



**UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO
ESCUELA DE POSGRADO**



DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**Determinación del nivel de radón - 222 proveniente de
suelos en el distrito de Lambayeque año 2019**

TESIS

**Presentada para optar el Grado Académico de
Doctora en Ciencias Ambientales**

AUTORA:

M.Sc. Gonzalez Esqueche, Maria Asuncion

ASESORA:

Dra. López Herrera, María Elena

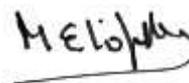
LAMBAYEQUE - PERÚ

2022

**“Determinación del nivel de radón - 222 proveniente de suelos en el
distrito de Lambayeque año 2019”**



M.Sc. Maria Asunción Gonzalez Esqueche
Autora



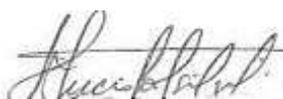
Dra. María Elena López Herrera
Asesora

Tesis presentada a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
para optar el Grado Académico de **Doctora en Ciencias Ambientales**

Aprobado por:



Dr. César García Espinoza
Presidente



Dr. Horacio de la Cruz Silva
Secretario



Dr. Walter Morales Uchofen
Vocal

Lambayeque, 2022

Acta de sustentación

| | | | |
|--|--|---------------------|-----------|
|  UNPRG <small>UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO</small> | ESCUELA DE POSGRADO <i>M.Sc. Francis Villena Rodríguez</i> | Versión: | 01 |
| | | Fecha de Aprobación | 29-8-2020 |
| UNIDAD DE INVESTIGACION | FORMATO DE ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS | Pág. 1 de 3 | |

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS

Siendo las 10.00 a.m. del lunes 04 de julio de 2022, se dio inicio a la Sustentación Virtual de Tesis soportado por el sistema Google Meet, preparado y controlado por la Unidad de Tele Educación de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, con la participación en la Video Conferencia de los miembros del Jurado, nombrados con Resolución N°078-2020-EPG, de fecha 22 de enero de 2020, conformado por:

| | |
|--------------------------------|------------|
| Dr. CESAR GARCIA ESPINOZA | Presidente |
| Dr. HORACIO DE LA CRUZ SILVA | Secretario |
| Dr. WALTER MORALES UCHOFEN | Vocal |
| Dra. MARIA ELENA LOPEZ HERRERA | Asesora |

Para evaluar el informe de tesis de la tesista MARIA ASUNCION GONZALEZ ESQUECHE, candidata a optar el grado de DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES, con la tesis titulada "DETERMINACION DEL NIVEL DE RADON – 222 PROVENIENTE DE SUELOS EN EL DISTRITO DE LAMBAYEQUE AÑO 2019".

El Sr. Presidente, después de transmitir el saludo a todos los participantes en la Video Conferencia de la Sustentación Virtual ordenó la lectura de la Resolución N°680- 2022-EPG de fecha 28 de junio de 2022, que autoriza la Sustentación Virtual del Informe de tesis correspondiente, luego de lo cual autorizó a la candidata a efectuar la Sustentación Virtual, otorgándole 30 minutos de tiempo y autorizando también compartir su pantalla.

Culminada la exposición de la candidata, se procedió a la intervención de los miembros del jurado, exponiendo sus opiniones y observaciones correspondientes, posteriormente se realizaron las preguntas a la candidata.

Culminadas las preguntas y respuestas, el Sr. Presidente, autorizó el pase de los miembros del Jurado a la sala de video conferencia reservada para el debate sobre la Sustentación Virtual del Informe de tesis realizada por la candidata, evaluando en base a la rúbrica de sustentación y determinando el resultado total de la tesis con 18 puntos, equivalente a MUY BUENO, quedando la candidata apta para optar el Grado de DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES.

| | | |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|
| Formato : Físico/Digital | Ubicación : UI- EPG - UNPRG | Actualización: |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|

| | | | |
|--|--|---------------------|-----------|
|  UNPRG <small>UNIVERSIDAD NACIONAL POLITÉCNICA DEL PERÚ</small> | ESCUELA DE POSGRADO <small>M.Sc. Francis Villena Rodríguez</small> | Versión: | 01 |
| | | Fecha de Aprobación | 29-8-2020 |
| UNIDAD DE INVESTIGACION | FORMATO DE ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS | Pág. 2 de 3 | |

Se retornó a la Video Conferencia de Sustentación Virtual, se dio a conocer el resultado, dando lectura del acta y se culminó con los actos finales en la Video Conferencia de Sustentación Virtual.

Siendo las 11.30 a.m. se dio por concluido el acto de Sustentación Virtual.



Dr. CESAR GARCIA ESPINOZA
 PRESIDENTE



Dr. HORACIO DE LA CRUZ SILVA
 SECRETARIO



Dr. WALTER MORALES UCHOFEN
 VOCAL

Dra. MARIA ELENA LOPEZ HERRERA
 ASESORA



| | | |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|
| Formato : Físico/Digital | Ubicación : UI- EPG - UNPRG | Actualización: |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|

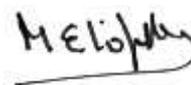
Declaración jurada de originalidad

Yo, **M.Sc. Maria A. Gonzalez Esqueche**; investigadora principal, y **Dra. María Elena López Herrera**, asesora del trabajo de investigación: “**Determinación del nivel de radón - 222 proveniente de suelos en el distrito de Lambayeque año 2019**”, declaro bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrará lo contrario, asumo responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiere lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 04 de julio de 2022.



M.Sc. Maria Asuncion Gonzalez Esqueche
Autora



Dra. Maria Elena Lopez Herrera
Asesora

Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios, a Javier, a mis hijos, a mis padres, a mis hermanos, a mi abuelita Santos, a mi profesor Jorge Salas Vidal y a Walter Valdera Sánchez. A Dios por sus bendiciones que cada día me regala, cuidándome, protegiéndome y dándome perseverancia para continuar, a Javier, por su apoyo incondicional en la culminación de mi Proyecto de Tesis, a mis hijos mis grandes motivos de vida por su amor y paciencia, a mis padres, por estar a mi lado siempre dándome amor y ánimo a seguir adelante para el logro de mis retos, a mis hermanos, por su amor, a mi abuelita Santos, quien desde el cielo se ha convertido en mi ángel que siempre me acompaña en todo mi camino, a mi profesor Jorge Salas Vidal, quien siempre está presente en mi corazón y desde el cielo sé que me guía y cuida para que todos mis metas se cumplan y a Walter Valdera Sánchez, mi gran amigo que siempre estará presente en mis pensamientos y en mi corazón.

A ellos este proyecto, que, sin ellos, no hubiese podido ser.

Agradecimiento

En primer lugar quiero agradecer a Dios por el camino de la felicidad hasta ahora, a Javier A. Castañeda Akamine, Docente de la UNPRG, mi asesora Dra. María Elena López Herrera, Dra. Patricia Pereyra Anaya, Docentes de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por su gran apoyo en lo intelectual, por su dedicación y su confianza en mí por el logro de mi proyecto de tesis.

A la Dra. Tarcila Hermelinda Cruz Sánchez, Dra. Inés Miriam Gárate Camacho, Dr. Juan Carlos González González y al Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres por su gran apoyo en lo profesional, por su amistad y por sus mensajes de aliento y fortaleza.

A los integrantes del Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares – GITHUNU-PUCP, por su apoyo incondicional

A mis profesores Docentes de la Escuela Profesional de Física - UNPRG, a quienes debo gran parte de mis conocimientos, al Sr. Sergio Alfaro por su apoyo brindado. Finalmente, al Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares – GITHUNU-PUCP, por proporcionar los detectores, por su asesoría y haberme brindado su laboratorio, sin cuyo apoyo no hubiera sido posible realizar este trabajo de investigación.

Índice

| | |
|--|------|
| Acta de sustentación | iii |
| Declaración jurada de originalidad..... | v |
| Dedicatoria | vi |
| Agradecimiento | vii |
| Índice | viii |
| Índice de figuras | x |
| Índice de tablas | xiii |
| Resumen | xvii |
| Abstract..... | xx |
| Introducción..... | 23 |
| Capítulo I: Análisis del objeto de estudio..... | 28 |
| 1.1. Ubicación..... | 28 |
| 1.2. Cómo surge el problema..... | 28 |
| 1.3. Cómo se manifiesta y qué características tiene el problema | 28 |
| 1.4. Descripción de la metodología | 29 |
| 1.4.1. Identificación de la zona de estudio..... | 29 |
| 1.4.2. Ubicación y recolección de detectores..... | 39 |
| 1.4.3. Baño Químico | 41 |
| 1.4.4. Lectura de los detectores..... | 44 |
| Capítulo II: Marco teórico | 47 |
| 2.1. Antecedentes del problema..... | 47 |
| 2.2. Marco teórico..... | 49 |
| 2.2.1. La radiactividad y desintegración nuclear | 49 |
| 2.2.2. Tipos de desintegraciones nucleares. fuentes radiactivas más comunes | 50 |
| 2.2.3. El radón..... | 53 |
| 2.2.4. Suelos..... | 60 |
| 2.2.5. Teoría de difusión de los gases en un medio | 70 |
| 2.2.6. Detectores de huellas nucleares de estado sólido | 73 |
| Capítulo III: Resultados de la investigación..... | 78 |
| 3.1. Resultados de la detección de radón ^{222}Rn suelos del distrito de Lambayeque | 78 |
| 3.2. Análisis e interpretación de los datos | 99 |
| Conclusiones..... | 110 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| Recomendaciones | 113 |
| Referencias Bibliográficas..... | 114 |
| Anexos | 120 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Mapa geográfico de la ciudad de Lambayeque [18] | 30 |
| Figura 2: Mapa Geomorfológico del Cuadrángulo de la Región de Lambayeque [19] | 31 |
| Figura 3: Mapa de peligros geológicos: Suelos Licuables. Instituto Nacional de Defensa Civil INDECI-PNUD-PER/01/51. [19] | 37 |
| Figura 4: Tipos de suelo de la ciudad de Lambayeque. Recuperado de Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Centro Peruano Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres. Estudios de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de Lambayeque (Provincia y Departamento de Lambayeque) 2018. [42]..... | 38 |
| Figura 5: Pozo cilíndrico de 2.0 m de profundidad | 39 |
| Figura 6: Detectores para la medición de concentración de radón 222. a) Esquema del monitor G2-PUCP b) Tapa interna de la cámara de difusión con el detector LR 115 c) Cámaras de difusión G2..... | 40 |
| Figura 7: Instalación de cámaras de difusión G2 en el interior y exterior de cada pozo..... | 40 |
| Figura 8: Detectores cubiertos con papel aluminio y envueltos en bolsa plástica en el momento de su retiro. | 41 |
| Figura 9: Detectores empacados en bolsas selladas antes del baño químico. | 42 |
| Figura 10: Equipo para el grabado de detectores LR 115. | 43 |
| Figura 11: Procedimiento de enjuague y secado de los detectores LR 115..... | 43 |
| Figura 12: Detectores preparados sobre el porta muestras en el Sistema Politrack de la PUCP | 44 |
| Figura 13: Lectura de los detectores mediante el Sistema Politrack de la PUCP..... | 46 |

