecuentes con la ecuación 2.7, donde la concentración aumenta exponencialmente a medida que aumenta la profundidad del suelo y después de cierta profundidad ( $\approx 3L_D$ ) la concentración se satura como se observa en la Figura 2.7, resultado que es consecuente con algunas investigaciones [37]. La variabilidad de los resultados de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en suelo en una zona tan pequeña de medición son consecuentes con la variación de permeabilidad en suelo en los mismos puntos medidos. El terreno es regado de manera constante para mantener la vegetación de la zona, por lo que la zona se considerará como un suelo parcialmente saturado a saturado.

Como se menciona en la descripción de los parámetros en la ecuación 2.8, la porosidad es un factor que afecta el bulbo generado para la extracción de aire del suelo y la consecuente medida de Radón con el Rad7. La permeabilidad y porosidad del suelo pueden afectar la capacidad del suelo para transportar Radón hacia la superficie. Si el suelo tiene una alta permeabilidad y una alta porosidad, es más probable que transporte el Radón hacia la superficie. Por otro lado, si el suelo tiene una baja permeabilidad y una baja porosidad, es menos probable que transporte el Radón hacia la superficie. En general, la permeabilidad y porosidad del suelo pueden influir en la cantidad de Radón que se libera al aire en un área determinada.

Empleando el dispositivo RadonJok para medir la permeabilidad del suelo, se generó el siguiente mapa que muestra la variabilidad de este parámetro en la zona de medición.

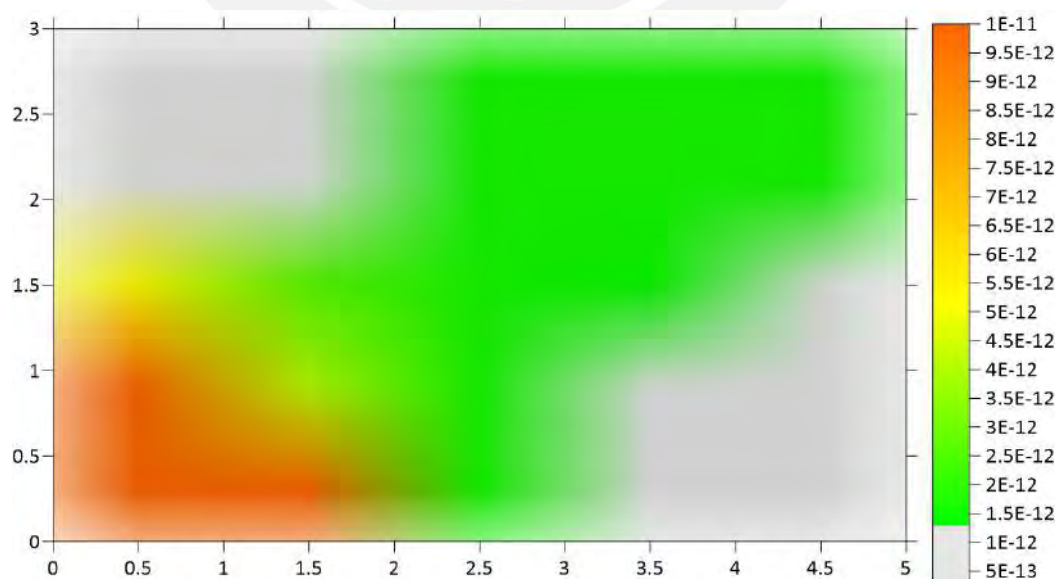


Figura 2.8: Mapa de permeabilidad en suelo

La variabilidad de la permeabilidad es consecuente con la variabilidad del perfil de Radón en suelo dado que la permeabilidad contribuye al transporte de Radón. Por otro lado, es importante tener en cuenta que la medida de la permeabilidad del suelo utilizando RadonJok solo es aproximada ya que debido a la influencia de elementos adicionales, como la existencia de obstáculos en el terreno (rocas por ejemplo) o la existencia de otros gases.

En los tubos de PVC que se encuentran cubiertos con una tapa del mismo material se encuentra un detector de trazas en una cámara de difusión (Twin Chamber) midiendo concentración de Radón a 80 cm de profundidad. La Figura 2.9 muestra el esquema de medición en el interior de los tubos PVC.

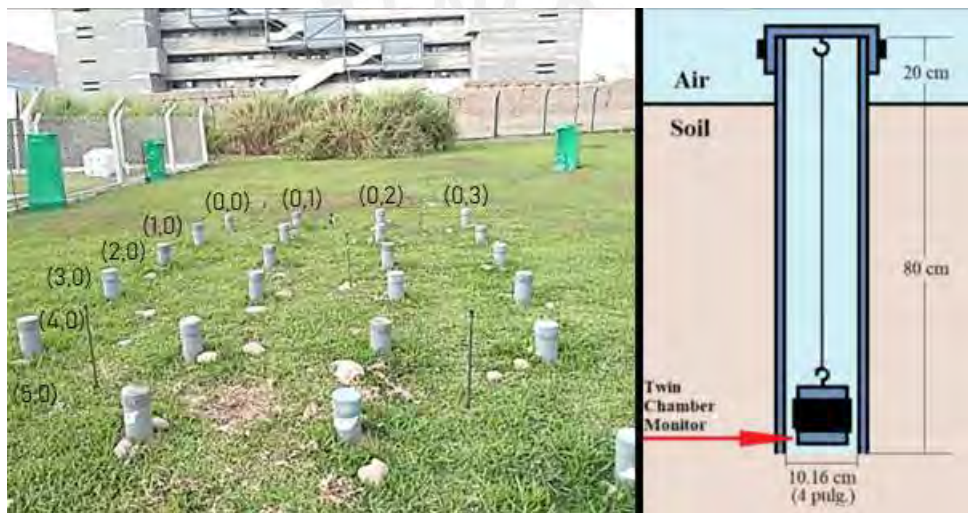


Figura 2.9: Sistema de medición en el terreno donde se indican las coordenadas de los tubos de medición (las mismas coordenadas se emplearan en todos los mapas)

La Tabla 2.3 muestra los valores medidos de la concentración de Radón en suelo a 80 cm de profundidad empleando el equipo Rad7 y la Figura 2.10 se presenta el mapa de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ . Las mediciones de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en suelo, perfil de Radón y exhalación se realizaron en la misma época en un periodo de 15 días.

Tabla 2.3: Concentración de  $^{222}\text{Rn}$  a 80 cm de profundidad

Medición	Concentración ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Medición	Concentración ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	$3447 \pm 432$	13	$7537 \pm 910$
2	$5314 \pm 647$	14	$5429 \pm 666$
3	$5389 \pm 667$	15	$6442 \pm 786$
4	$6026 \pm 738$	16	$6787 \pm 829$
5	$5988 \pm 735$	17	$7019 \pm 848$
6	$7550 \pm 920$	18	$7922 \pm 963$
7	$7918 \pm 961$	19	$9095 \pm 1114$
8	$6737 \pm 833$	20	$6547 \pm 797$
9	$7695 \pm 943$	21	$8967 \pm 1085$
10	$8446 \pm 1031$	22	$2826 \pm 357$
11	$2860 \pm 360$	23	$10884 \pm 1308$
12	$10696 \pm 1284$	24	$6849 \pm 851$

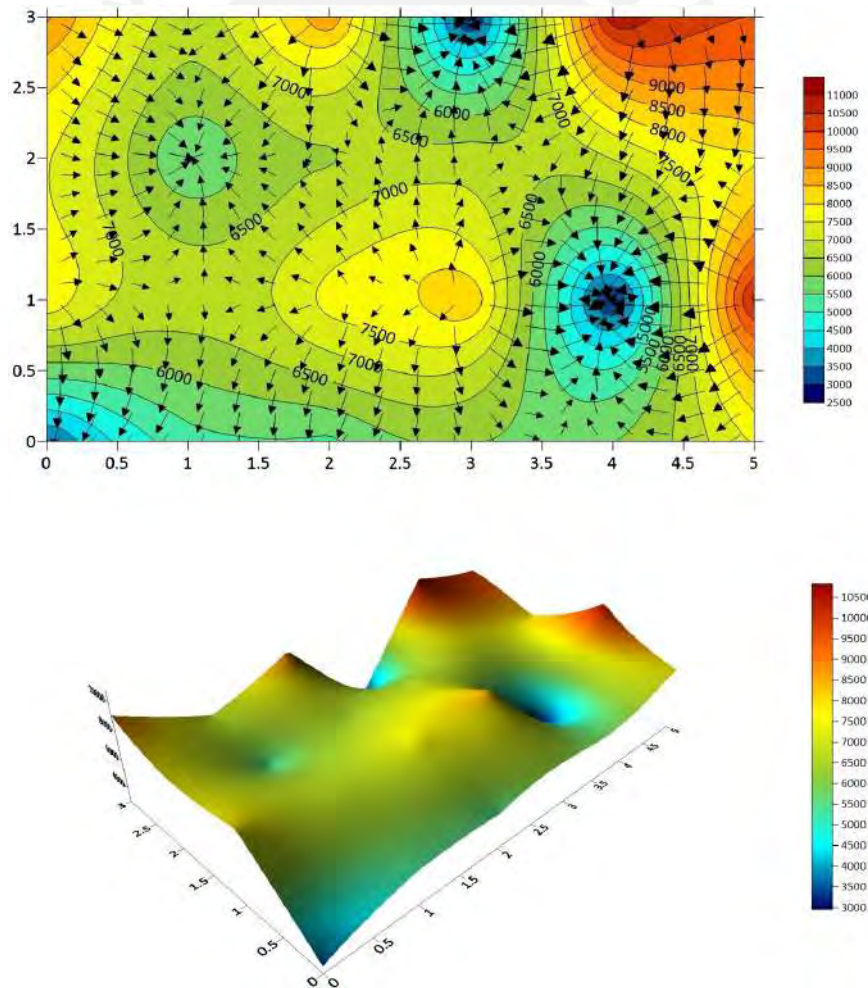


Figura 2.10: Variación de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en suelo a 80 cm de profundidad usando cámara de difusión

## 2.3. Emanación y exhalación de Radón en suelos

Se sabe que una pequeña parte del Radón escapa al espacio poroso después de haber sido producido por el decaimiento de  $^{226}\text{Ra}$  en un grano sólido. Con el tiempo, parte Radón que escapó al poro se libera al aire durante el proceso de “exhalación”, que se define como el número de átomos de Radón que son liberados de un material por unidad de área y por unidad de tiempo ( $\text{Bq m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ), mientras que la tasa de exhalación de Radón en masa se define como la cantidad de átomos de Radón por unidad de masa de material y de tiempo que son liberados al ambiente ( $\text{Bq kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ).

El Radón liberado (exhalado) puede ingresar al interior de las viviendas, ya sea que es exhalado por el suelo o por los materiales de construcción. De acuerdo con [49] hay cuatro parámetros principales que controlan la entrada de Radón en los hogares y la acumulación de Radón dentro del hogar:

- Concentración de Radón en el gas del suelo
- Permeabilidad del suelo
- Presencia de grietas, huecos o demás defectos en la estructura de la vivienda.
- Tasa de ventilación de la vivienda.

En este apartado se presentan los resultados de la exhalación de Radón desde el suelo del campus PUCP a través a la norma establecida en el ISO 11665-7, y se presenta una propuesta experimental aún en desarrollo.

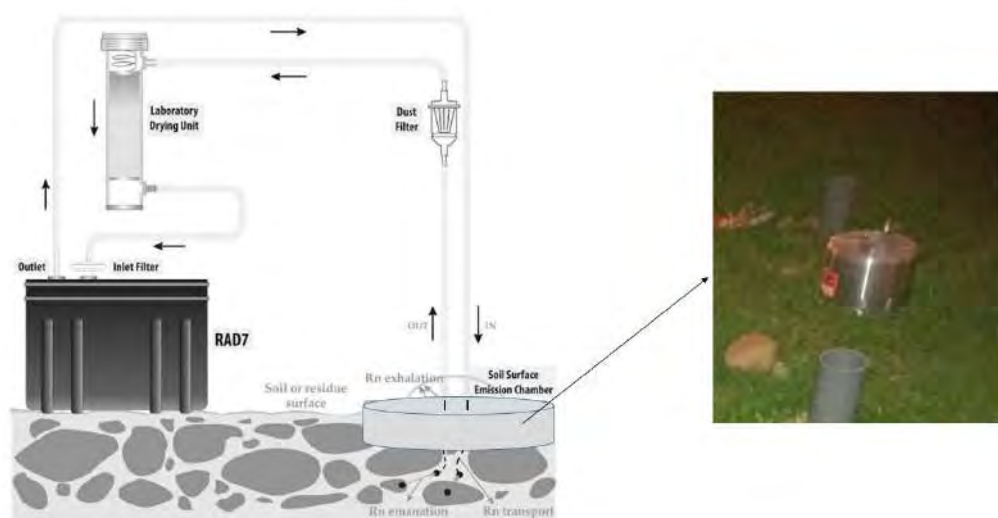


Figura 2.11: Esquema de medición de exhalación de Radón en suelo a partir de la norma ISO 11665-7

El sistema presentado en la Figura 2.11 se basa en la norma ISO anteriormente mencionada, empleando una cámara de acumulación y un dispositivo de medición de Radón en continuo circulando aire, en este caso se utilizó el Rad7 como equipo de medición.

Donde la tasa de exhalación se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{C(t) \cdot V}{S \cdot t} \quad (2.9)$$

donde V es el volumen de la cámara de acumulación, S es el área de exhalación de la superficie el suelo y t es el tiempo de acumulación. Para tiempos cortos de acumulación de 1 a 3 h (de acuerdo a lo indicado en la norma ISO), la ecuación anterior se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$\phi = m \cdot \frac{V}{S} \quad (2.10)$$

En la Tabla 2.4 se presentan los resultados obtenidos a partir de las 9 mediciones realizadas en la zona mostrada en la Figura 2.7:

Tabla 2.4: Exhalación de Radón superficial en la estación meteorológica PUCP.