| | |
|---|-----|
| Figura 14: Huellas obtenidas realizando mediciones de partículas alfa en uno de los pozos instalados en el Distrito de Lambayeque debido a la desintegración de radón 222 | 46 |
| Figura 15: Triángulo textural del suelo de acuerdo a la FAO y el Departamento. de Agricultura de USA. [10]..... | 61 |
| Figura 16: Transporte de radón en suelo. a) Esquema de porosidad y permeabilidad. b) Proceso de emanación y exhalación | 67 |
| Figura 17: Representación esquemática de la producción y migración de radón en el suelo y su entrada a una vivienda o edificio. [18] | 69 |
| Figura 18: El flujo de radón hacia el interior, debido a procesos convectivos, se establece cuando el gradiente de presiones es positivo ($PB > PA$) [15]..... | 73 |
| Figura 19: Formación de huellas en LR 115 tipo 2, en rangos de energía, luego de un baño químico. Recuperado de Kodalpha Radon- Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications. www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf [22] | 75 |
| Figura 20: Ubicación de los pozos en suelos urbanos de la ciudad de Lambayeque formando un polígono cerrado..... | 78 |
| Figura 21: Polígono de la zona de medición en los suelos de la ciudad de Lambayeque..... | 79 |
| Figura 22: Datos de variables meteorológicas durante el periodo 08/09/2021 al 08/04/2021.[44] | 80 |
| Figura 23: Concentración de radón 222 durante las estaciones del año. | 101 |
| Figura 24: Concentración de radón 222 durante el periodo de medición del pozo A | 102 |
| Figura 25: Concentración de radón 222 durante el periodo de medición del pozo B | 103 |
| Figura 26: Concentración de radón 222 durante el periodo de medición del pozo C | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27: Concentración de radón 222 durante el período de medición del pozo D | 105 |
| Figura 28: Valores promedio de la Concentración de radón 222 en cada pozo y por tipo de detector | 106 |
| Figura 29: Comparación entre las mediciones al interior de los pozos en suelos del distrito de Lambayeque..... | 107 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Características del suelo del Distrito de Lambayeque..... | 33 |
| Tabla 2: Tipos de la Clasificación de la Ciudad de Lambayeque..... | 34 |
| Tabla 3: Ubicación Geográfica de los pozos instalados en la zona urbana de la ciudad de Lambayeque | 36 |
| Tabla 4: Factores de ponderación de la radiación w_R para distintos tipos de radiación y energía..... | 58 |
| Tabla 5: Capacidad de almacenamiento de agua en suelos (cm de agua /30 cm de espesor de suelos)..... | 62 |
| Tabla 6: Actividades específicas de radionúclidos naturales en rocas y suelos (Bq/kg)..... | 63 |
| Tabla 7: Concentración de uranio en rocas | 66 |
| Tabla 8: Número de detectores instalados durante el estudio. | 79 |
| Tabla 9: Periodos de medición en los suelos del Distrito de Lambayeque | 80 |
| Tabla 10: Variables meteorológicas en el período de medición en la ciudad de Lambayeque | 80 |
| Tabla 11: Resultados de densidad de huellas y concentración de $Rn\ 222$ de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P1 (Abril 7- Abril 22-2019)..... | 81 |
| Tabla 12: Resultados de densidad de huellas y concentración de $Rn\ 222$ de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P2 (Abril 22 - Mayo 7- 2019)..... | 81 |
| Tabla 13: Resultados de densidad de huellas y concentración de $Rn\ 222$ de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P3 (Mayo 7- Mayo 22- 2019)..... | 82 |
| Tabla 14: Resultados de densidad de huellas y concentración de $Rn\ 222$ de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P4 (Mayo 22-Junio 6 -2019) | 82 |
| Tabla 15: Resultados de densidad de huellas y concentración de $Rn\ 222$ de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera | |

| | |
|---|----|
| representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P5 (Junio 6-Junio 21-2019)..... | 83 |
| Tabla 16: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P6 (Junio 21-Julio 8-2019)..... | 83 |
| Tabla 17: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P7 (Julio 8-Julio 23-2019)..... | 84 |
| Tabla 18: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P8 (Julio 23 - agosto 8 - 2019)..... | 84 |
| Tabla 19: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P9 (Agosto 8 – Agosto – 23 - 2019)..... | 85 |
| Tabla 20: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P10 (Agosto 23 - Setiembre 8 - 2019)..... | 85 |
| Tabla 21: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P11 (Setiembre 8 - Setiembre 23 - 2019)..... | 86 |
| Tabla 22: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque Período primavera P12 (Setiembre 23 - Octubre 8 - 2019)..... | 87 |
| Tabla 23: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P13 (Octubre 8 - Octubre 23 - 2019)..... | 88 |

| | |
|--|----|
| Tabla 24: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P14 (Octubre 23- Noviembre 7- 2019) | 89 |
| Tabla 25: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P15 (Noviembre 7 – Noviembre 22 - 2019)..... | 90 |
| Tabla 26: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P16 (Noviembre 22 - Diciembre 7 - 2019) | 91 |
| Tabla 27: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P17 (Diciembre 7 - Diciembre 22 - 2019) | 92 |
| Tabla 28: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P18 (Diciembre 22 - Enero 6 - 2019)..... | 93 |
| Tabla 29: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P19 (Enero 6 – Enero 21 - 2019)..... | 94 |
| Tabla 30: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P20 (Enero 21 - Febrero 5 - 2019) | 95 |
| Tabla 31: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P21 (Febrero 5 - Febrero 20 - 2019)..... | 96 |
| Tabla 32: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera | |

| | |
|---|-----|
| representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P22 (Febrero 20 - Marzo 7 - 2019)..... | 97 |
| Tabla 33: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P23 (Marzo 7 - Marzo 31 - 2019)..... | 98 |
| Tabla 34: Concentración de Radón 222 durante los periodos de medición | 99 |
| Tabla 35: Promedios parciales de la concentración de Rn 222 por estaciones de los pozos, durante los períodos de medición | 100 |
| Tabla 36: Promedios de la concentración de Rn 222 en los 4 pozos durante las estaciones de 2019..... | 102 |
| Tabla 37: Promedios de la concentración de Radón 222 en cada zona de medición durante los periodos de medición..... | 106 |
| Tabla 38: Correlación entre las mediciones de los 23 períodos de las cámaras de difusión G2 interior y exterior | 108 |
| Tabla 39: Correlación entre las mediciones de los períodos 11 al 23 de G2 interior y modo desnudo de LR -115 | 109 |

Resumen

La presente investigación tiene por objetivo la determinación del nivel de radón 222 proveniente de suelos en las zonas urbanas del distrito de Lambayeque en el año 2019. Se busca evaluar si la exhalación de radón desde los suelos, se encuentra dentro de rangos aceptables según recomendaciones de estudio de suelos dadas en la Norma E.050 y en la Norma E.80 del Reglamento Nacional de Edificaciones decreto supremo N° 011-2006–Vivienda [37] y en las Normas de seguridad del OIEA para la protección de personas y el medio ambiente [28], para ser considerados aptos para la construcción de viviendas en esas zonas. Esta investigación se basa en la medición de niveles de radón 222 en suelos del distrito de Lambayeque, durante las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno del año 2019. Las zonas donde se realizaron las mediciones fueron seleccionadas de acuerdo a su densidad demográfica, criterio establecido en el proyecto. Para determinar el nivel de exhalación de este gas, en el suelo se instalaron cuatro pozos en determinados puntos, los cuales permitieron realizar mediciones para cuantificar la variación de la concentración de radón en el interior de los mismos, en los periodos estacionales de estudio. Se perforaron cuatro pozos cilíndricos con profundidades de 2.0 m que fueron acondicionados para la medición del radón 222 proveniente desde el suelo. En cada pozo se instaló un tubo de PVC de longitud 2.5 m, diámetro 6 pulgadas y con la base abierta, cada tubo tiene una tapa de PVC en el extremo exterior. Los pozos se identificaron como A, B, C y D. Dentro de cada pozo se colocó desde el inicio del estudio dos cámaras de difusión tipo G2 externa e interna [34] y finalizando el invierno se añadió un detector LR115-tipo 2 en modo desnudo (bare mode). En la cámara de difusión G2 interior se colocó un detector LR-115 tipo 2; al exterior del pozo se colocó otra cámara de difusión G2 exterior conteniendo un detector LR115-tipo 2. Los detectores LR 115 fueron retirados periódicamente cada 15 días, luego

fueron revelados en el Laboratorio de Huellas Nucleares de PUCP- Lima. Según los resultados obtenidos se encuentra que:

1. La variación del radón 222 en el interior de los cuatro (04) pozos instalados en determinados puntos en el Distrito de Lambayeque, permite estudiar los cambios en la exhalación de este gas desde el suelo.

2. Encontrándose que en la parte interior del pozo C ubicado a $6^{\circ}42'5.02''S$ $79^{\circ}55'4.40''W$, el nivel de concentración medido en el G2 interior es más alto con respecto a los niveles de los demás pozos, cuyo valor encontrado en la cámara interior de difusión G2 durante la estación de verano fue de 1398.89 Bq/m^3 y el nivel medido con en el detector en modo desnudo (bare mode) fue de 2285.29 Bq/m^3 ; valores que superan los límites permisibles según recomendaciones de la OMS [24,29]. El pozo C está ubicada en una zona con suelo arcilloso, limoso de alta plasticidad o suelo fino, con una napa freática de 2.00 m

3. El pozo A ubicado a $6^{\circ}42'29''S$ $79^{\circ}54'16''W$ y el pozo B ubicado a $6^{\circ}42'26.38''S$ $79^{\circ}54'23.71''W$ son los que presentaron menor concentración promedia de radón 222 medida en la cámara de difusión G2, en la estación de verano. Los valores de concentración promedia encontrados en el pozo A fue de 113.16 Bq/m^3 y en el pozo B fue de 123.57 Bq/m^3 . Los pozos A y B están localizados en suelos de arena fina, arena arcillosa o arena limosa, con una napa freática entre 2m a 1.72 m.

4. El pozo D, ubicado a $6^{\circ}42'28.24''S$ $79^{\circ}54'48.62''W$, presenta una concentración medida en la estación de verano con el G2 interior de 266.79 Bq/m^3 y la concentración medida en modo desnudo (bare mode) fue de 423.29 Bq/m^3 . El pozo D está ubicado en un suelo arenoso pobremente gradado de material granular y con napa freática de 2.00 m

Palabras Claves: Radón 222, suelos, LR-115 Tipo 2, Exhalación, Contaminación

Ambiental

Abstract

The objective of this research is to determine the level of radon 222 from soils in urban areas of the district of Lambayeque in 2019. The aim is to evaluate if the radon exhalation from soils is within acceptable ranges according to soil study recommendations given in Standard E.050 and Standard E.80 of the National Building Regulations, supreme decree N° 011-2006- Housing [37] and in the IAEA Safety Standards for the protection of people and the environment [28], to be considered suitable for the construction of housing in those areas. This research is based on the measurement of radon 222 levels in soils of the Lambayeque district, during the spring, summer, autumn and winter seasons of the year 2019. The areas where the measurements were made were selected according to their demographic density, criteria established in the project. To determine the level of exhalation of this gas in the soil, four wells were installed at certain points, which allowed measurements to be made to quantify the variation of the radon concentration in the interior of these, in the seasonal periods of study. Four cylindrical wells with depths of 2.0 m were drilled and conditioned for the measurement of radon 222 from the soil. A 2.5 m long, 6 inch diameter, open-ended PVC pipe was installed in each well, with each pipe having a PVC cap on the outer end. The wells were identified as A, B, C and D. From the beginning of the study, two external and internal type G2 [34] diffusion chambers were placed inside each well, and at the end of the winter an LR115 - type 2 detector was added in bare mode. Two LR-115 type 2 detectors were placed in the well, one in the interior G2 diffusion chamber and another one in the exterior G2 diffusion chamber. The LR 115 detectors were removed periodically every 15 days, then they were analyzed at Laboratorio de Huellas Nucleares de PUCP - Lima. According to the results obtained it is found that:

1. The variation of radon 222 inside the four (04) wells installed at certain points in the District of Lambayeque, allows studying the changes in the exhalation of this gas from the ground.
2. It was found that in the interior part of well C located at $6^{\circ}42'5.02''\text{S}$ $79^{\circ}55'4.40''\text{W}$, the concentration level measured in the interior G2 is higher with respect to the levels of the other wells, whose value found during the summer season was 1398.89 Bq/m^3 and the level measured in the detector in bare mode was 2285.29 Bq/m^3 , values that exceed the permissible limits according to WHO recommendations [2,3]. Well C is in an area with clayey soil, silty soil of high plasticity or fine soil, with a water table of 2.00 m.
3. Well A located at $6^{\circ}42'29''\text{S}$ $79^{\circ}54'16''\text{W}$ and Well B located at $6^{\circ}42'26.38''\text{S}$ $79^{\circ}54'23.71''\text{W}$ are the ones that presented the lowest average concentration of radon 222 measured in the diffusion chamber G2, in the summer season. The average concentration values found in well A was 113.16 Bq/m^3 and in well B was 123.57 Bq/m^3 . Wells A and B are located in soils of fine sand, clayey sand or silty sand, with a water table between 2m to 1.72 m.
4. Well D, located at $6^{\circ}42'28.24''\text{S}$ $79^{\circ}54'48.62''\text{W}$, has a concentration measured in the summer season with the indoor G2 of 266.79 Bq/m^3 and the concentration measured in bare mode was 423.29 Bq/m^3 . Well D is located in a poorly graded sandy soil of granular material and with a water table of 2.00 m.

Keywords: Radon 222, soils, LR 115 Type 2, exhalation, environmental contamination.

Introducción

El radón es un radioisótopo gaseoso de origen natural. La radiactividad es un fenómeno que siempre ha estado presente en la Tierra. El radón 222 es uno de los elementos de la larga cadena de desintegración radiactiva del uranio 238, es el isótopo más común; el radón 220 o Thoron, es parte de la serie de desintegración del torio 232 y el radón 219 (actinon) proviene de la desintegración del uranio 235. Los elementos anteriores a cada isótopo del radón en la cadena respectiva, son relativamente de larga duración y de menor preocupación por exposición a su radiación por ser sólidos, pero el radón y sus isótopos son de corta duración y gaseosos, por lo tanto, más peligrosos. El radón 222 es un gas radiactivo que no tiene color ni olor, emite partículas alfa ionizantes al descomponerse. El radón es de origen natural procedente de la desintegración radiactiva de pequeñas cantidades de uranio presentes en los suelos, el radón es un elemento que se encuentra en casi todos los tipos de suelo, incluso en la roca y el agua, la Organización Mundial de la Salud lo ha catalogado como el principal responsable en la incidencia de cáncer de pulmón en personas no fumadoras. (OMS, 2016).[30]

Al construir un edificio o una casa, no se trata simplemente de una elección del terreno y de contar con los materiales de construcción, sino hay que hacer un estudio de suelos, que no debe ser ignorado antes de construir cualquier vivienda o recinto habitable. Un estudio de suelos es lo que nos permite conocer sus características físicas y geológicas, desde la secuencia litológica, las diferentes capas y sus espesores, la profundidad del nivel del agua subterránea, la capacidad de resistencia mecánica de un suelo o de las rocas, etc. [29]. También es recomendable hacer un estudio de la salubridad del suelo en relación al gas radiactivo radón 222 que afecta principalmente a la primera planta de una vivienda, es por ello que este trabajo de investigación estudia su procedencia desde el subsuelo [25].

Previamente a esta investigación, se realizó un estudio del nivel de concentración de radón 222 en viviendas unifamiliares en la provincia de Lambayeque, encontrando como resultado una concentración promedio de 367 Bq/m^3 en el distrito de Lambayeque [16,17], el cual es un nivel promedio mayor a lo recomendado por el Instituto de Energía nuclear (IPEN) en el reglamento de protección radiológica D:S 009-97 EM, anexo IV, respecto al radón 222 en viviendas y al no registrarse investigaciones de mediciones de este gas en suelos en el distrito de Lambayeque, se pretende contribuir con este estudio de la medición de radón 222 en suelos que sirva como guía de salubridad para futuras construcciones o mejoras en la ya existentes para evitar la acumulación de este gas en determinadas zonas o recintos.

La principal característica que hace importante la medición de este radioisótopo radón 222 (Rn 222), es que el gas radón es un elemento que se presenta en la naturaleza por la desintegración del radio contenido en los suelos terrestres, con una vida media del orden de 3,8 días [1]. Este gas es capaz de viajar entre los poros del terreno y penetrar en los edificios, donde podrá aumentar su concentración y constituir un riesgo para la salud de sus ocupantes por la inhalación del mismo. Al ser descendiente del radio 226 , presente en los minerales del subsuelo que son sometidos a un fenómeno de transporte de altas concentraciones a bajas concentraciones, se difunde a través del subsuelo hasta alcanzar la superficie, exhalando hacia la atmósfera y concentrándose en lugares cerrados (principalmente en lugares con poca ventilación), viviendas y lugares de trabajo haciéndose parte del aire que respiramos [28].

Al respecto Vilcapoma, L (2019) en la tesis "*Medición de radón en suelos de la ciudad de Lima durante el periodo 2016 – 2017*" señala que el valor promedio de la concentración de radón 222 en los suelos de la ciudad de Lima está en correspondencia con

los valores relativamente bajos de radón encontrados en las viviendas y encuentra que los valores altos de concentración de este gas durante los meses de octubre y noviembre del 2017, aparentemente se relacionan con los sismos ocurridos en Lima en ese periodo de observación; así también señala que las concentraciones más bajas del gas radón se obtienen en suelos cuyos conglomerados corresponden a la erosión de los cerros donde predominan rocas intrusivas. [43]

Torres Montalvo, J (2018) en su tesis “Estudio de radón 222 y su progenie proveniente del suelo en la estación meteorológica Hipólito Unanue- PUCP” demuestra que la humedad del suelo produce saturación en el aire encerrado en el pozo y que la humedad es un parámetro influyente en el comportamiento de la exhalación y difusión de radón. [41]

Gómez Quiñones, I. (2016) en su tesis “Flujo de radón en suelo para uso habitacional en la ciudad de Fresnillo, Zacatecas” señala el registro de $14.42 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h}$ como máximo valor, obteniéndose valores más altos en suelos Xerosol y Rendzina, y roca subyacente del tipo conglomerado polimíctico. En promedio, la exhalación fue menor en suelos litosol y roca basáltica y mayor en roca sedimentaria con glomerado polimíctico y roca volcánica riolita. [14]

Alonso Hernández, H. (2015) en su tesis “El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales” señala que la distribución de los valores de radón obtenidos en las campañas de medida mantiene una estrecha relación con las formaciones geológicas de las islas, así como con los mapas de tasa de exposición gamma a un metro del suelo y mapa de radioisótopos superficiales de cada isla. [3]

Efstratios G. Vogiannis and Dimitrios Nikolopoulos (2014), en el artículo “Fuentes de radón y riesgo asociado en términos de exposición y dosis”, señala que el radón concierne a la comunidad científica internacional desde principios del siglo XX, inicialmente como emanación del radio y casi en la segunda mitad del siglo como un peligro significativo para la salud humana. Hoy en día, hay una evidencia concreta de que el radón y su progenie pueden causar cáncer de pulmón. [8]

El problema científico que se plantea en esta tesis es: ¿Los niveles de radón 222 proveniente de los suelos en las zonas del distrito de Lambayeque se encuentran dentro de los límites recomendables para ser considerados aptos para la construcción de viviendas?

La hipótesis queda definida como: Aplicando la técnica de huellas nucleares en detectores de Nitrato de Celulosa LR-115 tipo 2 se puede determinar el nivel de radón 222 proveniente de suelos de zonas urbanas en el distrito de Lambayeque.

Siendo los objetivos siguientes:

General:

Determinar si el nivel de radón 222 proveniente de suelos en las zonas urbanas del distrito de Lambayeque, se encuentran dentro de los límites recomendables para ser considerados aptos para la construcción de viviendas.

Específicos:

1. Determinar la variación de la concentración de radón en el interior de los pozos instalados en determinados puntos de medición que nos permitan estudiar el proceso de exhalación de este gas desde el suelo en los periodos de estudios.