Muestra	Exhalación superficial ( $Bq.m^{-2}.h^{-1}$ )
1	1.17
2	0.79
3	0.89
4	1.14
5	0.85
6	0.76
7	1.12
8	0.82
9	1.27

La tasa de exhalación superficial de Radón en la zona de medición (promedio  $\pm$  des. est) es  $0.98 Bq.m^{-2}.h^{-1} \pm 0.19 Bq.m^{-2}.h^{-1}$ . A partir de los datos obtenidos se ha elaborado el mapa de exhalación de Radón en el área de estudio que se presenta en la Figura 2.12. Estos resultados, junto a los de permeabilidad y concentración de Radón en suelo se grafican una superposición de mapas en la Figura



$$\frac{D}{n} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v_z}{n} \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda C + \frac{\phi}{n} = 0 \quad (2.11)$$

donde

- C = concentración de  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
- D = coeficiente de difusión del  $^{222}\text{Rn}$  en el suelo ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $v_z$  = Velocidad del flujo convectivo ( $\text{m}/\text{s}$ )
- n = porosidad del suelo
- $\lambda$  = constante de desintegración radiactiva de  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{s}^{-1}$ )
- $\phi$  = tasa de producción de  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{Bqkg}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

Si se considera que el Radón que se mide en suelo se debe únicamente a un proceso difusivo entonces el segundo término de la mano izquierda de la ecuación 2.11 se puede despreciar y la ecuación se reescribe como en el caso de la ecuación 4.6. Por otro lado, si se considera la contribución del transporte convectivo, la solución de la ecuación 2.11 se puede representar mediante la ecuación:

$$C = \frac{\phi}{n\lambda} \left\{ 1 - \exp \left[ \gamma \left( \frac{4\lambda n}{D} \right) z \right] \right\} \quad (2.12)$$

donde

$$\gamma = \beta + (\beta^2 + 1)^{1/2} \quad (2.13)$$

y:

$$\beta = \frac{v_z}{(4\lambda n D)^{1/2}} \quad (2.14)$$

La tabla 2.5 muestra los valores de los parámetros para la solución analítica a partir de resultados obtenidos de manera experimental y valores tomados de la literatura. En el apéndice B se detalla el código empleado para la solución numérica basado en el desarrollo del modelo Rn3D [50] y adaptado a Python, donde además se agrega una función que permite graficar de manera directa los resultados obtenidos.

La imagen mostrada en la Figura 2.15 ilustra el resultado de la solución numérica considerando sólo difusión con los datos obtenidos en el perfil de Radón en suelo presentado en la Figura 2.5



Tabla 2.5: Parámetros empleados en la solución analítica de la ecuación de transporte unidimensional

Parametro	Valor	Fuente
Saturación	0.7 - 0.9	Aproximada por el empleo del suelo
Porosidad	0.5	Literatura
Difusion en aire	0.01	Definida
Coefficiente de difusión efectiva	$2.7 \cdot 10^{-4}$	Determinado en perfil de suelo
Permeabilidad	$3.5 \cdot 10^{-11}$	Medición in situ - Radonjok
Viscosidad	$1.8 \cdot 10^{-3}$	Aproximada al tipo de suelo
Constante de decaimiento	$2.1 \cdot 10^{-6}$	Definida
Fracción de emanación	0.35	Literatura
Contenido de Radio	21	Medición en Laboratorio PUCP
Bulk density	1.33	

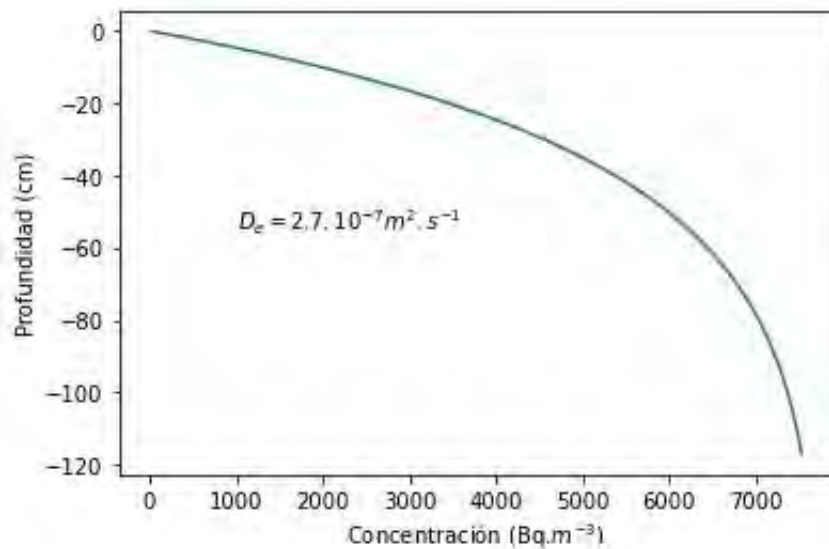


Figura 2.13: Perfil de Radón en suelo a partir de la solución numérica considerando sólo difusión

Si se considera el aporte de la convección en el transporte de Radón en el análisis de la concentración de Radón en función de la profundidad, se debe considerar que la presión en el suelo aumenta con la profundidad debido a la presión atmosférica y el peso de la capa de suelo sobre la que está la profundidad en cuestión. Esta relación se puede calcular aproximadamente utilizando la ley de Pascal. A medida que se aumenta la profundidad en el suelo, la presión aumenta debido al peso de la capa de suelo sobre ese punto. Por ejemplo, si el suelo tiene una densidad de  $2000 \text{ kg/m}^{-3}$ , entonces cada metro de suelo agrega una presión adicional de aproximadamente  $2000 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 9.8 \text{ m.s}^{-2} = 19600 \text{ Pa}$ . De manera que, para introducir un valor de gradiente de presión vertical en la solución numérica se propone  $100 \text{ Pa}$ . En la

siguiente Figura se puede ver el perfil de Radón en suelo considerando el aporte del flujo convectivo.

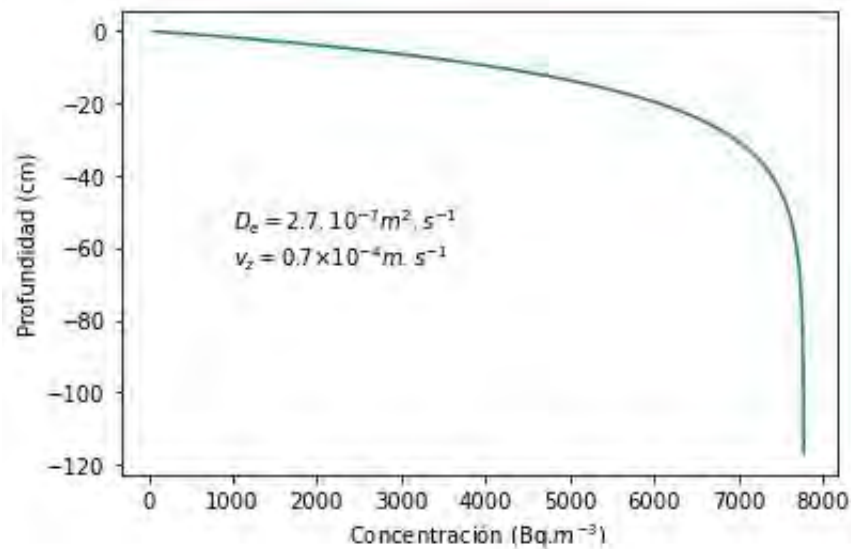


Figura 2.14: Perfil de Radón en suelo a partir de la solución numérica considerando difusión + convección.

Finalmente, en la Figura 2.15 se presentan los resultados de las curvas generadas en la solución numérica y los resultados experimentales presentados previamente en la sección 2.2 (Figura 2.5). Los resultados obtenidos mediante el cálculo numérico se acercan considerablemente a los valores experimentales obtenidos en la zona de medición. Se puede observar que la contribución del flujo convectivo real sobre la curva por solución numérica que considera solamente el flujo difusivo no dista mucho, pero si se considera la curva obtenida por solución numérica considerando flujo convectivo la proximidad escapa del la banda del 95

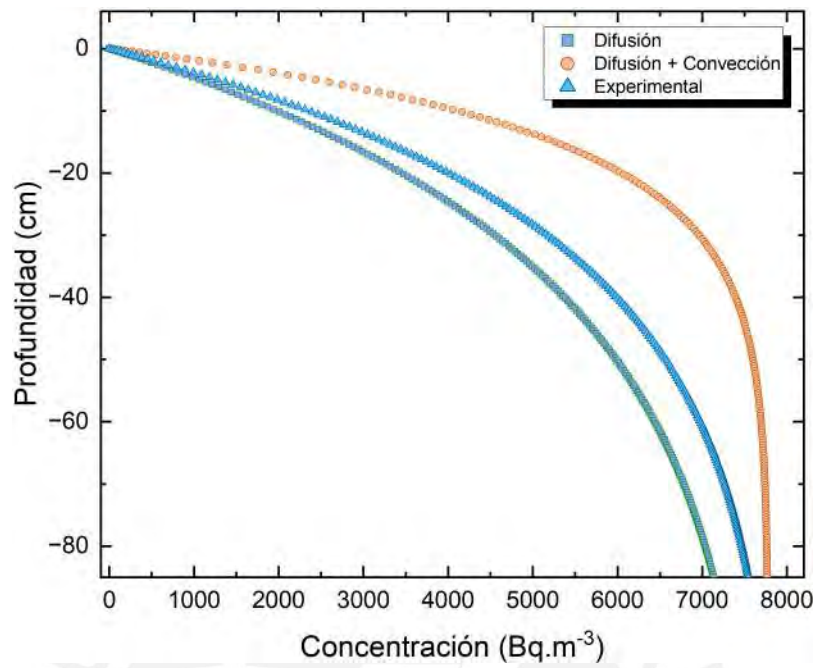


Figura 2.15: Comparación de las curvas generadas por resultados experimentales y por solución numérica del perfil de concentración de Radón a diferentes profundidades

## Capítulo 3

# Relación entre el potencial geogénico de Radón y la concentración de Radón en Lima metropolitana.

El riesgo de Radón se refiere a la probabilidad de que la concentración de Radón en interiores exceda un nivel considerado peligroso para la salud. El potencial geogénico de Radón (PGR) es una medida del potencial de la fuente de Radón en el suelo en una determinada área y puede utilizarse para tomar decisiones sobre la necesidad de realizar mediciones adicionales en áreas de desarrollo inmobiliario [51]. La concentración de Radón en interiores puede verse afectada por factores como la ventilación y la estructura del edificio, así como por la presencia y el tipo de sótano si la casa lo tuviera. Es importante tener en cuenta que el PGR representa el potencial de la fuente de Radón del suelo, o de manera más sencilla, "lo que la Tierra entrega", según la expresión propuesta por [52], y es independiente de la influencia de cualquier factor relacionado con la construcción o los hábitos de vida. Además, existe una relación conocida entre la concentración de gas Radón en el suelo y la concentración de Radón en interiores. Un método propuesto para evaluar el potencial geogénico de Radón es utilizar la variable continua desarrollada por [4], que se presenta en la siguiente ecuación:

$$\text{PGR} = \frac{C_{\infty}}{-\log_{10} k - 10} \quad (3.1)$$

donde  $C_{\infty}$  es la concentración de actividad del Radón en el suelo en equilibrio ( $\approx$  en el orden de los  $\text{kBq.m}^{-3}$ ) y  $k$  es la permeabilidad al gas del suelo ( $\text{m}^2$ ).

Según la ecuación 3.1 propuesta por [4] en su análisis, se clasificó al Índice de

Radón (RI, por sus siglas en inglés) en tres categorías: bajo, medio y alto. La categoría baja se define como  $IR < 10$ , la categoría media se define como  $10 < IR < 35$ , y la categoría alta se define como  $IR > 35$ . La variación de la concentración de Radón en el suelo se puede ver afectada en las distintas estaciones del año y por lo tanto afecta significativamente el valor de  $C_{\infty}$ . Por lo tanto una medición en un solo punto local puede no ser representatividad para la zona de estudio. En el presente capítulo se presentan las mediciones en los distritos de Jesús María, Pueblo Libre (Magdalena vieja) y San Miguel en un sólo periodo, por lo que los resultados se deben considerar como una primera aproximación.

En la Figura 3.1, se presenta la medición de permeabilidad de suelo empleando el Radon-Jok en una de las casas de los voluntarios.



Figura 3.1: Medición de permeabilidad en viviendas empleando el Radon-Jok

### 3.1. Medición de permeabilidad de suelo

La permeabilidad al gas del suelo se determina mediante la ecuación de Darcy, que supone que el suelo es homogéneo e isotrópico y que el aire es incompresible; es

decir, las diferencias de presión son muy pequeñas en comparación con la presión atmosférica [53]. La permeabilidad al gas del suelo,  $k$  ( $\text{m}^2$ ), se puede calcular a través de la siguiente ecuación [4]:

$$k = \frac{\mu \cdot Q}{F \cdot \Delta P} \quad (3.2)$$

Donde:  $Q$  es el caudal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) que se calcula a partir del tiempo necesario para llenar el volumen de 2 L del diafragma,  $F$  es el factor de forma y  $\mu$  es la dinámica viscosidad del aire ( $1,75 \times 10^{-5}$  Pa.s a  $10^\circ$  C) y  $\Delta P$  (Pa) es la diferencia de presión entre la superficie y el área activa de la sonda donde para una pesa la presión es 2160 Pa y para dos pesas es 3750 Pa [44].

El factor de forma se obtiene a partir de la ecuación 3.3, considerando  $L = 50$  mm,  $d = 12$  mm y  $D = 825$  mm, donde  $L$  es la longitud del área activa del cabezal de la sonda (m),  $D$  es la profundidad debajo de la superficie (m),  $d$  es el diámetro del área activa (m). Los valores de  $L$  y  $d$  son definidos por la forma de sonda fabricada por Radon v.o.s., mientras que el valor de  $D$  que es la profundidad a la que se introduce la sonda se mide en la medición. El factor de forma para las dimensiones presentadas es de 0.1492, aproximada a 0.149 por diferentes investigadores [53, 54]. Sin embargo, aún un cambio en la profundidad a la que se introduce la sonda (como en el caso del presente estudio a 70 cm) implica un factor de forma de 0.1494. Aproximadamente el mismo valor considerado en otros estudios de 0.149 m.

$$F = \frac{2\pi L}{\ln \left( \frac{2L \sqrt{\frac{(4D-L)}{(4D+L)}}}{d} \right)} \quad (3.3)$$

La permeabilidad al gas del suelo se midió antes de medir el gas Radón del suelo utilizando el equipo Radon-JOK (Radon v.o.s.). El distrito elegido como caso de estudio para la medición del Potencial Geogénico de Radón fue Pueblo libre, donde en años anteriores se ha realizado un estudio de Radón Indoors.

### 3.2. Potencial geogénico de Radón

Se llevaron a cabo 13 mediciones en los distritos de San Miguel, Pueblo Libre y Jesús María, siendo 9 en viviendas, 1 medición representativa de la Pucp y 3 en la zona de playa (Costa Verde) a menos de un kilómetro de las viviendas. A continuación, se presentan en la tabla los valores de concentración de Radón y permeabilidad a 70 cm de profundidad. En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos en los puntos de medición de los distritos seleccionados.