2. Identificar las zonas que sobrepasan los niveles de concentración de radón 222 máximos en el interior recomendables.
3. Gestionar con ayuda de los agentes sociales pertinentes la mitigación de los excesos de gas radón 222 provenientes de suelos en las viviendas asociadas a este estudio.

Esta investigación contribuirá a establecer que al construir un edificio o una casa no es simplemente una cuestión de escoger el terreno, sino que se debe realizar un estudio de suelos que no debe ser ignorado, dicho estudio permitirá conocer además de las características físicas y geológicas, la exhalación del gas radón. Se busca generar una señal de advertencia a la población en cuyos suelos se encuentran niveles de gas radón 222 por encima de lo recomendado con la finalidad de mitigar su presencia en edificios o viviendas.

Capítulo I: Análisis del objeto de estudio

1.1. Ubicación

El distrito de Lambayeque es la capital de la Provincia de Lambayeque. Se encuentra ubicada en el norte de la costa peruana, aproximadamente entre las coordenadas geográficas 5 28'36" y 7 14'37" de latitud Sur y 79 41'30" y 80 37'23" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, específicamente, en el noroeste y este de la región Lambayeque; al lado izquierdo del río Lambayeque a una altura de 18 m.s.n. y a 11,4 Km. de la ciudad de Chiclayo.[26]

1.2. Cómo surge el problema

Al realizar estudios de la concentración de radón 222 en viviendas unifamiliares del distrito de Lambayeque, se obtuvo como resultado que la ciudad de Lambayeque registró una concentración promedio de 367 Bq/m³ en el periodo de estudio, el cual excedía el límite máximo recomendable indicado de 200 Bq/m³ [16,17], este resultado motivó que se plantee la investigación del nivel de radón 222 provenientes de suelos urbanos en el distrito de Lambayeque, a fin de correlacionar los resultados con las altas concentraciones encontradas en las viviendas y sugerir protocolos de mitigación a fin de prevenir riesgos adicionales en la salud de sus pobladores.

1.3. Cómo se manifiesta y qué características tiene el problema

No se han encontrado antecedentes de este tipo de estudios en suelos en el distrito de Lambayeque, motivo por el cual se implementa un método debidamente sustentado para medir la concentración de este gas radiactivo en suelos del distrito de

Lambayeque, y determinar si la exhalación de este gas se encuentra entre los valores recomendados por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) [29], implementando así una serie de procedimientos que implica la selección, ubicación, recolección y procesamiento de los detectores destinados para este tipo de investigación.

1.4. Descripción de la metodología

Para la selección, evaluación de los detectores del presente trabajo de investigación, así como el uso de los materiales y equipos, se contó con el apoyo del Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP, lo cual garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos para la medición de radón 222 en el presente trabajo.

1.4.1. Identificación de la zona de estudio

El distrito de Lambayeque es uno de los doce distritos de la Provincia de Lambayeque, ubicada en el Departamento de Lambayeque, en el norte de Perú. Abarca una superficie de $328,00 \text{ Km}^2$, una altitud media 20 m.s.n.m. ; con una población de $77\,234 \text{ hab.}$ y cuya densidad poblacional es de $235,5 \text{ hab/km}^2$. [7]

Presenta un clima con escasas precipitaciones en condiciones normales, condicionado por el carácter semidesértico y desértico de la angosta franja costera, por ello el clima de la zona se puede clasificar como desértico subtropical árido, influenciando directamente por la corriente fría marina de Humboldt, que actúa como elemento regulador de los fenómenos meteorológicos [38].

La temperatura en verano fluctúa según datos de la Estación Reque año 2019, entre 12.0°C (Dic.) y 32.2°C (Feb.), siendo la temperatura máxima anual de 32.2°C, la temperatura mínima anual de 12.0°C, en el mes de setiembre con una temperatura media anual de 22°C.

La ciudad de Lambayeque presenta una topografía plana en la parte correspondiente al casco urbano. En la parte Sur ésta presenta elevaciones y en la parte Sur Oeste está rodeada por dunas de arena.



Figura 1: Mapa geográfico de la ciudad de Lambayeque [18]

Según la geomorfología de la zona, la ciudad de Lambayeque se encuentra en la eratema cenozoico, del sistema cuaternario y de la serie reciente. Sus unidades estratigráficas son: depósitos fluviales, eólicos y aluviales; depósitos lacustres y condón literal, y depósitos eólicos con rocas intrusivas. Está ubicada en el cuadrante 32 de la Carta Geológica Nacional,

publicada por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, del Sector Energía y Minas del Perú. [19]



Figura 2: Mapa Geomorfológico del Cuadrángulo de la Región de Lambayeque [19]

De acuerdo a estudios geológicos, la faja costera de la región Lambayeque en épocas remotas posiblemente fue fondo marino de agua poco profunda. Los ríos la Leche y Reque, durante sus cursos han rellenado esta parte del Océano Pacífico. Los vientos también han aportado en el relleno de la zona transportando materiales finos. Posteriormente los primeros grupos humanos que llegaron a esta región aprovecharon las aguas de los ríos y la

poblaron. Y así a través de los siglos, se habría formado las capas subyacentes y una costa de suelo apta para la agricultura.

Lambayeque está al Nor-Oeste de la ciudad de Chiclayo, se ubica dentro de la parte baja de la Cuenca del Chancay Lambayeque, predomina en su área de influencia la unidad estratigráfica de depósitos aluviales “Qr – al”, notándose la presencia de depósitos eólicos “Qr – e”, en la parte Sur de la ciudad conocidos como “Montes de la Virgen” y por el Oeste “Las Dunas” del Pueblo Joven San Martín, de la serie reciente, sistema cuaternario, Eratema Cenozoico [19].

En el distrito de Lambayeque predominan suelos de origen aluviales y profundos, con aproximadamente más de 15,000 hectáreas de tierras agrícolas bajo riego y más de 17,000 no agrícolas. El perfil existente corresponde al de texturas media que descansan sobre texturas pesadas y presenta las siguientes características:

De textura franco (Fco) o franco arenoso (Fco Ao) o franco limoso (Fco Lo); de 0.0 a 0.60 m, no posee modificador textural; con color gris oscuro o marrón grisáceo muy oscuro; con composición granular; con consistencia friable; y presencia regular raicilla y ausente concrecencias [38]

De textura Arcilla (Arc) o franco arcilloso (Fco Arc) o franco arcillo limoso (Fco Arc Lo) o franco arcillo arenoso (Fco Arc Ao), de 0.60 a 1.60 m, no posee modificador textural; con color marrón o marrón oscuro a marrón gris oscuro; con composición granular; con consistencia friable; y presencia regular de raicillas; ausente concrecencias [38].

Tabla 1:
Características del suelo del Distrito de Lambayeque

| Pendiente | De 0% a 10% |
|---------------------------|------------------------------|
| Pedregosidad | Sin Pedregosidad |
| Salinidad | De 0.118 mmhs. a 211.5 mmhs. |
| Micro relieve | Plano |
| pH | De 4.6% a 94.1% |
| Sodio intercambiable | De 0.05% a 9.99% |
| % de saturación | De 4.6% a 94.1% |
| Humedad equivalente | De 2.84% a 51.00% |
| Coefficiente de marchitez | De 2.4% a 21.9% |
| C.LC. | De 3.16 me/l a 62.87 me/l |

Nota: Recuperado de Planeamiento Estratégico. Desarrollo de un diagnóstico. Sánchez, S 2013. [38]

Causas de la Salinidad del suelo Lambayecano

De acuerdo a las investigaciones realizadas, el problema de la salinidad en los suelos del distrito de Lambayeque aumenta anualmente, siendo el problema principal la salinización de tierras de cultivo, el excesivo uso de agua en cultivo de caña de azúcar y arroz. Las principales causas del aumento de salinización de suelos serían:

- Transporte de parte alta del valle hacia parte baja del mismo
- Excesivos volúmenes de aplicación de agua de riego (cultivo de arroz)
- Salinidad natural de algunos suelos dentro del valle
- Elevado nivel freático, sales del suelo suben a superficie por ascenso capilar
- Insuficiente drenaje parcelario, no permite adecuado lavado de sales
- Falta de mantenimiento de drenes colectores y troncales a nivel de valle.

Como resultado de esos estudios, se elaboraron Mapas de:

Expansibilidad de suelos y Microzonificación Geotécnica de la ciudad de Lambayeque, el cual se obtuvo la clasificación de los Suelos de la Ciudad de Lambayeque, en el que se ha determinado cuatro tipos que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2:
Tipos de la Clasificación de la Ciudad de Lambayeque

| SECTORES | TIPO DE SUELO |
|---|--|
| <p>SECTOR I:</p> <p>En este sector corresponde la Arena pobremente gradada, siendo el material granular, cuyo porcentaje que pasa la Malla N°200 es menor al 5%. La capacidad portante del terreno, con un factor de seguridad 3, varía entre 0.50 a 1.00 kg/cm²</p> | <p>Este tipo de suelo se encuentra en gran parte de la ciudad de Lambayeque, y zonas de expansión urbana, utilizadas actualmente como áreas agrícolas, encontrándose: Al centro de la ciudad en su antigua cosco urbano, etc. Otro sector con estas características del suelo, ubicado al oeste de la ciudad de Lambayeque, A:A:H:H: Las Dunas, Urbanización Guardia Republicana, sector donde se encuentra la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, etc.</p> |
| <p>SECTOR II:</p> <p>En este sector corresponde estratos de suelos de arena con finos, arenas arcillosas ó arenas limosas, cuyo porcentaje que pasa la Malla N° 200 es mayor al 12%, el porcentaje de material granular que pasa la malla N°4 es mayor al 50 Debido a la presencia de finos, tiene mayor capacidad de soportar las cargas que las Arenas puras. La Capacidad Portante varía entre 0.70 a 0.90 kg/cm².</p> | <p>Observándose este tipo de suelo en gran parte de la ciudad de Lambayeque y zonas de expansión urbana, actualmente utilizadas como áreas agrícolas, encontrándose sectores al norte de la ciudad de Lambayeque carretera a Piura, también al nor-oeste y al sur- oeste, destacándose las calles Demetrio Acosta, 28 de Julio y Juan XXII</p> |

SECTOR III:

Corresponde a suelos finos. Arcillas y Limos con poca plasticidad. El límite líquido es menor al 50 %. El porcentaje que pasa la Malla Nro. 200 es mayor al 50%. El porcentaje que pasa la Malla N° 4 es mayor al 50 %. Los suelos tienen mediana a baja expansibilidad. La capacidad portante del suelo con un factor de seguridad de 3, varía entre 0.70 a 0.80 kg/cm².

Presentándose este tipo de suelo en dos grupos al sector Este de la ciudad de Lambayeque, en sus zona urbana y en las áreas actualmente destinadas para la agricultura

SECTOR IV:

Comprende a las Arcillas y Limos de Alta Plasticidad. El Suelo es fino. El límite líquido es mayor al 50 %. El porcentaje que pasa la Malla N° 200 es mayor al 50 %. El porcentaje que pasa la Malla No. 4 es mayor al 50 %. Los Suelos tienen Alta Plasticidad. La Capacidad Portante para un Factor de Seguridad de 3, varía entre 0.80 a 0.90 kg/cm².

Presentándose este tipo de suelo al Norte de la ciudad de Lambayeque, es decir al Nor – Este y al Nor - Oeste, en áreas actualmente destinadas para la agricultura.

Fuente: Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI, 2003 [19]

La cantidad mínima de suelos a monitorear en el Distrito de Lambayeque están basadas a su densidad demográfica, criterio establecido para el proyecto, haciendo un total de cuatro puntos de medida como mínimo, mostrado en la siguiente Tabla:

Tabla 3:
Ubicación Geográfica de los pozos instalados en la zona urbana de la ciudad de Lambayeque

| Nombre | Lugar geográfico | Coordenadas GPS | Características generales de suelos |
|---------------|--|----------------------------|---|
| POZO A | Latitud: 6°42'29"S Longitud 79°54'16"W | -6.7080556 -79.9044444 | Arena con finos, arenas arcillosas o arenas limosas |
| POZO B | Latitud: 6°42'26.38"S Longitud: 79°54'23.71"W | -6.7073278 -79.9065861 | Arena con finos, arenas arcillosas o arenas limosas |
| POZO C | Latitud: 6°42'5.02"S Longitud: 79°55'4.40"S | -6.7013944 -79.9178889 | Arcillas y Limoso de alta plasticidad. Suelo fino |
| POZO D | Latitud: 6°42'28.24"S Longitud: 79°54'48.62"O | -6.7078444 -79.9135056 | Arena pobremente gradada, material granular |

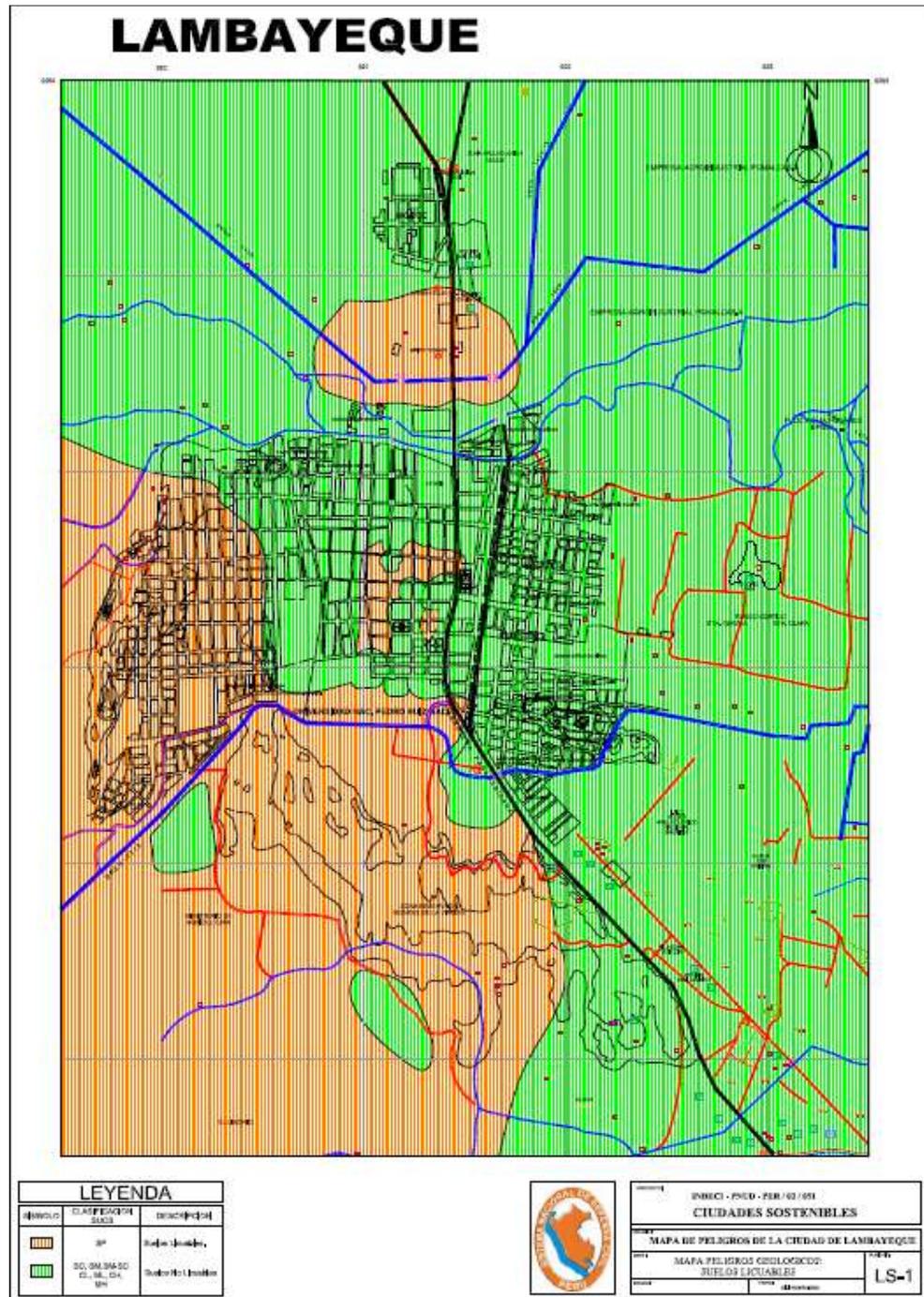


Figura 3: Mapa de peligros geológicos: Suelos Licuables. Instituto Nacional de Defensa Civil INDECI-PNUD-PER/01/51. [19]

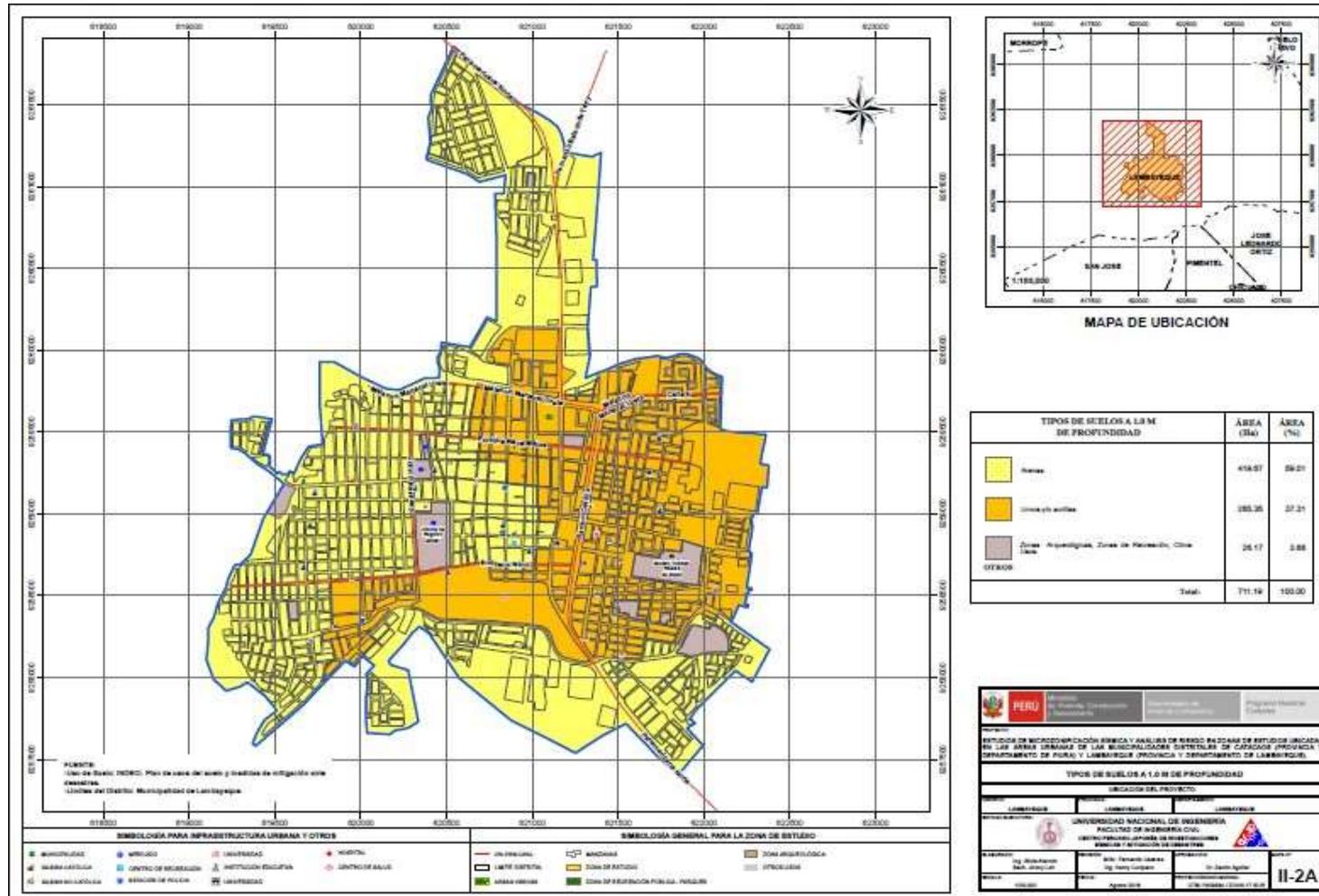


Figura 4: Tipos de suelo de la ciudad de Lambayeque. Recuperado de Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Centro Peruano Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres. Estudios de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de Lambayeque (Provincia y Departamento de Lambayeque) 2018. [42]

1.4.2. Ubicación y recolección de detectores

Para la ubicación y recolección de los detectores se consideró el siguiente procedimiento:

1. Se perforaron cuatro (04) pozos cilíndricos cavados en el suelo a una profundidad de 2.0, 1,75. 1.86 y 2.0 m, diseñados para el estudio del radón en suelos, en el cual en su interior se colocaron tubos PVC con la base abierta de longitudes 2,5 m, cada tubo tiene una tapa en el extremo exterior.



Figura 5: Pozo cilíndrico de 2.0 m de profundidad

Los pozos se ubicaron en 04 puntos en suelos de las zonas urbanas del distrito de Lambayeque los cuatro pozos A, B, C y D sin ningún riego periódico. Estos están identificados en la Tabla 1.