Los resultados muestran un bajo Índice de Radón de acuerdo a lo señalado por Neznal en 8 puntos de medición. En el punto 7 que el que tiene el mayor PRG se

Tabla 3.1: Valores de concentración de Radón y permeabilidad a 70 cm de profundidad y Potencial Geogenico de Radón (PGR)

Puntos	Concentración kBqm <sup>-3</sup>	Permeabilidad (m <sup>2</sup> )	PGR
1	8.50	2.00E-11	12.2
2	13.40	5.00E-14	4.1
3	10.20	6.00E-12	8.3
4	14.10	3.00E-12	9.3
5	7.30	2.00E-12	4.3
6	5.10	8.00E-12	4.6
7	15.30	1.00E-11	15.3
8	3.50	5.00E-14	1.1
9	1.90	6.00E-12	1.6
10	8.50	5.00E-13	3.7

realizaron 2 mediciones, el resultado que se presenta es el promedio de la zona. En el punto 9 se tuvo problemas para introducir la sonda a los 70 cm, los resultados presentados se realizaron a 60 cm, sin embargo se puede considerar una medición valida de acuerdo a lo señalado en la sección 2. En la Figura 3.2 se presenta la representación del PRG según lo propuesto por [4] diviendo a los tres índices por dos rectas de pendientes 1/10 y 1/30 respectivamente.

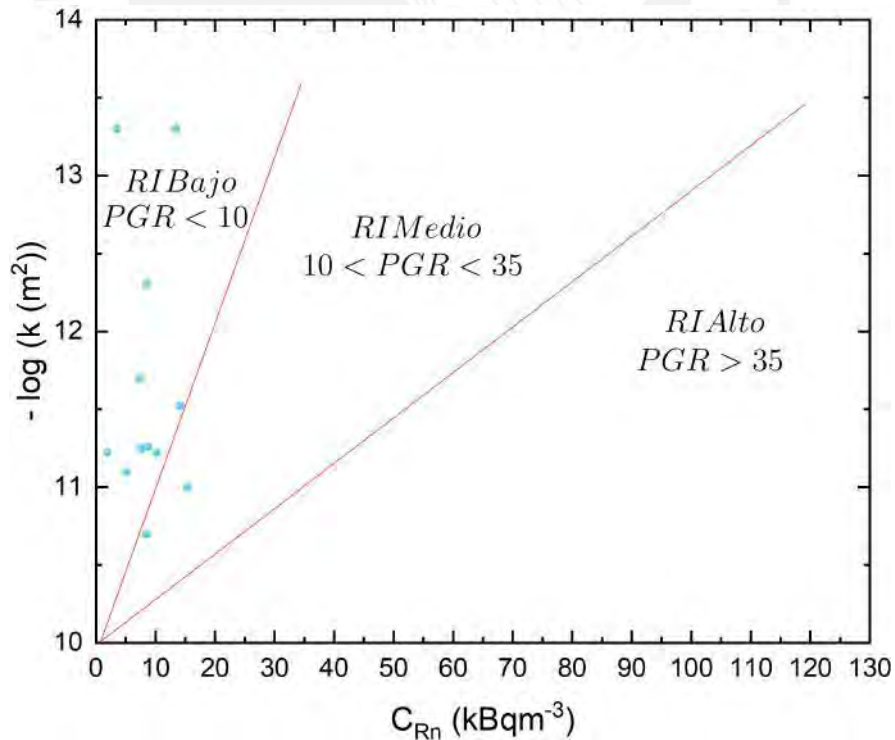


Figura 3.2: Potencial Geogenico de Radón e Índice de Radón

La ubicación aproximada de los puntos de medición se presentan en la Figura

3.3 donde además se presenta una primera aproximación del mapa de Potencial Geogénico de Radón del distrito de Pueblo Libre (anteriormente llamado Magdalena vieja) ya que es el distrito del cual se tiene la mayor cantidad de mediciones dentro y en regiones próximas que permiten una buena aproximación del mapa. El mapa se elaboró como el software de geoestadística ArcGisPro y se divide en dos clases, la primera para valores menores que 10 (límite del RI bajo a medio) señalado de color verde, y la segunda clase para valores superiores a 10 (color blanco).



Figura 3.3: Mapa de Potencial Geogénico de Radón en el distrito de Pueblo Libre

### 3.3. Mapa predictivo de Radón indoors

En Lima metropolitana y Callao se realizaron mediciones indoors en el proyecto PIAP de monitoreo realizado por la PUCP durante los años 2015 - 2017. Los primeros resultados y la metodología de investigación se pueden encontrar resumida en el artículo de [12], mientras que los resultados de monitoreos de algunos distritos en específicos se pueden encontrar en las tesis de [55], [56], [57].

A partir de las mediciones realizadas se elaboró el primer mapa predictivo de Radón de los distritos de San Miguel, Pueblo Libre y Jesús María (Las concentraciones se pueden ver en el anexo A). Con la finalidad de evaluar las similitudes o diferencias entre los resultados obtenidos de Potencial Geogénico de Radón y las mediciones indoors se ha elaborado el mapa de PRG del distrito de Pueblo Libre. En la Figura 3.4 se presenta el mapa predictivo de Radón donde también se realizaron las mediciones de PRG.



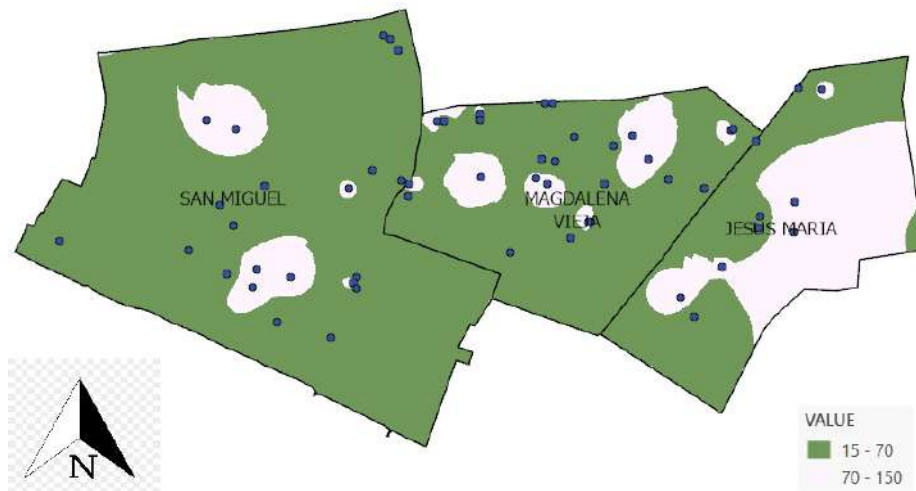


Figura 3.4: Mapa predictivo de Radón indoors en los distritos de San Miguel, Pueblo libre (Magdalena vieja), y Jesús María

Los valores de concentración de Radón indoors del distrito de San Miguel, Pueblo Libre y Jesús María tienen valores por debajo de los 200 Bq.m<sup>-3</sup>. Estos valores están por debajo de la normativa señalada por el IPEN (Instituto Peruano de Energía Nuclear). El IR en estos tres distritos son consecuentes con el mapa de Radón indoors ya que en 8 de los 10 puntos medidos son clasificados con un Índice de Radón bajo. Por otro lado, el valor de medición 1 de PRG en la Tabla 3.1 representa el punto de color Rojo en el mapa que también se corresponde con el punto dentro de la región de mayor concentración de Radón en la Figura 3.4.

## Capítulo 4

# Diseño y construcción de un acumulador para la medición de la exhalación de muestras compactas y disgregadas. Emanación y exhalación de Radón en materiales de construcción.

La medición de la exhalación de Radón en muestras de suelo y materiales de construcción en diferentes estados (compactos y pulverizados) requiere la utilización de cámaras de acumulación de Radón para medir la evolución temporal de la concentración de Radón en el interior y, a partir de este valor, determinar la exhalación de Radón. En este sentido, en la presente investigación se diseñaron y fabricaron dos cámaras de acumulación: una de metacrilato con base rectangular y otra cilíndrica de acero inoxidable.

### 4.1. Diseño de cámara de acumulación

La cámara de acumulación se construyó con metacrilato de 10 mm de espesor cuyas dimensiones son 50 x 60 x 50 cm. En las paredes laterales se han instalado 4 válvulas a cada lado, y conectores para la salida de las conexiones electrónicas. Para garantizar estabilidad, se unieron las paredes de metacrilato mediante el uso

de tornillos pasantes entre las placas. Además, se utilizó cloroformo como adhesivo para sellar las uniones. La tapa superior removible tiene un anillo de sellado (oring) en su contorno, similar a los utilizados en sistemas de refrigeración para garantizar la hermeticidad. Sin embargo, el oring por sí solo no proporciona un sistema de sellado hermético completo. Las pruebas de hermeticidad se realizaron por decaimiento de acuerdo a la metodología reportada por varios autores [58, 59]. El control de temperatura y humedad se planteo con el objetivo de recrear las condiciones a las cuales se encuentran sometidos los materiales de construcción durante las diferentes épocas del año en la ciudad de Lima.



Figura 4.1: Cámara de acumulación, caja de control de temperatura y humedad, chiller y bomba.

## 4.2. Prueba de fuga del acumulador

Para obtener de manera precisa la tasa de fuga  $\lambda_L$ , se emplea la siguiente ecuación dinámica que describe el decaimiento de la concentración Radón en el interior de la cámara [58]:

$$\frac{dC_L}{dt} = -\lambda_{Rn}C_L + \lambda_L C_0 + \lambda_L C_L \quad (4.1)$$

Con las condiciones de contorno  $t \rightarrow 0$ ,  $C_L(0) \rightarrow C_b$ , donde  $C_b$  es la concentración inicial dentro de la cámara y  $C_L$  es la concentración de Radón afectada por la fuga dentro de la cámara sin muestra.

De manera que la pendiente inicial ( $M_L$ ) de la curva (con fuga) se expresa por [59]:

$$M_L = -C_b\lambda_{Rn} - \lambda_L(C_b - C_0) \quad (4.2)$$

En el caso ideal donde la cámara tiene una tasa de fuga cero la concentración de la cámara en el tiempo  $t$  ( $C_I$ ) sin una muestra dentro es:

$$C_I = C_b \cdot e^{-\lambda_{Rn}t} \quad (4.3)$$

La pendiente inicial de la curva de decaimiento ideal (sin fugas),  $M_I$  se puede aproximar a un crecimiento lineal mediante la siguiente relación:

$$M_I = -\lambda_{Rn}C_b \quad (4.4)$$

Reemplazando la ecuación 4.4 en 4.2 se obtiene:

$$\lambda_L = \left[ \frac{M_I - M_L}{C_b - C_0} \right] \quad (4.5)$$

La fuga de la cámara se puede calcular a partir de una aproximación lineal en el decrecimiento de la concentración de Radón generando dos pendientes a las curvas, una real, donde esta contenido el término de fuga, y una curva de decaimiento ideal, donde el decrecimiento de la concentración se debe exclusivamente a la constante de decaimiento del Radón.

Para llevar a cabo la prueba de fuga de la cámara de acumulación, se suministró Radón en el interior de la cámara a través de una de las válvulas ubicadas en los laterales. El Radón se obtuvo de una muestra de mineral de uranio mediante una bomba hasta una concentración inicial de  $3200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$

Para la prueba de fuga de la cámara de acumulación se suministró Radón al interior de la cámara a través de una de las válvulas que tiene en las paredes laterales. El Radón se extrajo de una muestra de mineral de Uranio a través de una bomba y se obtuvo una concentración inicial de  $3200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

En la Figura 4.2 se presentan los resultados de la primera prueba de hermeticidad sin cloroformo y sin grasa de vacío en la tapa superior.

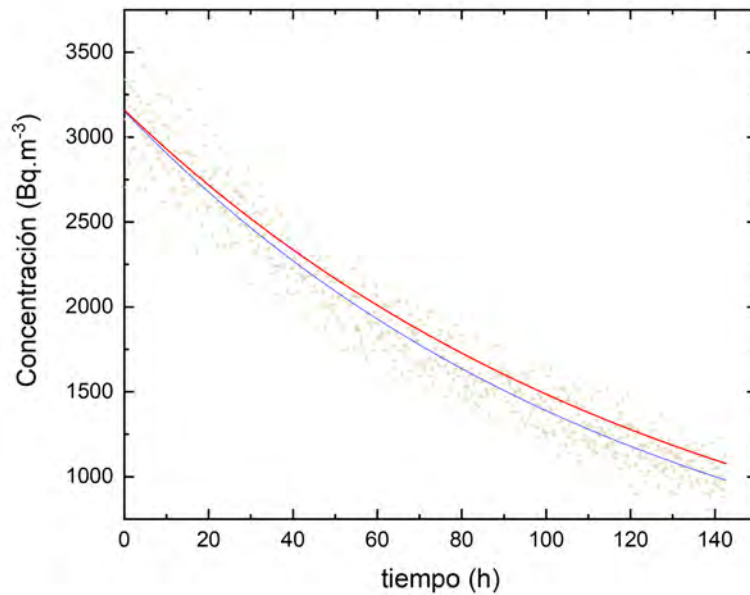


Figura 4.2: Prueba de hermeticidad por decaimiento sin cloroformo y sin grasa de vacío

La constante de decaimiento efectivo fue de  $0.0088 \text{ h}^{-1}$ , indicando claramente una fuga en la cámara, ya que idealmente en decaimiento y sin fuga, la constante de decaimiento efectivo debería ser aproximadamente igual a la constante de decaimiento de Radón  $0.00755 \text{ h}^{-1}$ .

Para evaluar el efecto del uso de cloroformo y grasa de vacío en la solución del problema de hermeticidad, se realizó un experimento de repetición y se observó una disminución significativa de la fuga, como se muestra en la Figura 4.3.

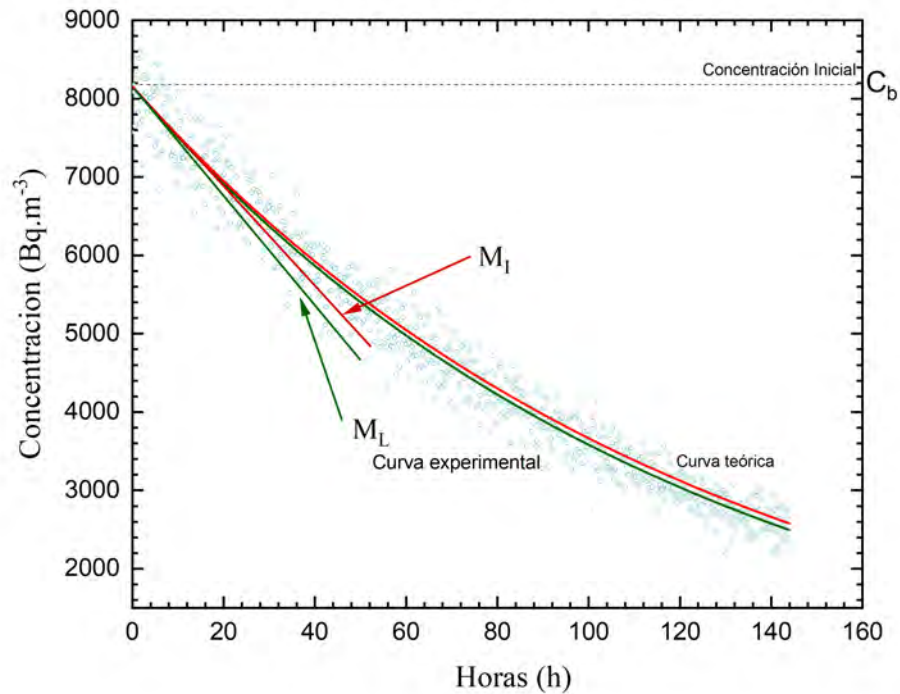


Figura 4.3: Prueba de hermeticidad por decaimiento con cloroformo y con grasa de vacío

En este segundo experimento La constante de decaimiento efectivo fue de  $0.0079 \text{ h}^{-1}$ , lo que indica que la fuga se puede considerar despreciable ya que la constante de decaimiento de Radón  $0.00755 \text{ h}^{-1}$ .