2. Para efectuar las mediciones de Rn 222 en suelos, en cada tubo se colocaron detectores LR 115 Tipo 2 al interior de la cámara de difusión G2, junto a

ella se colocó un detector en modo desnudo y al exterior del tubo se colocó otra cámara de difusión G2 con un detector LR115-2 al interior.

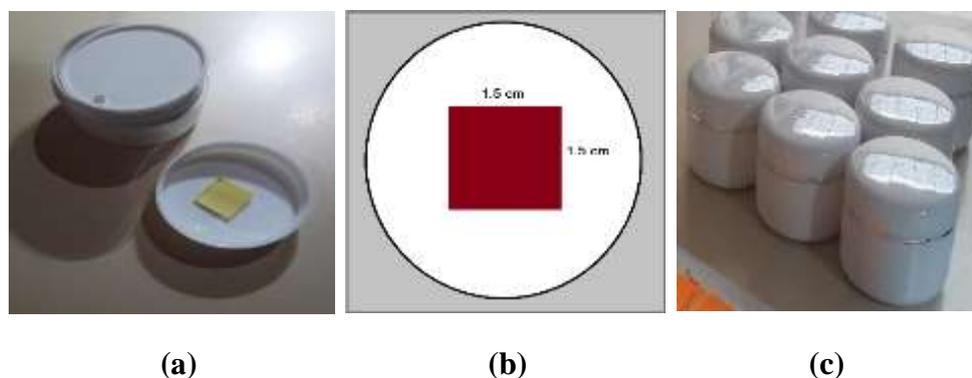


Figura 6: Detectores para la medición de concentración de radón 222 . a) Esquema del monitor G2-PUCP b) Tapa interna de la cámara de difusión con el detector LR 115 c) Cámaras de difusión G2

Los detectores son polímeros LR115 tipo 2 usados como detectores de trazas nucleares de estado sólido SSNTD (Solid Sensor Nuclear Track Detector) de $112\mu\text{m}$ de espesor, formados por una capa de nitrocelulosa de alta sensibilidad de $12\mu\text{m}$ depositada sobre un soporte de poliéster de $100\mu\text{m}$. Los detectores de LR115 tipo 2 son capaces de registrar el paso de partículas alfa de bajas energías comprendidas en el rango de $0,2\text{MeV}$ a $4,5\text{MeV}$. [21]



Figura 7: Instalación de cámaras de difusión G2 en el interior y exterior de cada pozo.

Los detectores fueron retirados periódicamente cada 15 días y guardados dentro de un sobre, anotándose la fecha de retiro. Se cubrieron los detectores con papel de aluminio y depositados en bolsas plásticas para evitar que sigan registrando la radiación natural ambiental, como se muestra en la figura 8.



Figura 8: Detectores cubiertos con papel aluminio y envueltos en bolsa plástica en el momento de su retiro.

3. Luego, los detectores embalados fueron remitidos al Laboratorio de Huellas Nucleares de la Sección Física de Pontificia Universidad Católica del Perú, para su posterior grabado químico y análisis, como se detalla posteriormente.

1.4.3. Baño Químico

En el Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP se desempacan los sensores para proceder a su limpieza y posteriormente ser sometidos al proceso de revelado o baño químico para lograr que las huellas latentes en el detector puedan ser visibles al microscopio óptico; Cada uno de los detectores lleva un código ya establecido de acuerdo al lugar donde fue colocado.

El baño químico se realiza en una solución de NaOH 2,5N. La estabilidad de la solución, el control de los parámetros críticos de temperatura, concentración de la solución y el tiempo de grabado son parámetros básicos para obtener resultados fiables y precisos.



Figura 9: Detectores empacados en bolsas selladas antes del baño químico.

El proceso de grabado se realiza en un ambiente a temperatura estable de 20°C, se coloca el litro de solución NaOH a 2,5 N en cada contenedor de acero inoxidable, el tanque debe ser llenado con 10 litros de agua (se debe superar la altura del termostato) a una temperatura de 61.1°C, encendiéndose luego la bomba de agitación y el termostato. Se coloca los contenedores dentro del tanque, luego los termómetros del sistema RELES se ubican y se cierra con sus respectivas tapas. Finalmente se coloca la tapa de acrílico del tanque para poder así evitar la evaporación del agua, la estabilización se debe registrar en los termómetros en 60°C (2 h 30 min. después). En el sistema de resorte se registra la ubicación de cada detector, al registrar los 60°C, se retiran los termómetros, colocándose en el arreglo de resortes con los detectores y se cierra por 90 min.



Figura 10: Equipo para el grabado de detectores LR 115.

Luego de haber sometido los detectores al grabado químico durante 90min, estos se sumergen en agua destilada, para detener la corrosión del nitrato de celulosa durante 30min, luego se enjuagan una vez más con agua destilada a chorros varias veces, este proceso es necesario para neutralizar el polímero, finalmente se deja secar por un tiempo de 24 horas.



Figura 11: Procedimiento de enjuague y secado de los detectores LR 115.

1.4.4. Lectura de los detectores

Una vez transcurrido el tiempo de secado, se procede a realizar la lectura de trazas registradas por los detectores LR 115 tipo 2. Para la lectura de los detectores se utilizó el equipo Politrack, este equipo es un sistema automático para detectar trazas en los detectores LR115 tipo 2 causadas por las partículas alfa provenientes del radón, está equipado con una cámara CCD acoplado con un microscopio, dispositivo de carga acoplada que escanea la superficie del detector LR115 tipo 2. Las imágenes captadas por la cámara son transmitidas a una PC. La configuración para realizar la lectura en los detectores LR115 tipo 2 presenta un área de lectura de aproximadamente 06 mm^2 . Este sistema permite la posibilidad de escanear un solo detector o varios detectores en secuencia. El Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP cuenta con ese equipo desde el año 2016 como parte del Proyecto 120- PNICP-IAP-2015, siendo el único en todo el Perú [17]



Figura 12: Detectores preparados sobre el porta muestras en el Sistema Politrack de la PUCP.

El equipo “Politrack” incluye una cámara, dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés), que escanea la superficie del SSNTD. Para el análisis de trazas por radón en LR 115, el microscopio tiene un aumento 4x + pinhole. También contiene un microscopio acoplado directamente a la cámara CCD que contiene un detector monocromático de 1/3 CCD de 8 bits, con resolución de 1280x960 píxeles, siendo transmitidas las imágenes captadas por la cámara a la PC. La configuración para trazas de partículas alfa del radón en LR 115 presenta un área de lectura de aproximadamente 0,6 mm². El software controla el escaneo XY, realizándose el enfoque automáticamente, detectando así las trazas en cada campo de lectura. Finalizando se puede guardar los datos de las lecturas y revisado en la plantilla personalizada de Excel. También se almacena archivos “trk” en los cuales se almacenan los parámetros geométricos de las trazas (diámetro mayor (μm), diámetro menor (μm), área (μm^2) y redondez de la traza), su ubicación XY en el detector y su correspondiente campo de lectura.

Si bien este equipo puede dar los resultados de concentración de radón de cada detector en relación con la densidad de trazas y otros parámetros propios del sistema (Etching parameter, factor beta), en este trabajo no se determinará la concentración por ese método.



Figura 13: Lectura de los detectores mediante el Sistema Politrack de la PUCP.

En la siguiente Figura 14, se muestra una de las huellas registradas por el microscopio, donde se puede observar las huellas claramente, son puntos luminosos color amarillo, ya que la luz ha traspasado completamente el detector, cada huella representa el registro de una partícula alfa en el detector; estos son los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

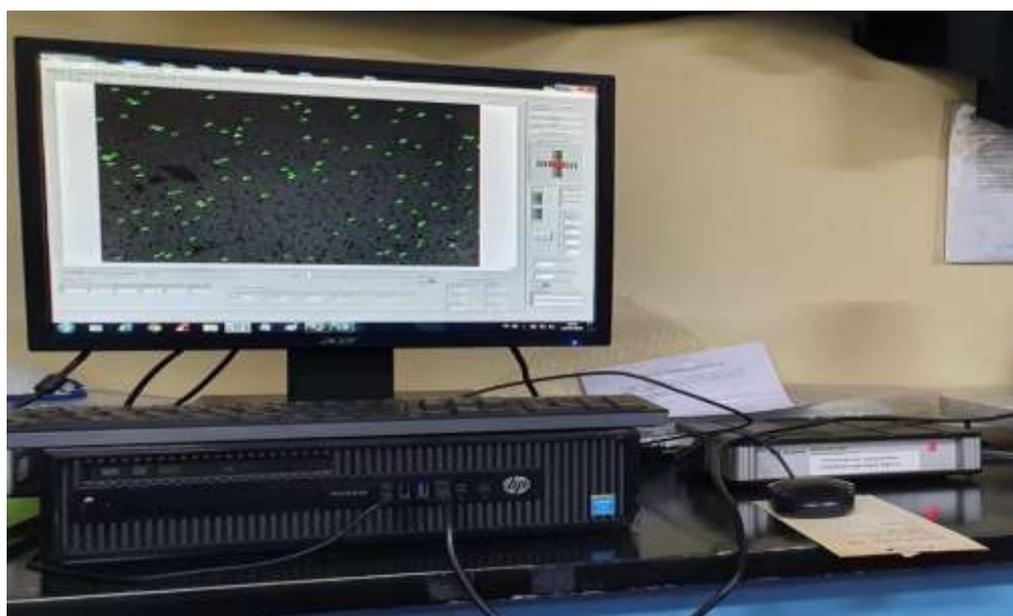


Figura 14: Huellas obtenidas realizando mediciones de partículas alfa en uno de los pozos instalados en el Distrito de Lambayeque debido a la desintegración de radón 222

Capítulo II: Marco teórico

2.1. Antecedentes del problema

González, M et al, (2020) en el artículo “Medición de radón-222 en interiores de las viviendas de la Provincia de Lambayeque, Perú utilizando detectores LR 115 [14], señala que el 15% de las viviendas estudiadas superaron los 200 Bq/m³ de concentración de radón Rn 222, registrando en los distritos de Lambayeque, Túcume y Chóchope, concentraciones de (367 ± 32) Bq/m³, (314 ± 25) Bq/m³ y (260 ± 22) Bq/m³ de radón respectivamente, diferenciándose de otros tipos de viviendas, en aspectos como la antigüedad de construcción, material de construcción utilizado, tipo de piso y además por ser ambientes de muy poca ventilación.