### 4.3. Zona de estabilidad del acumulador

La temperatura y la humedad se controlan mediante algoritmos de lógica difusa desarrollados en Arduino Mega. El control de la temperatura se realiza mediante la interacción de una bombilla de luz cálida que genera calor dentro de la cámara y un enfriador que genera un flujo de agua fría que recorre la cámara (Chiller). Además, el control de humedad utilizó un humidificador y deshumidificador electrónico; sin embargo no presentaron un buen resultado, ya que en su funcionamiento generaban gradientes de calor en la cámara. Por otro lado, en el interior de la cámara se instalaron una serie de sensores de temperatura (6), humedad (2) y presión (1). Finalmente, la cámara tiene una interfaz de usuario compuesta por dos perillas para configurar la temperatura (entre 11 y 35°C) y la humedad (entre 50 % y 99 %) dentro de la cámara; también tiene una pantalla para mostrar la temperatura actual dentro

de la cámara. En la Figura 3.1 se puede ver la caja de control en el lado izquierdo de la imagen.

Para asegurar la precisión del control de la temperatura y la humedad, se llevó a cabo un experimento diseñado de la manera mostrada en la Figura 4.4. Se distribuyeron de forma simétrica 9 sensores de temperatura debidamente calibrados y 5 sensores de humedad para obtener una medición precisa de estas variables.

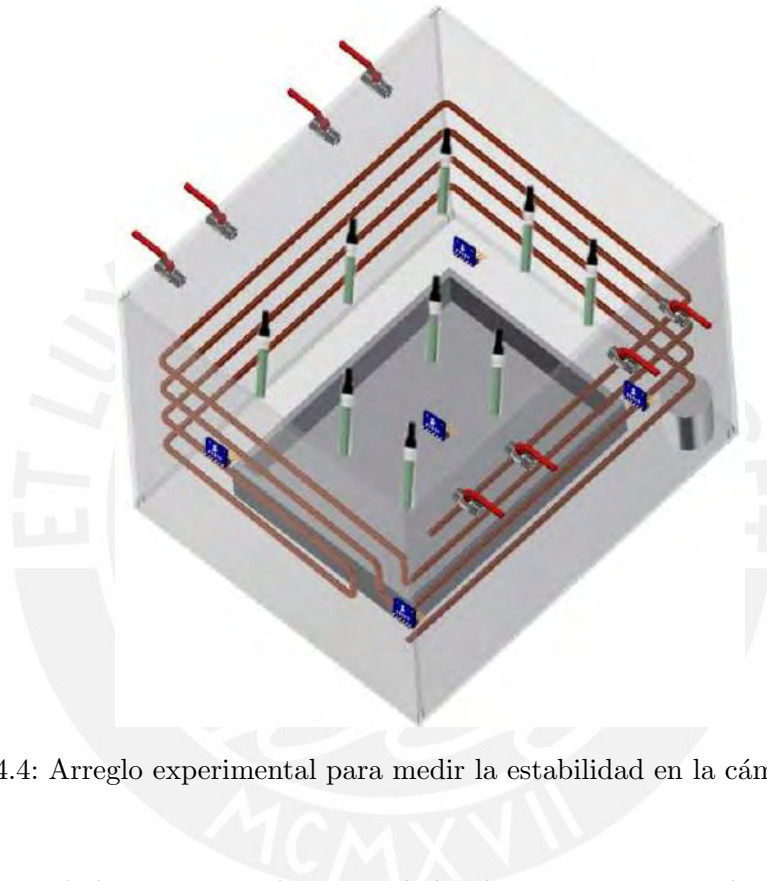


Figura 4.4: Arreglo experimental para medir la estabilidad en la cámara de acumulación

La humedad presente en el interior de la cámara se corresponde con la humedad inicial de la muestra durante el proceso de medición y se mantiene constante con una variación de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Esto significa que no es posible cambiar directamente la humedad dentro de la cámara, pero se garantiza que la humedad de la muestra inicial se mantendrá constante durante el periodo de medición. Para garantizar una distribución homogénea de la humedad dentro de la cámara, se han instalado dos ventiladores que permiten una correcta circulación de este parámetro.

En cuanto a la temperatura, es posible ajustarla libremente en un rango comprendido entre 10 a  $35^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, trabajar a una temperatura de 11 grados implica mover al límite el rendimiento del chiller, que es el equipo encargado de la circulación del fluido refrigerante. Por esta razón, se ha establecido un rango de trabajo comprendido entre 15 y  $35^{\circ}\text{C}$ .

En la Figura 4.5 se observa el tiempo para que se alcance la estabilidad en los

parámetros de temperatura y humedad.

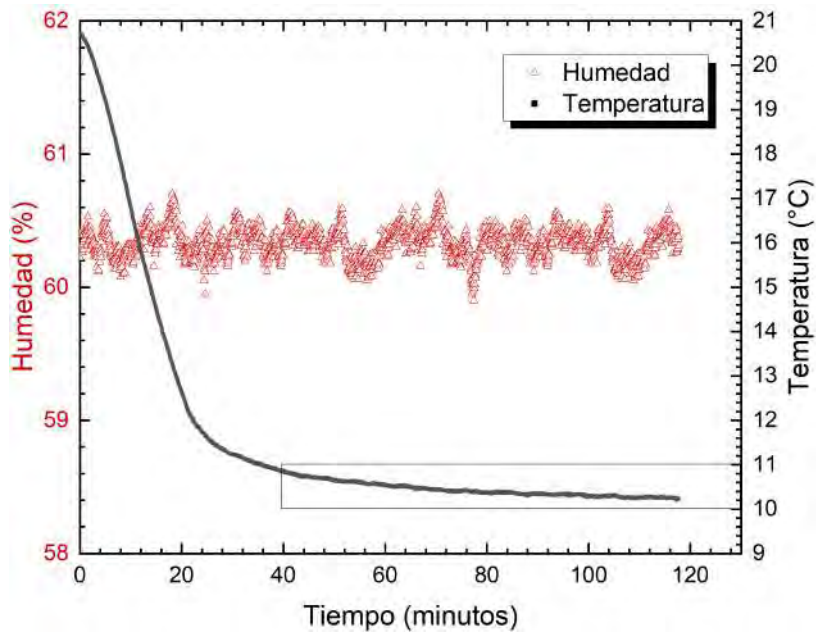


Figura 4.5: Evolución de la humedad y dentro de la cámara de acumulación

Gracias a los ventiladores, la estabilidad de la humedad se alcanza prácticamente de manera instantánea, mientras que la temperatura, toma aproximadamente 40 minutos en aproximarse al valor deseado (con una incertidumbre de 1°C), la mejor estabilidad se alcanza luego de 2 horas de iniciado el sistema de refrigeración. En este caso se presenta el test para llevar a la cámara a una temperatura de 10 °C.

La distribución de temperatura dentro de la cámara es importante para poder ubicar la muestra en un área estable de manera que en toda la muestra se tenga una temperatura uniforme sin gradientes de temperatura. Por lo tanto, antes de colocar la muestra dentro de la cámara de acumulación se debe iniciar el sistema de control de temperatura con dos horas antes, de manera que la estabilidad en la cámara de acumulación se alcance en el menor tiempo. Desde una vista superior, considerando a la base de la cámara sobre el eje X e Y (50 x 60 cm respectivamente) se puede observar que existe una zona con menor gradiente de temperatura que se ubica entre [-15 a 15] en el eje X y [- 20 a 20] en el eje Y. En esta zona es donde se ubican las muestras debido al menor gradiente de temperatura. En la siguiente Figura se observa la zona de estabilidad.



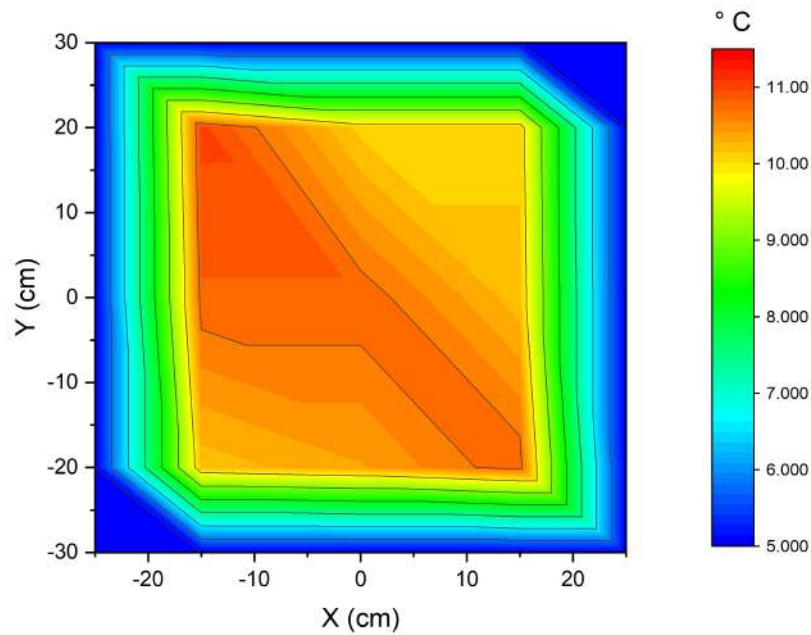


Figura 4.6: Zona de estabilidad en la cámara de acumulación

#### 4.4. Modos de medición

La cámara fue diseñada para medir en modo difusión y en modo flow donde se ha caracterizado la tasa de fuga en ambos casos. El propósito de las válvulas es poder realizar intercomparación de equipos de medición en modo flow, como Rad7, RTM, AlphaGuard y poder suministrar diferentes gases o particulado para posteriores estudios. En la siguiente Figura se puede observar el equipo Rad7 y AlphaGuard (AG) conectado a la cámara para intercomparar las mediciones en modo flow.



Figura 4.7: Intercomparación en la medición de Rad7 y AG

Los resultados de la intercomparación entre los equipos en modo flow se presentan en los siguientes gráficos

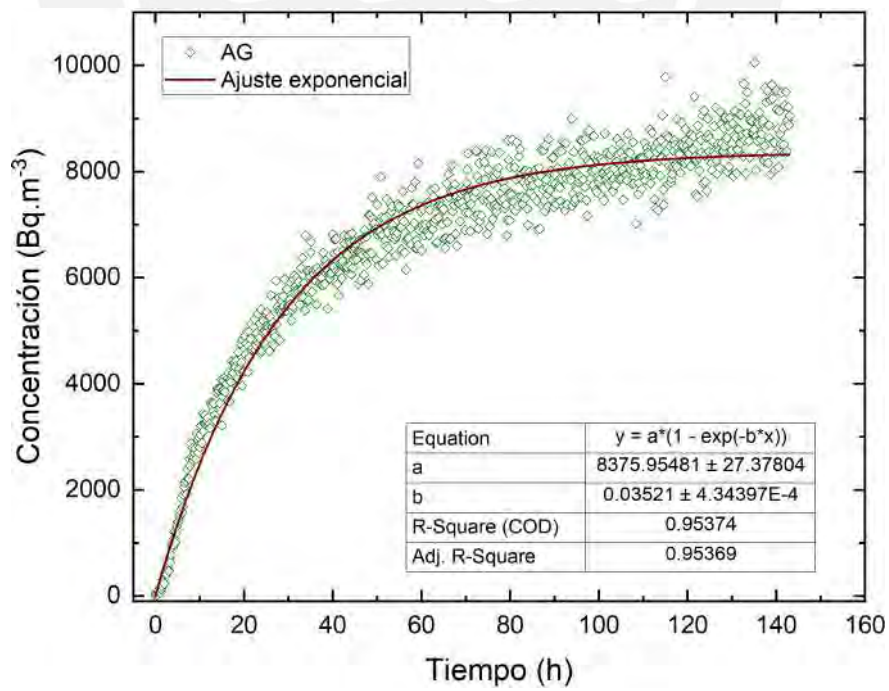


Figura 4.8: Curva de crecimiento de AG

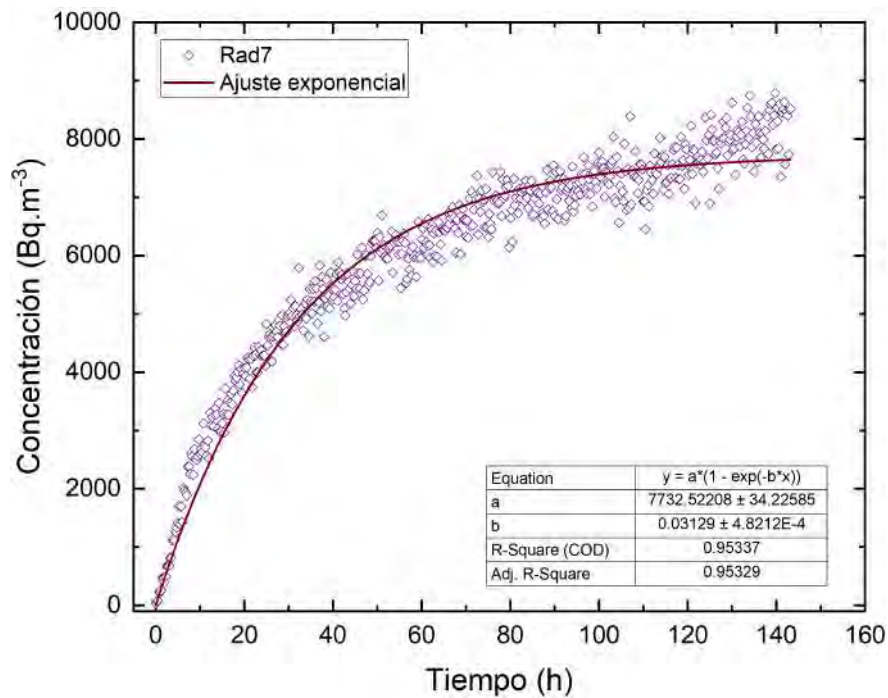


Figura 4.9: Curva de crecimiento de Rad7

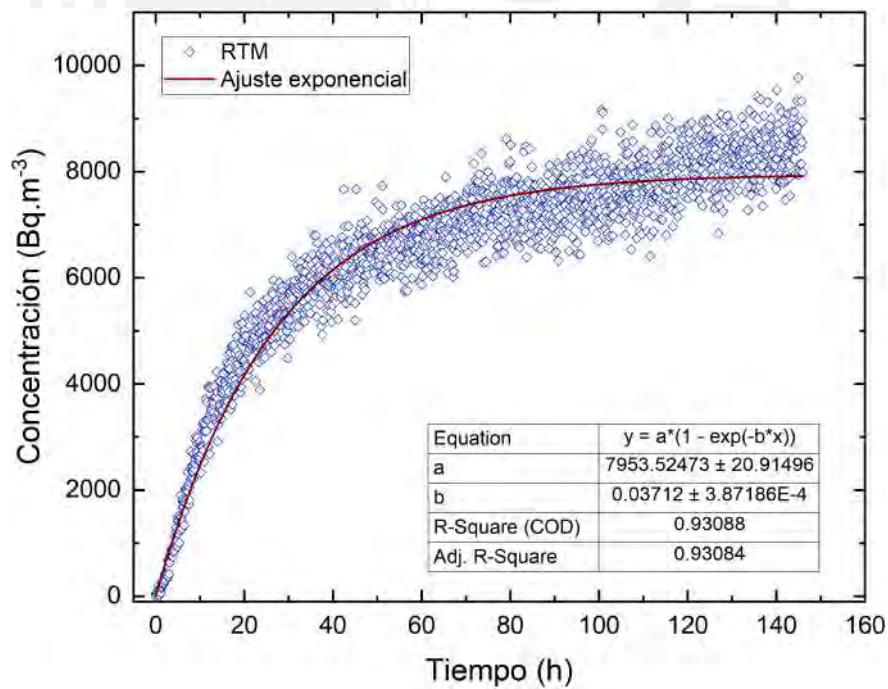


Figura 4.10: Curva de crecimiento de RTM

En el ejercicio realizado de intercomparación entre los equipos en modo flow conectados a la cámara de acumulación se observa que la constante de decaimiento efectivo es mucho mayor al de Radón ( $0.00755 \text{ h}^{-1}$ ). En la Tabla 4.1 se resume la

constante efectiva de decaimiento, constante de decaimiento de Radón y constante de fuga reportada de acuerdo a cada uno de los equipos.

Tabla 4.1: Constantes de fuga

Equipo	$\lambda_e$	$\lambda_{Rn}$	$\lambda_L$
AG	0.03521	0.00755	0.02766
RAD7	0.03129	0.00755	0.02374
RTM	0.03712	0.00755	0.02957

## 4.5. Emanación y exhalación de Radón en materiales de construcción

El estudio de la exhalación de Radón de materiales de construcción es importante para comprender la contribución relativa de estos materiales a la concentración total de Radón que se encuentra en los hogares [60]. Diversos autores realizan estudios de exhalación de Radón en masa y en área. En el caso de la exhalación en masa es necesario tener cuantificada de manera precisa la cantidad de muestra a exhalar, mientras que en la exhalación superficial, se debe determinar la superficie efectiva que interviene en el proceso de exhalación, que puede no estar estrictamente relacionada con la superficie geométrica de la muestra [61].

El cálculo de la exhalación de Radón se puede determinar a partir de dos diferentes métodos de acuerdo a lo señalado por [17]:

- Método de cámara cerrada
- Método de cámara abierta

De acuerdo a lo señalado por [16], hasta la fecha, el método más empleado para medir la tasa de exhalación de materiales de construcción es el método de la cámara cerrada. La muestra se encierra en un recipiente hermético y se controla el aumento de la concentración de Radón en el volumen de aire de la cámara. En análisis de la exhalación de Radón en la cámara cerrada inicia con la concentración de Radón  $C(t)$  desde que se cierra la cámara de acumulación, donde el Radón se acumula mediante la siguiente ecuación de transferencia de masa [62]:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E(t)S}{V_c} - \lambda_{Rn}C - \lambda_L C - \lambda_{BD}C \quad (4.6)$$

La solución se puede escribir como:

$$C(t) = C_s + (C_o - C_s)e^{-\lambda_{eff}t} \quad (4.7)$$

donde  $C_s$  es la concentración de Radón en equilibrio;  $C_0$ , concentración inicial de Radón.  $E$  es la tasa de exhalación de Radón,  $S$  es el área de exhalación y  $V_c$  es el volumen libre de la cámara cerrada (incluido el sistema de medición), y la constante de desintegración efectiva del Radón es  $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{Rn} + \lambda_{BD} + \lambda_L$ ,  $\lambda_{BD}$  es la retrodifusión,  $\lambda_L$  es la tasa de fuga de Radón. Entonces, en estado estacionario la tasa de exhalación de Radón se puede calcular mediante:

$$E = C_s \frac{\lambda_{\text{eff}} V_c}{S} \quad (4.8)$$

El proceso de acumulación de Radón dentro de la cámara cerrada se rige en las primeras 24 horas por una tasa lineal y constante de aumento de concentración de Radón [19, 63], y considerando  $\lambda_{BD}$  y  $\lambda_L$  insignificantes para un período de muestreo corto [64], se obtiene:

$$C(t) = C_0 + (C_s - C_0)\lambda_{Rn}t \quad (4.9)$$

Por lo tanto, la tasa de exhalación de Radón propuesta en la ecuación 4.8 se reescribe de la siguiente forma:

$$E = (m + \lambda C_0)V \quad (4.10)$$

donde  $m$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ ) es la pendiente inicial del crecimiento de la concentración de Radón en la cámara de acumulación en las primeras 24 horas.

#### 4.5.1. Exhalación de Radón en masa

La ecuación 4.10 describe la exhalación de Radón en  $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}$ . Al dividir esta última ecuación por la masa  $M$  (kg) permite obtener la exhalación de Radón en masa ( $\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Este parámetro es más adecuado para materiales granulares donde un cálculo preciso de la superficie de exhalación es difícil y depende en gran medida del tamaño del grano [18].

$$E_M = (m + \lambda C_0) \frac{V}{M} \quad (4.11)$$

A partir de la exhalación de Radón en masa es posible estimar el coeficiente de emanación  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{E_M}{A_{Ra}\lambda_{Rn}} \quad (4.12)$$

donde,  $A_{Ra}$  es la actividad de Radio ( $\text{Bq}/\text{kg}$ ),  $\lambda_{Rn}$  es la constante de decaimiento de Radón ( $0.00756 \text{ h}^{-1}$ )

### 4.5.2. Exhalación superficial de Radón

La tasa de exhalación superficial es proporcional al área de exhalación donde la exhalación está restringida para que tenga lugar en una sola dirección, ya sea debido a restricciones geométricas o mecánicas. La tasa de exhalación superficial se define como el flujo de Radón liberado en la superficie del material [65].

$$E_A = (m + \lambda C_0) \frac{V}{S} \quad (4.13)$$

Al igual que en el caso de la exhalación de Radón en masa, se puede estimar el coeficiente de emanación  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{E_A}{A_{Ra} \lambda_{Rn} \rho z} \quad (4.14)$$

donde,  $\rho$  es la densidad del material, y  $z$  la altura de muestra. Esta última ecuación se puede reescribir en función de la exhalación en masa:

$$E_A = E_M \frac{M}{A} \quad (4.15)$$

### 4.5.3. Mediciones de tiempo largo vs Mediciones de tiempo corto

De manera convencional se puede determinar la exhalación de Radón a partir de un proceso de acumulación durante un tiempo equivalente a 5 vidas medias del Radón hasta entrar en equilibrio con el Radio (método largo). Sin embargo, es un tiempo bastante prolongado el que se debe esperar si se considera un estudio de múltiples muestras. Por otro lado, se puede realizar el mismo estudio en un tiempo de 24 horas (método de tiempo corto) utilizado ampliamente en múltiples estudios.

Sin embargo, para poder realizar la medición de la exhalación de Radón mediante el método de tiempo corto, se requiere la fabricación de un acumulador de Radón donde se colocarán las muestras de material. Este contenedor debe ser hermético y por lo tanto se optó por elaborar un contenedor cilíndrico de acero inoxidable equipado con dos válvulas, una en la parte superior y otra en la inferior del contenedor para medir en modo de flujo.

Para verificar la hermeticidad del contenedor fabricado, se realizó una prueba de fuga colocando una muestra de mineral de uranio en el interior del contenedor, cerrándolo y midiendo externamente la posible fuga de Radón que pudiera existir. El diseño experimental de la prueba se muestra en la Figura 4.11, donde el contenedor se coloca dentro de una cámara de acumulación de acrílico, diseñada previamente.

En el interior de la cámara acrílica, se colocó el equipo AlphaGuard en modo de difusión con el objetivo de detectar cualquier variación en la concentración de la atmósfera interna de la cámara.

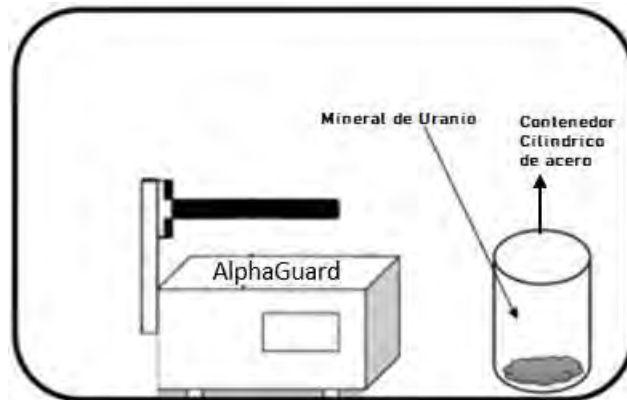


Figura 4.11: Diseño experimental de la prueba de hermeticidad del contenedor de acero.

En la Figura 4.12 se presenta la prueba de fuga de Radón del contenedor de acero cilíndrico. Los resultados de la prueba de fuga se compararon con las mediciones de fondo del laboratorio durante 12 días empleando el equipo AlphaGuard (AG). El criterio empleado fue el de Mínima Concentración Detectable, en este caso se consideró que si la concentración detectada por el AG en la prueba de fuga era mayor a la MDC ( $42 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) se podría considerar una medición diferente del fondo y se evidenciaba fuga del contenedor. Sin embargo, como se puede ver en la Figura 4.12 los datos medidos en la prueba de fuga no difieren significativamente de los de fondo.

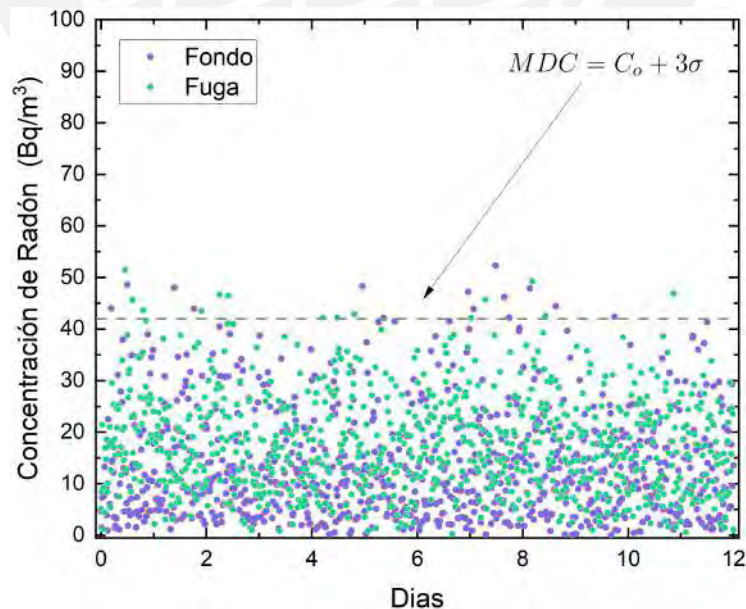


Figura 4.12: Comparación de la concentración de Radón de fondo con la concentración de Radón debida a su posible fuga del recipiente cilíndrico con mineral de uranio.

En la Figura 4.13 se presenta la evolución temporal de la concentración de Radón en el interior de la cámara. También se muestra el ajuste de datos de concentración a una función similar a la ecuación 2.12 y el ajuste de la data obtenida en las primeras 24 horas a una función lineal. Se indica el valor de la pendiente de la recta y la función exponencial con los valores de los parámetros de ajuste considerando que  $C_s \gg C_0$ , y que  $C_0$  se aproxima a cero.

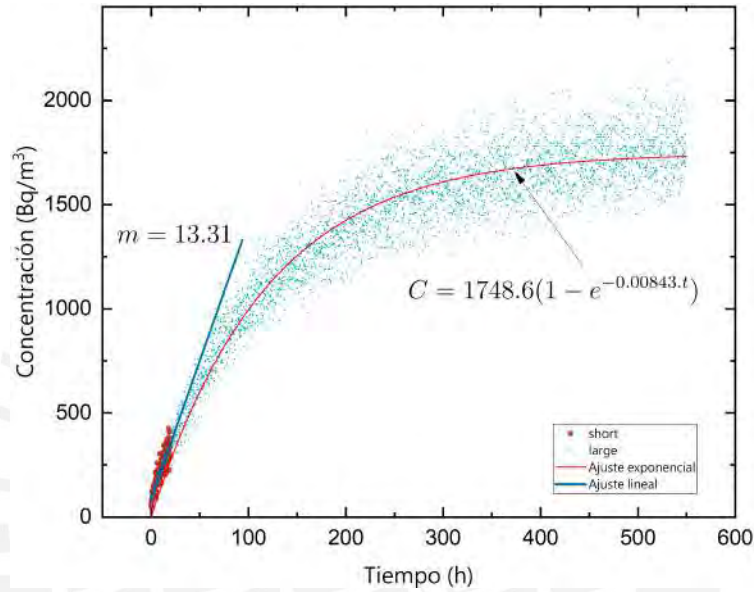


Figura 4.13: Curva y pendiente de crecimiento para método largo y corto respectivamente

En la Tabla 2.5 se presentan los parámetros para el cálculo de la tasa de exhalación de Radón en masa por ambos métodos de medición.

Tabla 4.2: Cálculo de la tasa de exhalación de Radón en masa

Método	Pendiente $m$ ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$C_0$ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_s$ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$M$ kg	$V_c$ $\text{m}^3$	Constante de decaimiento $\lambda$ ( $\text{h}^{-1}$ )	$E_M$ ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )
Corto	13.31	10	-	3	0.15	$\lambda_{Rn} = 0.00755$	$0.699 \pm 0.044$
Largo	-	-	1748.6	3	0.15	$\lambda_{eff} = 0.00843$	$0.736 \pm 0.046$



La tasa de exhalación másica de Radón se calculó utilizando el instrumento RAD7 para todas las muestras en 24 horas (medición de corto tiempo) mediante el método de cámara cerrada [19, 66, 67]. Se diseñó y construyó una cámara de acumulación cilíndrica de acero inoxidable, verificando que las fugas eran mínimas.

Esta cámara se conectó al instrumento RAD7 a través de dos válvulas formando un circuito cerrado, como se ilustra en la Figura 4.14.