Vilcapoma, L (2019) en su tesis “Medición de radón en suelos de la ciudad de Lima durante el periodo 2016 – 2017” señala que el valor promedio de la concentración de radón 222 en los suelos de la ciudad de Lima está en correspondencia con los valores relativamente bajos de radón encontrados en las viviendas y los altos valores de concentración de este gas durante los meses de octubre y noviembre del 2017, aparentemente relacionados con los sismos ocurridos en Lima en ese periodo de observación, así como las concentraciones más bajas del gas radón se encuentran en suelos cuyos conglomerados corresponden a la erosión de los cerros donde predominan rocas intrusivas.[43].

Torres Montalvo, J (2018) en su tesis “Estudio de radón 222 y su progenie proveniente del suelo en la estación meteorológica Hipólito Unanue - PUCP” señala que la humedad del suelo que produce saturación de humedad en el aire encerrado en

el pozo, es un parámetro influyente en el comportamiento de la exhalación y difusión de radón [29].

Gómez Quiñones, I. (2016) en su tesis “Flujo de radón en suelo para uso habitacional en la ciudad de Fresnillo, Zacatecas” señala el registro de $14.42 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h}$ como máximo valor, obteniéndose valores más altos en suelos Xerosol y Rendzina, y roca subyacente del tipo conglomerado polimíctico. En promedio, la exhalación fue menor en suelos litosol y roca basáltica y mayor en roca sedimentaria con glomerado polimíctico y roca volcánica riolita.[14].

Alonso Hernández, H. (2015) en su tesis “El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales” señala que la distribución de los valores de radón obtenidos en las campañas de medida mantiene una estrecha relación con las formaciones geológicas de las islas, así como con los mapas de tasa de exposición gamma a un metro del suelo y mapa de radioisótopos superficiales de cada isla [3].

Rojas Hanco, J (2016) en su tesis “Monitoreo de Radón 222 en la zona sur de Lima”, encontró que las diferencias encontradas en las concentraciones de radón 222 se deben básicamente a los materiales de construcción, al tamaño de las habitaciones, a la ventilación y al diseño de las viviendas. Y se encuentra que la velocidad con la que entra y sale el aire de una casa es un parámetro determinante, siendo la ventilación una de las formas más efectivas de reducir las concentraciones del radón 222 en una vivienda habitada [35].

Efstratios G. Vogianis and Dimitrios Nikolopoulos (2014) En el artículo “Fuentes de radón y riesgo asociado en términos de exposición y dosis” El radón concierne a la comunidad científica internacional desde principios del siglo XX,

inicialmente como emanación del radio y casi en la segunda mitad del siglo como un peligro significativo para la salud humana. Hoy en día, hay una evidencia concreta de que el radón y su progenie pueden causar cáncer de pulmón. [8].

Paula M. Lantz, PhD, MS, MA, David Méndez, PhD, and Martin A. Philbert, PhD (2013) en el artículo “Radón, tabaquismo y cáncer de pulmón: la necesidad de reorientar la política de control del radón” indican que la exposición al radón es la segunda causa principal de cáncer de pulmón, y el riesgo es significativamente mayor para los fumadores que para los no fumadores. Más del 85% de las muertes por cáncer de pulmón inducidas por el radón se encuentran entre los fumadores [23].

G. Cinelli et al. (2014) en el artículo “Evaluación del gas radón del suelo y desarrollo de un riesgo de radón mapa en Bolsena, Italia central” indican que el mapeo del gas radón del suelo confirmó la existencia, de dos áreas diferentes, área inferior del gas radón del suelo, cerca del lago de Bolsena es consistente con un aluvión litología, mientras que el antiguo pueblo de Bolsena, hay un predominio de alta contribución ácida radiactiva de rocas volcánicas del distrito de Vulsini con mayor radón de suelo [4].

2.2. Marco teórico

2.2.1. La radiactividad y desintegración nuclear

La radiactividad es un fenómeno natural por el que un núcleo atómico emite uno o varios tipos de partículas, transmutándose en otros elementos. Los tipos más frecuentes son las conocidas desintegraciones α , β y γ , así como la fisión espontánea y la emisión de nucleones. Esta propiedad la poseen unos 40

elementos de la corteza terrestre. Los más activos tienen $Z > 80$. También se ha sintetizado cerca de 2000 nucleídos artificiales radioactivos [1].

Los núcleos pueden transformarse unos en otros, o pasar de un estado energético a otro, mediante la emisión de radiaciones. Se dice entonces que los núcleos son radiactivos; el proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva. Esta transformación o decaimiento sucede de manera espontánea en cada núcleo, sin que pueda impedirse mediante ningún factor externo. Nótese, además, que cada decaimiento va acompañado por la emisión de al menos un tipo de radiación. La energía que se lleva cada radiación es perdida por el núcleo, siendo la fuerza nuclear el origen de esta energía y lo que da a las radiaciones sus dos características más útiles: poder penetrar materia y poder depositar su energía en ella.

No todos los núcleos de la naturaleza son radiactivos. El decaimiento nuclear sólo sucede cuando hay un exceso de masa-energía en el núcleo, la emisión le ayuda entonces a lograr una mayor estabilidad. Los decaimientos radiactivos de los diferentes núcleos se caracterizan por: el tipo de emisión, su energía y la rapidez de decaimiento [1].

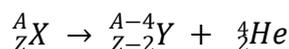
2.2.2. Tipos de desintegraciones nucleares. fuentes radiactivas más comunes

Los núcleos se desintegran de manera que siempre tienden al estado energético más estable. A continuación, se describen los tipos más frecuentes de desintegraciones. Solo hay unas cuantas maneras en que los núcleos pueden decaer, si bien cada tipo de núcleo tiene su propio modo de decaimiento. Se describen los más importantes:

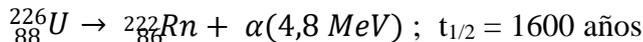
a) Desintegración alfa (α).

Es la emisión de núcleos ${}^4_2\text{He}$ (que se denominan α) por núcleos pesados y es un proceso facilitado, entre otros, por la enorme energía de ligadura las partículas α . La teoría que describe este fenómeno fue desarrollada por Gamow, Condon y Gourney. Es una brillante aplicación del conocido efecto túnel de la mecánica Cuántica. [1]

En la desintegración α , los números másicos (A) y atómico (Z) de los elementos que entran en juego cumplirán:



Por ejemplo:

b) Desintegración beta (β).

Conocida como desintegración β o de Fermi. Se trata de emisiones e^\pm por parte de núcleos alejados de la línea de estabilidad. El proceso es una interacción débil en la que uno de los nucleones que se encuentra en exceso, (n, p), se transforma en el otro (cambio de carga $n \leftrightarrow p$), emitiendo un e^+ o e^- de forma que se conserva la carga eléctrica. Existen tres variantes de la desintegración β nuclear llamadas, β^- , β^+ y CE (captura electrónica)

Básicamente las tres pueden explicarse mediante transformaciones que tienen lugar entre los nucleones constituyentes.

| tipo | proceso | ejemplo | $t_{1/2}$ |
|------------------|---------------------------------------|--|-----------|
| 1. (β^-) | $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ | ${}^{131}_{53}\text{I} \rightarrow {}^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \bar{\nu}_e$ | (8,0d) |
| 2. (β^+) | $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ | ${}^{25}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{25}_{12}\text{Mg} + e^+ + \nu_e$ | (7,2s) |
| 3. (CE) | $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ | ${}^{54}_{25}\text{Mn} + e^- \rightarrow {}^{54}_{24}\text{Cr} + \nu_e$ | (312d) |

En el último caso, después de la captura electrónica (CE) debe de haber de emisión de un rayo X por parte del átomo, al haber sido capturado uno de los electrones de las capas internas por un protón del núcleo, dejando un hueco en la estructura atómica. Hay que tener claro que estos procesos pueden tener lugar entre nucleones ligados. Solo así se entiende que el protón pueda transformarse en un neutrón dentro del núcleo, debido a que hay que tener en cuenta las energías de ligadura nuclear en el balance energético [10]

c) Desintegración gamma (γ).

Es el proceso de desexcitación nuclear por excelencia. La interacción responsable es la electromagnética. Frecuentemente es un proceso rápido ($t_{1/2} \approx 10^{-9}$ s). La radiactividad γ es similar a la emisión de radiación atómica como la óptica o los rayos X. La energía de los rayos γ es la diferencia entre la energía del estado inicial y el la del final de núcleo emisor.

Hay rayos γ emitidos por la mayoría de los núcleos de las series radiactivas. Estos son los fotones de la radiación electromagnética que se llevan el exceso de energía cuando los núcleos realizan decaimientos γ , desde los estados excitados hasta estados de menor energía, el núcleo radioactivo no cambia ni de número másico A ni de número atómico Z. [9].

2.2.3. El radón

El radón es un gas incoloro, inodoro su antecesor inmediato es el radio 226. El radón 222, uno de los isótopos del radón, es parte de las series de decaimientos radiactivos naturales del uranio 238. Es radiactivo con una semivida de 3,8 días, decayendo con emisión de partículas alfa, a polonio, bismuto y plomo, en sucesivos decaimientos.

El decaimiento del radón 222 con emisión de una partícula alfa, es seguido en un tiempo corto, por una serie de cuatro decaimientos adicionales, dos de ellos acompañados por la emisión de partículas alfa, y los otros dos acompañados por otros tipos de radiaciones. Los átomos de corta duración en los que se desintegra un átomo de radón, son en realidad isótopos del polonio, el plomo y el bismuto, pero se les conoce colectivamente como hijos del radón, o bien, como descendientes del radón o simplemente como progenie del radón. La progenie del radón permanece suspendida en el aire durante sus pocos minutos de existencia, a menudo llegan a adherirse a las partículas de polvo o aerosoles.

En resumen, un átomo de radón de en el aire decae dentro en de unos pocos días a progenie de radón de corta semivida, que se desintegran en menos de una hora. Con estas desintegraciones, se emiten tres partículas alfas, una por el radón, y dos por sus descendientes

Considerando que los predecesores del radón en la cadena son sólidos y no emigrarán lejos de su lugar en el suelo, el radón es un gas y puede desplazarse en la tierra a través de unos pocos centímetros. Cohen dice que, por

cada pie cuadrado de tierra en cada segundo, en promedio, pueden surgir alrededor de seis átomos de radón.

El radón en el aire exterior rápidamente se diluye, pero puede alcanzar altas concentraciones, si entra a través de una planta sótano y es atrapado en una casa cerrada [5].