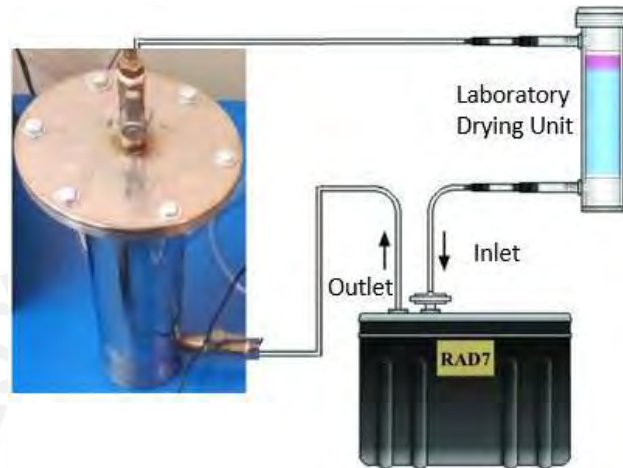


Figura 4.14: Arreglo experimental para medir la tasa de exhalación de Radón de la muestra contenida en la cámara de acumulación de acero inoxidable empleando RAD7.

El proceso de acumulación de Radón dentro de la cámara cerrada está gobernado por un crecimiento lineal de la concentración de Radón durante las primeras 24 horas [19, 63]. Por lo tanto, considerando  $\lambda_{BD}$  y  $\lambda_L$  como despreciables para un período de muestreo corto [64]. El tiempo de medición elegido para este método es más adecuado para materiales granulares, donde la superficie de exhalación es difícil de calcular con precisión y es altamente dependiente del tamaño de las partículas según Tuccimei et al. (2009). En el caso de las muestras de materiales de construcción analizados, se encontraban en forma de grano, la tierra, cemento, yeso, residuos de ladrillo se eligió triturar todas las muestras y tamizar a un tamaño de grano de 1 mm y luego de haber sido secadas a 110 °C por 24 horas, se procedió a realizar la medición de exhalación de Radón en masa. Los resultados se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Pendiente "m" y tasa de exhalación másica de Radón "ER"

Samples	$m \pm dm$ [Bq m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ]	ER $\pm$ dER [mBq kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ]
Cemento S	0,98 $\pm$ 0,07	13,06 $\pm$ 0,95
Cemento PR	1,77 $\pm$ 0,06	20,76 $\pm$ 1,41
Cemento A	1,30 $\pm$ 0,07	14,46 $\pm$ 1,06
Cemento PV	1,34 $\pm$ 0,07	16,03 $\pm$ 1,25
Cemento Y	0,93 $\pm$ 0,08	12,90 $\pm$ 1,07
Arena G	2,40 $\pm$ 0,07	19,77 $\pm$ 1,44
Arena F1	1,44 $\pm$ 0,08	13,67 $\pm$ 1,13
Arena F2	1,04 $\pm$ 0,07	12,83 $\pm$ 1,01
Yeso M	0,21 $\pm$ 0,09	4,50 $\pm$ 0,42
Yeso L	0,25 $\pm$ 0,09	4,66 $\pm$ 0,43
Concreto 1	1,75 $\pm$ 0,07	13,91 $\pm$ 1,02
Roca C	1,15 $\pm$ 0,08	11,10 $\pm$ 0,98
Ladrillo P8	2,45 $\pm$ 0,05	22,34 $\pm$ 1,30
Ladrillo P9	1,25 $\pm$ 0,06	16,05 $\pm$ 1,09

La tabla 4.3 resume la tasa de exhalación másica de Radón para todas las muestras y la pendiente de la línea ajustada, denotada como "m". La tasa de exhalación másica de Radón (ER) varía de [4,50  $\pm$  0,42] mBqkg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> a [22,34  $\pm$  1,30] mBqkg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> con un valor promedio de 14,01  $\pm$  1,04 mBqkg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>. La tasa de exhalación de Radón en los ladrillos es mayor que en otras muestras. Esto puede deberse a que la zona de extracción de material bruto para la elaboración de ladrillos es la más cercana a las regiones que presentan un potencial contenido de uranio. Las muestras de yeso no mostraron una exhalación significativa de Radón, lo que coincide con la cantidad de radio en estas muestras. El análisis de las muestras por espectrometría gama se desarrolla en la sección 5.1, donde se discutirá la correlación encontrada entre la exhalación másica de Radón y el contenido de Radio de las muestras.

Las concentraciones de Radón en interiores dependen principalmente de la exhalación de Radón del suelo circundante y de los materiales de construcción. Se ha demostrado que la exhalación de Radón de los MC es la principal fuente de Radón en los pisos superiores de los edificios [68]. Las propiedades estructurales de los materiales, como la porosidad y la permeabilidad influyen significativamente en la tasa de exhalación de Radón. Sin embargo, existen otros factores ambientales, como la temperatura y la humedad, cuyos efectos deben estudiarse de acuerdo con las ca-

racterísticas particulares de los MC y las condiciones ambientales climáticas. Para garantizar resultados fiables y de calidad en el estudio de la exhalación de Radón en materiales de construcción y suelos es necesario estandarizar el procedimiento experimental tanto para medir la exhalación de Radón como para controlar los parámetros ambientales para conseguir el estudio deseado. Para realizar este tipo de estudios y obtener resultados fiables, se requiere disponer de una cámara de características especiales. En este capítulo se presenta el diseño y construcción de una cámara de acumulación de Radón donde se controla la temperatura y la humedad.



## Capítulo 5

# Índices radiométricos debido a materiales de construcción y suelos en la ciudad de Lima

Los índices radiométricos son medidas de la exposición a la radiación y se utilizan para evaluar el riesgo de exposición a la radiación y para proteger a la población de la exposición excesiva. La exposición a la radiación debido a los MC puede ocurrir a través de la inhalación de gases radiactivos como el Radón o la exposición a la radiación externa debido a la presencia de materiales radiactivos en la construcción.

Para evaluar el riesgo de exposición a la radiación debido a los materiales de construcción, es importante conocer los niveles de radiación en los materiales y utilizar los índices radiométricos adecuados para evaluar el riesgo. También es importante seguir las recomendaciones de protección radiológica y tomar medidas para minimizar la exposición a la radiación debido a los materiales de construcción. En la actualidad, en algunos países se han realizado estudios y regulaciones de estos materiales debido a las consecuencias nocivas en la salud causadas principalmente por la inhalación de Radón. En Perú el nivel de concentración permitido en viviendas se encuentra en el rango máximo entre  $200 - 600 \text{ Bq m}^{-3}$ . En Perú se realizó un estudio de Radón ambiental En Lima metropolitana entre 2015 y 2020 que reveló que algunas áreas pueden presentar un riesgo para la salud.

En esta sección se determina de concentración de actividad en unidades de  $\text{Bq.kg}^{-1}$  de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en materiales de construcción procedentes de la costa del Perú usando la técnica de Espectrometría Gamma. A través de esta técnica es posible determinar la concentración de actividad de isótopos radiactivos, emisores gamma, por medio de las áreas netas de los picos de cada espectro analizado, sin embargo, para el Radio y el Torio no se tiene emisión de fotones en la desintegración del núcleo, por esa razón se realiza la medición a través de la progenie,  $^{214}\text{Bi}$  y  $^{208}\text{Tl}$

respectivamente, cuando se alcanza al Equilibrio Secular (30 días). Las energías de interés para este estudio son: 1460.8 keV ( $^{40}\text{K}$ ), 1764.5 keV ( $^{214}\text{Bi}$ ) y 2614.5 keV ( $^{208}\text{Tl}$ ). En la Figura 5.1 se presenta un espectro de el material de referencia empleado para la calibración y dos espectro de materiales analizados, como son ladrillo y yeso.

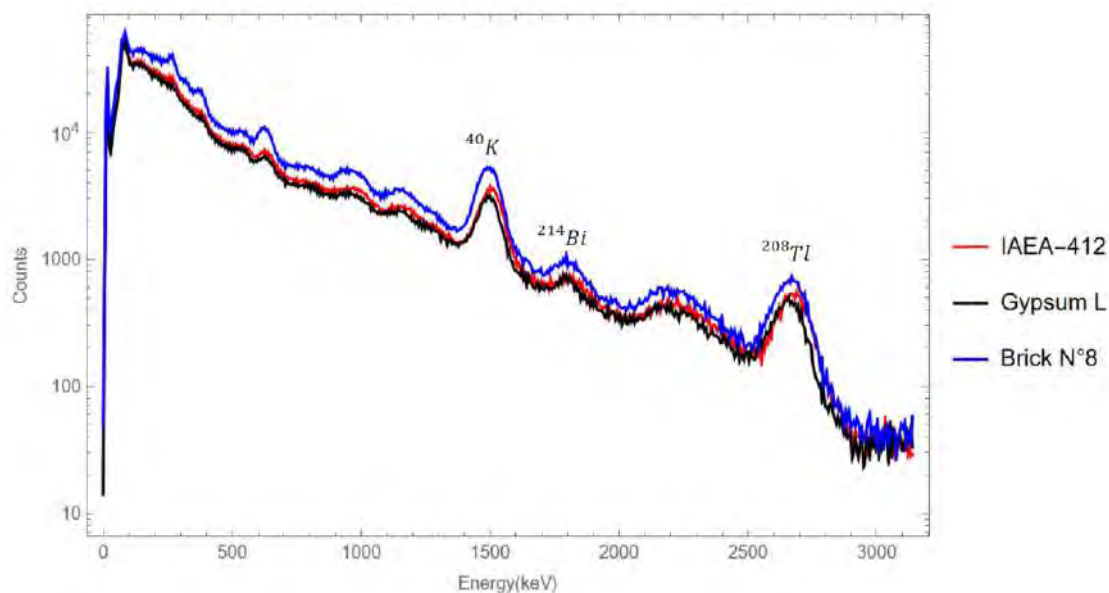


Figura 5.1: Espectro gamma de diferentes materiales como yeso, ladrillo y muestra de referencia del IAEA

## 5.1. Determinación de la dosis gama en materiales de construcción

Los materiales de construcción de varios tipos fueron recolectados de los proveedores. Las muestras procesadas se vertieron en recipientes de plástico de alta densidad hasta llenarlos por completo. Las dimensiones del recipiente fueron 85,4 mm (diámetro externo), 139,98 mm (altura de llenado), 1,96 mm (grosor lateral) y 2,20 mm (grosor base). Una vez lleno, el recipiente cilíndrico se sella herméticamente y la muestra se mantiene dentro durante aproximadamente un mes para garantizar el equilibrio secular entre el Radio, el Radón y su progenie de vida corta.

En la Figura 5.2 se muestran los métodos de sellados utilizados. En la Figura 5.2A se sella el contenedor apretando el tapón de rosca hasta el tope, en la Figura 5.2B se sella cubriendo la rosca con cinta de teflón, y en la Figura 5.2C se sella aplicando grasa de alto vacío en el contorno interno de la tapón rosca y cubriendo

la rosca con cinta de teflón.

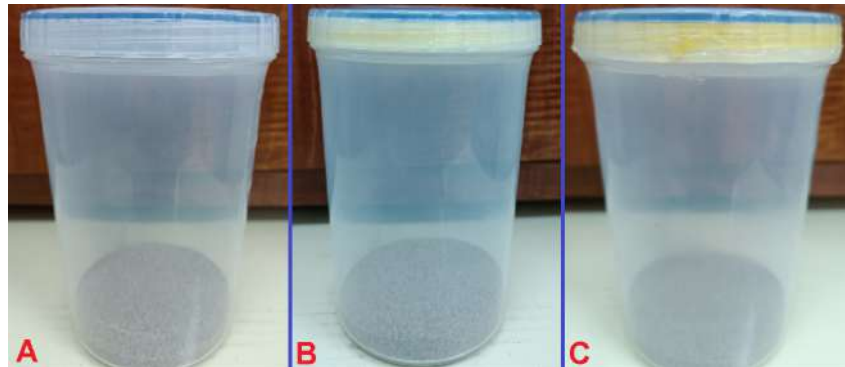


Figura 5.2: Métodos de sellados empleados para el experimento de fugas.

La prueba de fuga se realizó dentro de una cámara de acumulación utilizando el instrumento AlphaGuard (AG) en modo difusión como un monitor continuo de Radón midieron las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  durante 15 días, tomando datos cada 15 minutos. (Figura 5.3).

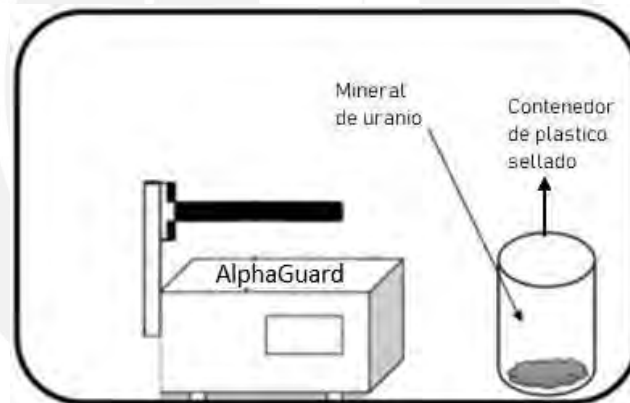


Figura 5.3: Cámara de acumulación que contiene el AG y la muestra de mineral de uranio encerrada en el contenedor cilíndrico de plástico para realizar la prueba de hermeticidad

Los resultados en la Figura 5.4 indican que la fuga de radón para el primer método de sellado es ineficiente ya que la concentración de radón después de 15 días fue aproximadamente 97 veces mayor que la concentración promedio de radón de fondo. El segundo método dio como resultado una fuga más pequeña, pero aun así superó la concentración de fondo en 15 veces. Y el último método de sellado, utilizando cinta de teflón y grasa de alto vacío, mostró un sellado prácticamente hermético por lo que puede considerarse una fuga insignificante. La concentración promedio de radón en este método fue  $(17,9 \pm 9,5) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , estadísticamente comparable a la concentración promedio de radón de fondo. Este resultado demuestra que el tercer método de sellado es eficaz para lograr la hermeticidad de los envases, que ha sido objeto

de numerosos estudios para medir la actividad de  $^{226}\text{Ra}$  mediante espectrometría de rayos gamma de muestras naturales [69–71].

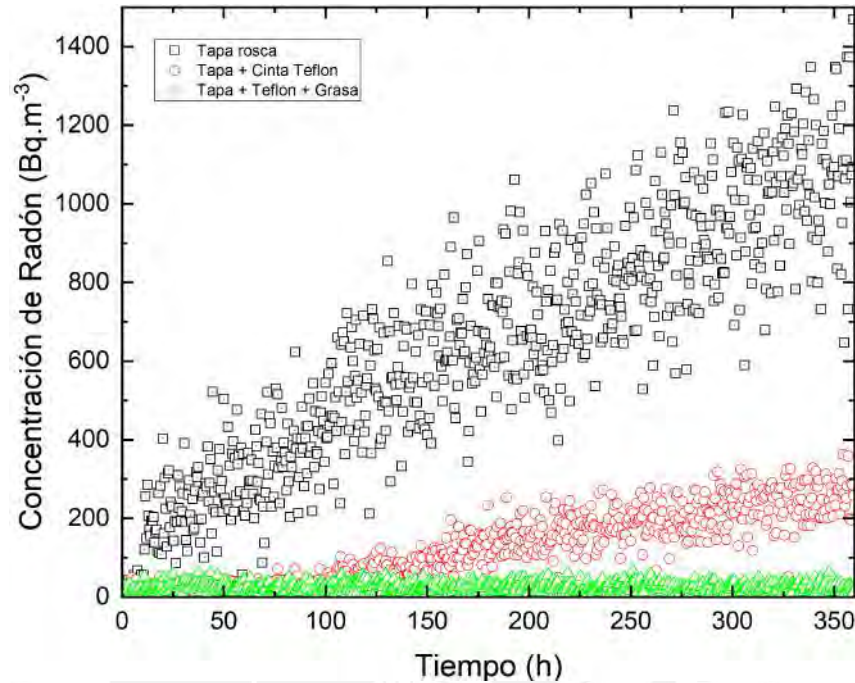


Figura 5.4: Comparación de la concentración de Radón de fondo con la concentración de Radón debida a su posible fuga del recipiente cilíndrico de plástico con mineral de uranio.

La Tabla 5.1 resume las concentraciones de actividades para  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en  $\text{Bq.kg}^{-1}$ . La variación en las concentraciones de actividad de  $^{226}\text{Ra}$  se encontró en el rango de  $1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  a  $60.6 \text{ Bq.kg}^{-1}$  con un valor medio de  $34 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Para  $^{232}\text{Th}$  se encontró en el rango de  $8 \text{ Bq.kg}^{-1}$  a  $22 \text{ Bq.kg}^{-1}$  con un valor medio de  $13 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Para  $^{40}\text{K}$  se encontró en el rango de  $9 \text{ Bq.kg}^{-1}$  a  $1074 \text{ Bq.kg}^{-1}$  con un valor medio de  $603 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Las muestras de yeso tienen el contenido más bajo de todos los radionúclidos primarios, mientras que las muestras de ladrillo tienen el contenido más alto de  $^{226}\text{Ra}$  ( $61 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ),  $^{232}\text{Th}$  ( $22 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ), y  $^{40}\text{K}$  ( $1074 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ).

Tabla 5.1: Concentración de actividad de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en muestras pulverizadas de materiales de construcción de la costa central peruana.

Muestras Material de construcción (B.M.)	Concentración de actividad: $C_m$ (Bq/kg)					
	$C_{^{40}\text{K}}$	Incertidumbre( $\pm$ )	$C_{^{226}\text{Ra}}$	Incertidumbre( $\pm$ )	$C_{^{232}\text{Th}}$	Incertidumbre( $\pm$ )
1 Cemento S	404.6	19.2	33.3	1.0	7.8	0.8
2 Cemento PR	578.5	27.4	42.5	1.6	10.8	1.0
3 Cemento A	346.5	16.4	31.8	1.2	7.8	0.8
4 Cemento PV	355.6	16.9	43.8	1.7	9.9	1.0
5 Cemento Y	820.5	38.9	30.0	1.1	9.5	0.9
6 Arena G	924.2	43.8	40.9	1.5	15.4	1.5
7 Arena F1	897.5	42.6	23.8	0.9	7.7	0.7
8 Arena F2	834.3	39.6	42.1	1.6	13.4	1.3
9 Yeso M	10.4	0.5	1.10	0.04	DLT	-
10 Yeso L	8.6	0.4	1.00	0.04	DLT	-
11 Concreto 1	667.0	31.6	44.4	1.7	19.6	1.9
12 Roca C	451.9	21.4	28.7	1.1	10.8	1.0
13 Ladrillo P8	1067.1	50.6	60.6	2.3	21.4	2.1
14 Ladrillo P9	1073.7	50.9	50.6	1.9	22.3	2.2

DLT: Por debajo del límite de detección

De acuerdo con por la [72], los niveles de actividad global promedio de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  son  $35 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ,  $35 \text{ Bq.kg}^{-1}$  y  $400 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , respectivamente. Los resultados muestran que la media geométrica de  $^{226}\text{Ra}$  de los materiales de construcción es inferior al promedio mundial de  $35 \text{ Bq.kg}^{-1}$ .

Para evaluar el riesgo de radiación asociado con los materiales de construcción, se utilizaron parámetros radiológicos como el índice Gamma ( $I_\gamma$ ), la actividad equivalente del radio ( $Ra_{eq}$ ) y el índice de riesgo externo ( $H_{ex}$ ).

### Índice gamma $I_\gamma$

La Comisión Europea [73] y varios autores [74, 75] han propuesto algunos índices para evaluar el exceso de radiación gamma de los materiales de construcción y su relación con la tasa de dosis anual. En este sentido, el índice Gamma es el efecto de tres radioisótopos en los materiales de construcción, como  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_\gamma = \frac{C_{^{226}\text{Ra}}}{300} + \frac{C_{^{232}\text{Th}}}{200} + \frac{C_{^{40}\text{K}}}{3000} \quad (5.1)$$

El valor numérico de  $I_\gamma$  se utiliza para identificar los criterios de dosis para el control y la exención. Los materiales de construcción con  $I_\gamma \leq 0,3$  están exentos y se pueden utilizar como materiales de construcción sin restricciones [73].

### Actividad de Radio equivalente $Ra_{eq}$

$Ra_{eq}$  es un índice común que representa una suma ponderada de actividades de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en los MC propuesto por [76]:



$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,077C_K \quad (5.2)$$

La tasa de dosis máxima permisible en cualquier material de construcción es de 1,5 mGy/h, equivalente a 370 Bq/kg de  $Ra_{eq}$  [77].

### Índice de riesgo externo $H_{ex}$

El índice de riesgo externo  $H_{ex}$  estima la dosis de radiación esperada debido a los rayos  $\gamma$  emitidos por los materiales de construcción y asume paredes gruesas sin ventanas ni puertas [76]. Los valores del índice  $H_{ex}$  deben ser inferiores a 1 para que el riesgo de radiación sea insignificante y se puede calcular de acuerdo a lo indicado por [76]:

$$H_{ex} = \frac{C_{226Ra}}{370} + \frac{C_{232Th}}{259} + \frac{C_{40K}}{4810} \quad (5.3)$$

Tabla 5.2: Valores de los índices radiométricos, Índice gamma, Índice de riesgo externo y Radio equivalente

Muestra	Raeq (Bq/kg)	Hex	Índice Gama
Cemento S	75.54	0.20	0.28
Cemento PR	102.45	0.28	0.39
Cemento A	69.55	0.19	0.26
Cemento PV	85.39	0.23	0.31
Cemento Y	106.72	0.29	0.42
Arena G	134.16	0.36	0.52
Arena F1	103.92	0.28	0.42
Arena F2	125.47	0.34	0.49
Yeso M	3.34	0.01	0.01
Yeso L	3.11	0.00	0.01
Concreto 1	123.72	0.33	0.47
Roca C	78.89	0.21	0.30
Ladrillo P8	173.40	0.47	0.66
Ladrillo P9	165.07	0.45	0.64

Los valores medios Radio equivalente  $Ra_{eq}$ , Índice gamma  $I_\gamma$  y riesgo externo  $H_{ex}$  se representan en la Tabla 5.2. El radio equivalente  $Ra_{eq}$  en las muestras de cemento fue de  $[87,93 \pm 16,29]$  Bq.kg<sup>-1</sup> (promedio  $\pm$  desviación estándar), en las muestras de yeso fue de  $[3 \pm 0,16]$  Bq.kg<sup>-1</sup>, en las muestras de ladrillos fue de  $[169,24 \pm 5,89]$  Bq.kg<sup>-1</sup>, en las muestras de agregados se encontró  $[110,61 \pm 24,67]$  Bq.kg<sup>-1</sup>, y la muestra de concreto fue 124 Bq.kg<sup>-1</sup>. El Índice gamma  $I_\gamma$  en muestras de cemento fue 0.33, en las muestras de yeso fue  $0.0100 \pm 0.0004$ , en las muestras de ladrillo fue  $0.65 \pm 0.19$ , en las muestras de agregados fue  $0.43 \pm 0.13$ , y en la muestra de concreto fue 0.47. El riesgo externo  $H_{ex}$  en las muestras de cemento fue  $0,24 \pm 0,04$ ,

en las muestras de yeso fue  $0,0100 \pm 0,0004$ , en las muestras de ladrillo fue  $0,46 \pm 0,02$ , en las muestras de agregados fue  $0,30 \pm 0,07$ , y la muestra de hormigón fue de 0,33. El valor calculado de  $Ra_{eq}$  indica que no se superó el límite de  $370 \text{ Bq.kg}^{-1}$  en ninguna muestra, por lo que pueden considerarse radiológicamente seguras [77]. El Índice Gamma  $I_\gamma$  para el yeso es mucho menor que 0,3, por lo que este material puede considerarse exento y puede usarse como material de construcción sin restricciones. Para cemento, agregados y hormigón se encontró  $0,3 < I_\gamma < 0,5$  que corresponde a una tasa de dosis efectiva de  $0,3 \text{ mSv/y}$ . Para ladrillos  $0,5 < I_\gamma < 1$ , correspondiente a una tasa de dosis efectiva de  $1 \text{ mSv/y}$  [73]. Los valores del índice de Riesgo Externo  $H_{ex}$  son inferiores a 1 para los materiales de construcción estudiados, asegurando así un riesgo de radiación insignificante.



## Capítulo 6

# Conclusiones y próximos trabajos

### CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos muestran que los índices radiológicos (Radio equivalente  $Ra_{eq}$ , Índice de gamma  $I_\gamma$  y Riesgo externo  $H_{ex}$ ) de todos los tipos de muestras son adecuadas para su uso como materiales de construcción porque presentan una baja concentración de actividad de acuerdo a lo indicado por la UNSCEAR.
2. La construcción de la cámara de acumulación para estudios de exhalación de Radón permite controlar de manera adecuada la temperatura en un rango de 11-35 grados de manera externa, sin embargo, solo puede mantener establece la humedad en la cámara, siendo el valor de humedad con el que ingresa la muestra a la cámara un valor casi constante durante el periodo de acumulación.
3. El potencial geogénico de Radón en la mayoría de los casos indica un riesgo bajo, y sólo en dos puntos se considera como riesgo medio. Estos resultados son consecuentes con las mediciones de Radón en interior de viviendas ya la concentración promedio de Radón está por debajo del límite de  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  establecido por el organismo regulador en Perú.

### PRÓXIMOS TRABAJOS

1. Determinar la radiactividad natural debido al contenido de NORM en los principales materiales de construcción de diferentes regiones de Perú.
2. Elaborar el primer mapa de potencial geogénico de Radón en todo Lima metropolitana.

# Bibliografía

- [1] Universidad de Burgos. <https://ubuinvestiga.es/el-radon-un-enemigo-invisible/>, 29 de Abril, 2021.
- [2] Lázaro Luís Vilcapoma, María Elena López Herrera, Patrizia Pereyra, Daniel Francisco Palacios, Bertin Pérez, Jhonny Rojas, and Laszlo Sajo-Bohus. Measurement of radon in soils of lima city-peru during the period 2016-2017. *Earth Sciences Research Journal*, 23(3):171–183, 2019.
- [3] Akihiro Sakoda and Yuu Ishimori. Mechanisms and modeling approaches of radon emanation for natural materials. , 52(4):296–306, 2017.
- [4] Martin Neznal and Matěj Neznal. Analysis of problems and failures in the measurement of soil-gas radon concentration. *Radiation Protection Dosimetry*, 160(1-3):214–216, 2014.
- [5] G Dubois. An overview of radon surveys in europe. *European Commission*, pages 1–168, 2005.
- [6] R Rivera. Realidad y perspectivas de los minerales radioactivos en el Perú. Ingemmet, 2010.
- [7] Akihiro Sakoda, Yuu Ishimori, Katsumi Hanamoto, Takahiro Kataoka, Atsushi Kawabe, and Kiyonori Yamaoka. Experimental and modeling studies of grain size and moisture content effects on radon emanation. *Radiation Measurements*, 45(2):204–210, 2010.
- [8] Anthony V Nero and WW Nazaroff. Characterising the source of radon indoors. *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1-4):23–39, 1984.
- [9] Paula M Lantz, David Mendez, and Martin A Philbert. Radon, smoking, and lung cancer: the need to refocus radon control policy. *American journal of public health*, 103(3):443–447, 2013.
- [10] M Atipo, O Olarinoye, and B Awojoyogbe. Comparative analysis of norm concentration in mineral soils and tailings from a tin-mine in nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 79(16):1–17, 2020.

- [11] Oscar Palacios Moncayo, Julio Caldas Vidal, and Churchill Vela Velásquez. Geología de los cuadrángulos de lima, lurín, chancay y chosica. hojas 25-i, 25-j. 24-i, 24-j-[boletín a 43]. 1992.
- [12] P Pereyra, ME López, and L Vilcapoma. Concentration measurements of radon 222 indoors in lima—peru. *International Journal of Physics*, 3(4):165–169, 2015.
- [13] Rafael Angel Liza Neciosup. Mapeo de los niveles de radón 222 en el distrito de san martín de porres (lima-perú) en el periodo 2015-2016. 2017.
- [14] César Jheferson Guevara Pillaca. *Medición de radón 222 en Lima Metropolitana utilizando tres tipos de monitores con detectores de trazas nucleares*. PhD thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru), 2019.
- [15] Deborah Tolulope Esan, Mynepalli Kameswara Chandra Sridhar, Rachel Obed, Yinka Ajiboye, Olusegun Afolabi, Babakayode Olubodun, and Olatunde Michael Oni. Determination of residential soil gas radon risk indices over the lithological units of a southwestern nigeria university. *Scientific Reports*, 10(1):7368, 2020.
- [16] Erling Stranden. *Building materials as a source of indoor radon*. John Wiley & Sons New York, NY, USA, 1988.
- [17] NP Petropoulos, MJ Anagnostakis, and SE Simopoulos. Building materials radon exhalation rate: Erricca intercomparison exercise results. *Science of the total environment*, 272(1-3):109–118, 2001.
- [18] Paola Tuccimei, Mauro Castelluccio, Michele Soligo, and Massimo Moroni. Radon exhalation rates of building materials: experimental, analytical protocol and classification criteria. *Building materials: Properties, performance and applications*, pages 259–274, 2009.
- [19] I López-Coto, JL Mas, JP Bolivar, and R García-Tenorio. A short-time method to measure the radon potential of porous materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(1):133–138, 2009.
- [20] V Gruber, P Bossew, M De Cort, and T Tollefsen. The european map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*, 33(1):51, 2013.
- [21] T Klink, K Gaber, E Schlattner, and MJ Setzer. Characterisation of the gas transport properties of porous materials by determining the radon diffusion coefficient. *Materials and structures*, 32(10):749–754, 1999.
- [22] Surinder Singh, Jatinder Kumar, Baldev Singh, and Jaspal Singh. Radon diffusion studies in some building materials using solid state nuclear track detectors. *Radiation measurements*, 30(4):461–464, 1999.

- [23] Talia Tene, Cristian Vacacela Gomez, Gabriela Tubon Usca, Betzabeth Suquillo, and Stefano Bellucci. Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of highland region of ecuador. *Construction and Building Materials*, 293:123282, 2021.
- [24] Fei Tuo, Xuan Peng, Qiang Zhou, and Jing Zhang. Assessment of natural radioactivity levels and radiological hazards in building materials. *Radiation Protection Dosimetry*, 188(3):316–321, 2020.
- [25] O Brigido Flores, A Montalvan Estrada, R Rosa Suárez, J Tomás Zerquera, and A Hernández Pérez. Natural radionuclide content in building materials and gamma dose rate in dwellings in cuba. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(12):1834–1837, 2008.
- [26] Morteza Imani, Mohammadamad Adelikhah, Amin Shahrokhi, Ghazaleh Azimpour, Ali Yadollahi, Erika Kocsis, Edit Toth-Bodrogi, and Tibor Kovács. Natural radioactivity and radiological risks of common building materials used in semnan province dwellings, iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(30):41492–41503, 2021.
- [27] V Thangam, A Rajalakshmi, A Chandrasekaran, and B Jananee. Radiometric analysis of some building materials using gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324(3):1059–1067, 2020.
- [28] Tingting Feng and Xinwei Lu. Natural radioactivity, radon exhalation rate and radiation dose of fly ash used as building materials in xiangyang, china. *Indoor and Built Environment*, 25(4):626–634, 2016.
- [29] Allan Felipe Nunes Perna, Sergei Anatolyevich Paschuk, Janine Nicolosi Corrêa, Danielle Cristine Narloch, Rafael Carvalho Barreto, Flávia Del Claro, and Valeriy Denyak. Exhalation rate of radon-222 from concrete and cement mortar. *Nukleonika*, 63, 2018.
- [30] Hongbing Sun and David J Furbish. Moisture content effect on radon emanation in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 18(3):239–255, 1995.
- [31] Frédéric Girault, Frédéric Perrier, Manuel Moreira, Brigitte Zanda, Pierre Rochette, and Yoram Teitler. Effective radium-226 concentration in meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 208:198–219, 2017.
- [32] Frédéric Girault and Frédéric Perrier. Measuring effective radium concentration with large numbers of samples. part ii—general properties and representativity. *Journal of environmental radioactivity*, 113:189–202, 2012.

- [33] Warren W Wood, Thomas F Kraemer, and Allen Shapiro. Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) in ground water of fractured rocks: a diffusion/ion exchange model. *Groundwater*, 42(4):552–567, 2004.
- [34] R. Colle. Radon transport through and exhalation from building materials: a review and assessment. 1981.
- [35] J Porstendörfer. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25(2):219–263, 1994.
- [36] William W Nazaroff and Anthony V Nero. Radon and its decay products in indoor air. 1988.
- [37] N Chitra, S Bala Sundar, MT Jose, K Sivasubramanian, and B Venkatraman. A simple model to simulate the diffusion pattern of radon in different soil media. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(2):1151–1158, 2019.
- [38] G Keller, B Hoffmann, and TH Feigenspan. Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Science of the total environment*, 272(1-3):85–89, 2001.
- [39] Durridge. Rad7 radon detector—user manual, 2011.
- [40] Hadeel Tariq Hamad, Mahmood Salim Karim, and Nada Farhan Kadhim. Comparison of three techniques for measuring radon gas. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1879, page 032052. IOP Publishing, 2021.
- [41] National Research Council et al. Health effects of exposure to radon: Beir vi. 1999.
- [42] Gabriele Buttafuoco, Adalisa Tallarico, Giovanni Falcone, and Ilaria Guagliardi. A geostatistical approach for mapping and uncertainty assessment of geogenic radon gas in soil in an area of southern italy. *Environmental Earth Sciences*, 61(3):491–505, 2010.
- [43] D Bleile and J Wiegand. Checking the “10 point system” for an evaluation of the soil radon potential. In *Radioactivity in the environment*, volume 7, pages 833–841. Elsevier, 2005.
- [44] Matěj Neznal, Martin Neznal, Milan Matolin, Ivan Barnet, and Jitka Miksova. *The new method for assessing the radon risk of building sites*. Czech Geological Survey Prague, 2004.
- [45] Karl Terzaghi, Ralph B Peck, and Gholamreza Mesri. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, 1996.

- [46] Zenón Aguilar, Fernando Lazares, Silvia Alarcon, Selene Quispe, Rocío Uriarte, and Diana Calderon. Actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de lima. In *International Symposium for CISMID 25th Anniversary*, pages 17–18, 2012.
- [47] Geotechdata.info. <https://www.geotechdata.info/parameter/soil-porosity>, 22 de Diciembre de 2022.
- [48] H Alonso, JG Rubiano, JG Guerra, MA Arnedo, A Tejera, and P Martel. Assessment of radon risk areas in the eastern canary islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils. *Science of the Total Environment*, 664:449–460, 2019.
- [49] A Lindmark and B Rosen. Radon in soil gas—exhalation tests and in situ measurements. *Science of the total Environment*, 45:397–404, 1985.
- [50] DJ Holford. Rn3d: A finite element code for simulating gas flow and radon transport in variably saturated, nonisothermal porous media. users manual, version 1.0. Technical report, Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States), 1994.
- [51] Katalin Zsuzsanna Szabó, Gyozo Jordan, Ákos Horváth, and Csaba Szabó. Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central hungary. *Journal of environmental radioactivity*, 129:107–120, 2014.
- [52] Peter Bossew. Mapping the geogenic radon potential and estimation of radon prone areas in germany. *Radiation Emergency Medicine*, 4(2):13–20, 2015.
- [53] M Castelluccio, G De Simone, C Lucchetti, M Moroni, F Salvati, and P Tucimej. A new technique to measure in situ soil gas permeability. *Journal of Geochemical Exploration*, 148:56–59, 2015.
- [54] Matej Neznal. Permeability as an important parameter for radon risk classification of foundation soils. *Annals of Geophysics*, 48(1), 2005.
- [55] Rafael Angel Liza Neciosup. *Mapeo de los niveles de Radón 222 en el distrito de San Martín de Porres (Lima-Perú) en el periodo 2015-2016*. PhD thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú-CENTRUM Católica (Peru), 2017.
- [56] Stewart Alain Torres Burga. *Mapeo de Radón 222 en interiores en el Distrito de Los Olivos (Lima-Perú) del 2015 al 2016*. PhD thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú-CENTRUM Católica (Peru), 2017.
- [57] Víctor Oliver Canchos López. *Monitoreo de concentración de radón en el distrito de San Juan de Miraflores (Lima-Perú) en el período 2015–2016*. PhD thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú-CENTRUM Católica (Peru), 2020.



- [58] Christopher YH Chao, Thomas CW Tung, Daniel WT Chan, and John Burnett. Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. *Building and Environment*, 32(4):355–362, 1997.
- [59] M Abo-Elmagd. Radon exhalation rates corrected for leakage and back diffusion—evaluation of radon chambers and radon sources with application to ceramic tile. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(4):390–398, 2014.
- [60] Khan M Shakir, AH Naqvi, A Azam, and DS Srivastava. Radium and radon exhalation studies of soil. 2011.
- [61] Giuseppe Carrera, Massimo Garavaglia, Stefano Magnoni, Gianluigi Valli, and Roberta Vecchi. Natural radioactivity and radon exhalation in stony materials. *Journal of environmental radioactivity*, 34(2):149–159, 1997.
- [62] Predrag Ujić, I Čeliković, Aleksandar Kandić, and Z Žunić. Standardization and difficulties of the thoron exhalation rate measurements using an accumulation chamber. *Radiation measurements*, 43(8):1396–1401, 2008.
- [63] Constantin Cosma, Alexandra Cucuș-Dinu, Botond Papp, Robert Begy, and Carlos Sainz. Soil and building material as main sources of indoor radon in băița-ștei radon prone area (romania). *Journal of environmental radioactivity*, 116:174–179, 2013.
- [64] BE Lehmann, Beat Ihly, S Salzmann, F Conen, and E Simon. An automatic static chamber for continuous  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  flux measurements from soil. *Radiation measurements*, 38(1):43–50, 2004.
- [65] Raimo Mustonen. Natural radioactivity in and radon exhalation from finnish building materials. *Health Physics*, 46(6):1195–1203, 1984.
- [66] Lei Zhang, Xing Lei, Qiuju Guo, Shanqiang Wang, Xinhua Ma, and Zhilan Shi. Accurate measurement of the radon exhalation rate of building materials using the closed chamber method. *Journal of Radiological Protection*, 32(3):315, 2012.
- [67] Federica Leonardi, M Bonczyk, C Nuccetelli, M Wysocka, B Michalik, M Ampollini, S Tonnarini, J Rubin, K Niedbalska, and R Trevisi. A study on natural radioactivity and radon exhalation rate in building materials containing norm residues: preliminary results. *Construction and Building Materials*, 173:172–179, 2018.

- [68] Hyungjin Hong, Jiwon Choi, Sungwon Yoon, Heechun Kim, and Cheolmin Lee. Evaluation of the radon contribution rate in apartments through evaluation of the radon exhalation rate from building materials. 2021.
- [69] Jan C Scholten, Iolanda Osvath, and Mai Khanh Pham.  $^{226}\text{Ra}$  measurements through gamma spectrometric counting of radon progenies: How significant is the loss of radon? *Marine Chemistry*, 156:146–152, 2013.
- [70] Michal Bonczyk and Krzysztof Samolej. Testing of the radon tightness of beamers and different types of sealing used in gamma-ray spectrometry for  $^{226}\text{Ra}$  concentration determination in norm. *Journal of environmental radioactivity*, 205:55–60, 2019.
- [71] Nur Syamsi Syam, Sooyeon Lim, Hae Young Lee, and Sang Hoon Lee. Determination of radon leakage from sample container for gamma spectrometry measurement of  $^{226}\text{Ra}$ . *Journal of Environmental Radioactivity*, 220:106275, 2020.
- [72] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. unsear 1996 report to the general assembly, with scientific annex. 1996.
- [73] European-Commission. Radiation protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. *Nuclear Safety and Civil Protection*, 1999.
- [74] Serena Righi and Luigi Bruzzi. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in italian dwellings. *Journal of environmental radioactivity*, 88(2):158–170, 2006.
- [75] Mayeen Uddin Khandaker, PJ Jojo, HA Kassim, and YM Amin. Radiometric analysis of construction materials using hpge gamma-ray spectrometry. *Radiation protection dosimetry*, 152(1-3):33–37, 2012.
- [76] J Beretka and PJ Mathew. Natural radioactivity of australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health physics*, 48(1):87–95, 1985.
- [77] R Krieger. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertigteile Techn*, 47(8):468–473, 1981.

## Apéndice A

# Código para perfil de Radón en suelo

```
import math
import matplotlib.pyplot as plt

nnodes = 180 número de nodos
delz = -0.1 initial grid spacing
dzmult = 1.11 espaciamento inicial de la cuadrícula
dzmax = -0.8 maxima profundidad
sat = 0.8 porcentaje de saturación de humedad
dist = .26 Coeficiente de distribución de la ley de Henry
tort = 0.09/0.35 Tortuosidad
por = 0.4 Porosidad Total
dair = 0.10 Difusión en el aire
diff = 1.1e-3 Coeficiente de difusión efectiva
dpdz = 0.0 Gradiente de presión vertical
cond = 3.5e-12 Permeabilidad
vis = 1.8e-3 Viscosidad
decay = 2.1e-6 Constante de decaimiento radiactivo
eman = .45 Fracción de emanación
radium = .095 Contenido de radio
bulkdens = 0.2 Bulk Density
source = radium * eman * bulkdens * decay / por / (1 - sat + sat * dist)
cdepth = source / decay
vel = dpdz * cond / vis / por / (1 - sat + sat * dist)
with open("perfil.txt", "w") as f:
beta = vel / math.sqrt(4 * decay * por * diff)
```

```

gamma = beta + math.sqrt(beta ** 2 + 1)
flux = gamma * cdepth * math.sqrt(decay * por * diff)
f.write(f"flux(z=0)= flux")
f.write("\n")
f.write("Concentracion(pCi/cm), Profundidad(cm)")
z = 0.
for i in range(1, nnodes + 1):
c =source/decay*(1-math.exp(gamma*math.sqrt(decay*por/diff)*z))
f.write(f"c, z")
z += delz
delz *= dzmult
delz = max(delz, dzmax)
data = []
with open("perfil.txt") as f:
for i in range(4):
next(f)
for line in f:
depth, concentration = line.strip().split(", ")
data.append((float(depth), float(concentration)))
plt.plot(*zip(*data))
plt.ylabel("Profundidad (cm)")
plt.xlabel("Concentración (pCi/cm)")
plt.show()

```

## Apéndice B

# Logros académicos

### Publicaciones

- Rafael Liza, Patrizia Pereyra, Jose Rau, Maribel Guzman, Laszlo Sajo-Bohus and Daniel Palacios, (2023). Assessment of Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Peruvian Gold Mine Tailings to Produce a Geopolymer Cement. Atmosphere. <https://doi.org/10.3390/atmos14030588>
- Rafael Liza, Jhonny Rojas, Patrizia Pereyra, María Elena López Herrera, Daniel Palacios, Laszlo Sajo-Bohus, (2017). Tasa de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  del suelo en el yacimiento arqueológico Huaca 20. Radiaciones ionizantes y su impacto.
- P Pereyra, ME López, D Palacios, V Canchos, C Guevara, R Liza, L Sajo Bohus, (2018). Mediciones de Radón  $^{222}$  en la ciudad de Lima y Callao utilizando detectores de Huellas Nucleares. XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, Congreso Regional IRPA, La Habana, Cuba, Abril.

### Eventos

- 1st International Symposium on Environment 2016: (PONENCIA): Tasa de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$  del suelo en el sitio arqueológico Huaca 20. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.
- IRPA Cuba 2018: XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. (PONENCIA): Parámetros climáticos y su relación con la dosis efectiva anual debido a radón  $^{222}$  en el interior de viviendas.
- 3rd International Conference Radon in the Environment (2019). (PONENCIA): Design, construction, and completion of an accumulation chamber with controlled conditions for studies of radon exhalation from building materials.

(Proceeding) Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, Krakow  
– Poland.

### **Estancias**

- Laboratorio de radiactividad ambiental en La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria – España (2019)