Riesgos de la exposición al gas Radón

El radón y su progenie es el segundo causante de cáncer de pulmón a nivel mundial, esto es debido a que en la cadena de desintegración del uranio 238, el radón 222 es el único descendiente en estado gaseoso que emite partículas alfa con una energía de 5,49 MeV, esta energía de emisión de partículas alfa y su poco poder de penetración en la materia no representa riesgo para nosotros al ser frenada fácilmente por la epidermis, el problema radica cuando por proceso de inhalación (también por ingestión) este elemento radiactivo y sus descendientes entran en el organismo. Al respirar e inhalar el radón, su progenie se aloja finalmente en el tracto respiratorio afectando principalmente a los alveolos pulmonares, donde la emisión de partículas alfa producto de la desintegración del radón y su progenie estarán bombardeando las células del tejido pulmonar causando daño a nivel de ADN; según la OMS se estima que entre un 3% - 14% del total de los casos de cáncer de pulmón son atribuibles al radón, además plantea que un incremento en la concentración media a largo plazo de 100 Bq/m³ aumenta en un 16% la probabilidad de padecer cáncer de pulmón. La probabilidad de tener cáncer de pulmón causado por radón en interiores es mayor en personas que fuman, se cree que la exposición al radón y al consumo de cigarrillos produce un efecto combinado

que excede la suma de sus efectos independientes debido a que las hijas del radón se combinan fácilmente con el polvo y aerosoles para posteriormente por inhalación alojarse en los pulmones.

Con el propósito de estimar las repercusiones en la salud de los niveles de radón en interiores se elaboraron diferentes modelos de proyección de riesgo los cuales están basados en datos de exposición ocupacional y cubren diferentes parámetros como edad de las personas, tiempo de exposición entre otros factores físicos y biológicos [29].

El radón es considerado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EEUU, que lo clasifican como cancerígeno del grupo 1. Advierten que el principal efecto adverso derivado de la inhalación de radón y en especial de sus productos de desintegración es el riesgo de contraer cáncer de pulmón, siendo la segunda causa detrás del tabaco [2, 21].

Unidades usadas en la medición del radón

La magnitud con la que medimos la actividad de la radiación producida por la desintegración del núcleo de cualquier elemento radiactivo es el Becquerel (Bq), que indica el número de desintegraciones por segundo del núcleo atómico, en este caso del radón. Para el caso de la concentración de la actividad en un espacio cerrado usamos el bequerel por metro cúbico de aire (Bq/m^3) que expresa el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire. Esta magnitud aparece definiendo los niveles máximos aconsejables, según recomendaciones normativas, que no deben sobrepasarse

en espacios cerrados y habitados con el fin de proteger la salud de los habitantes.

Tradicionalmente la unidad para medir la actividad de una muestra de material radioactivo ha sido el *Curie (Ci)*, que equivale a 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. Una actividad de 1 *Ci* es aproximadamente la correspondiente a 1 g de Ra 226, o sea a una fuente cuya actividad es muy peligrosa. La mayoría de las fuentes utilizadas en el laboratorio tienen una actividad del orden de los *mCi* o μCi . En parte por ese motivo, en el SI se adoptó como unidad de actividad el *Becquerel (Bq)* que corresponde a una desintegración por segundo, es decir:

$$1 \text{ Ci} \approx 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

El número de decaimientos por unidad de tiempo no es suficiente para caracterizar completamente una fuente radiactiva ya que en muchas aplicaciones lo que importa no es la actividad sino la cantidad de energía que una fuente puede proveer a la materia que la circunda. Esto depende no solo de la actividad sino del tipo de radiación y su energía. En el caso de la radiación electromagnética (γ o X) la exposición se define como la carga total de los iones positivos producidos por la radiación en una masa de aire que ocupa un volumen de 1 cm^3 , a 0° C y 760 mm Hg de presión. La unidad de exposición es el Roentgen (R), que es la carga de una esu (unidad electrostática de carga) por cm^3 de aire a 0° C y 760 mm Hg de presión. Como $1 \text{ esu} = 0,333 \text{ Ci}$ y 1 cm^3 de aire a 0° C y 760 mm Hg de presión tiene una masa de 1,293 g se obtiene que

$$1R = 1.61 \times 10^{15} \frac{\text{pares de iones}}{\text{kg de aire}}$$

Por otro lado, dado que producir un ion se requiere en promedio 34 eV, 1 R corresponde a una pérdida de energía, en aire, de 5.47×10^{16} eV / kg o 87,6 erg / g.

En general para materiales distintos del aire la tasa de absorción de energía cuando se los expone a una radiación ionizante, es diferente. Se define entonces la dosis absorbida D de un material como la cantidad de energía depositada por la radiación por unidad de masa del material. Tradicionalmente la unidad de dosis absorbida ha sido el rad definido que corresponde a una dosis de 100 erg / g. La unidad correspondiente en el SI es el Gray (Gy) que equivale a una energía depositada de 1 Joule por Kg del material. Por lo tanto, $1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$.

Para definir estándares de protección radiológica de los seres vivos es necesario poder cuantificar el efecto biológico de los distintos tipos de radiaciones ionizantes que, en general, son diferentes. Por ejemplo, los rayos α pierden energía rápidamente y por lo tanto depositan prácticamente toda su energía en distancias muy cortas. En consecuencia, producen mucho mayor daño que un rayo γ o β , para los cuales la pérdida de energía se produce gradualmente. Para cuantificar estas diferencias se define la efectividad biológica relativa o factor RBE como el cociente de la dosis de una cierta radiación respecto de la dosis de rayos X que produce el mismo efecto biológico. Como medir la RBE no es proceso sencillo se utiliza un factor de ponderación de la radiación (w_R) que se calcula para un dado tipo de radiación a una dada energía de acuerdo a la energía depositada por unidad de distancia. Así, radiaciones que depositan poca energía por unidad de longitud tienen w_R

cercanos a la unidad mientras que aquellas que depositan mucha energía por unidad de longitud pueden llegar a tener wR del orden de 20.

Los valores de wR para distintos tipos de radiaciones y energías se indican en la Tabla 4.

Tabla 4:
Factores de ponderación de la radiación wR para distintos tipos de radiación y energía

| Radiación | Ponderación de radiación (wR) |
|---|---|
| Rayos X y γ (todas las energías) | 1 |
| E y muones (todas las energías) | 1 |
| neutrones < 10 KeV | 5 |
| neutrones < 10-100 KeV | 10 |
| neutrones > 100KeV hasta 2 MeV | 20 |
| neutrones > 2 -20 MeV | 10 |
| neutrones > 20 MeV | 5 |
| protones > 2 MeV | 5 |
| α , fragmentos de fisión y núcleos pesados | 20 |

Nota. Recuperado de Ortiz, J. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB [30]

La *dosis equivalente para daño biológico (DE)* se define como el producto de la dosis D y el factor de ponderación de la radiación wR , es decir $DE = wRD$. Tradicionalmente la unidad utilizada para esta magnitud ha sido el *rem* (roentgen equivalent man) siendo $1\text{rem} = \text{rad} \times wR$. Sin embargo, en el SI se ha adoptado el *Sievert (Sv)* siendo $1\text{Sv} = 1\text{Gy} \times wR = 100\text{rem}$

En cuanto a las dosis equivalentes aceptables para el ser humano, la *International Commission for Radiation Protection* recomienda no exceder una dosis equivalente máxima de 20mSv/año , promediado en 5 años, sin que en un año dado la dosis sobrepase los 50mSv . [21]

Es importante notar que todos los seres vivos estamos continuamente expuestos a radiaciones ionizantes de origen natural y/o artificial. El fondo natural está dado por:

a) *Las radiaciones ionizantes* procedentes del espacio exterior, o radiación cósmica. Tiene su causa en los procesos nucleares que tiene lugar en el exterior de la Tierra, singularmente en el sol. La atmósfera absorbe parcialmente estas radiaciones, por lo que su intensidad varía según su altitud, siendo la menor a nivel del mar con respecto a los viajes en avión, sobre todo transoceánicos ya que en ellos se vuela a mayor altura, producen un notable incremento a la exposición a estas radiaciones.

b) *Las radiaciones emitidas por las sustancias presentes en la corteza terrestre*. La distribución de estas radiaciones varía notablemente entre uno y otros puntos de la Tierra conforme a la distribución de los elementos que la componen. La radiactividad en suelos graníticos, por ejemplo, es mucho mayor que la presente en suelos calcáneos.

c) *La radiación de los isótopos radiactivos* contenidos en el propio organismo humano, principalmente isótopos del carbono y del potasio. Aparte de su presencia natural en el organismo, los niveles de radiación interna se relacionan directamente con la ingesta de alimentos y con la inhalación de gases radiactivos, singularmente el Radón.

La dosis efectiva promedio proveniente de estas fuentes naturales está estimada en $2 \text{ mSv} / \text{año}$. Finalmente, se estima que la *dosis mortal*, es decir la dosis que tiene asociada un 50 % de probabilidad de muerte en 30 días (sin tratamiento) es de 2.5 a 3 Gy.

Radón y cáncer de pulmón

A nivel internacional, y en distintos países, se han desarrollado este tipo de normativas referentes a la protección de los espacios habitados frente a una excesiva concentración de gas radón.

La primera vez que se detectó un aumento en la tasa de cáncer de pulmón fue entre trabajadores de minas de uranio expuestos a altas concentraciones de gas radón. Además, hay estudios realizados en Europa, América del Norte y China que confirman que incluso en concentraciones bajas, como las que se encuentran en las viviendas, el radón también entraña riesgos para la salud y contribuye considerablemente a la aparición de cáncer de pulmón en todo el mundo [28]

El riesgo de cáncer de pulmón aumenta en un 16% con cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón a largo plazo. La relación dosis-respuesta es lineal: por ejemplo, el riesgo de cáncer de pulmón aumenta de manera proporcional al aumento de la exposición al radón.

2.2.4. Suelos

Hay una estimación que los primeros 2 metros de suelo en un promedio de 4000 m² de tierra, contiene cerca de 20 kg de uranio. Esto corresponde a aproximadamente 2 a 3 partes por millón [40].

Los suelos físicamente están compuestos por partículas, minerales y orgánicos de distinto tamaño, las partículas están dispuestas en una matriz que resulta de un 50% de espacio poroso, ocupado por agua y aire, produciendo un sistema trifásico de sólidos, líquidos y gases, por lo que los usos de los suelos

se ven afectados por ciertas propiedades físicas como: textura, estructura, consistencia, porosidad, densidad, color y temperatura.

Textura del suelo:

La erosión física y química de las rocas y de minerales resulta en una amplia gama de tamaños de partículas, desde piedras, hasta grava, arena y limo y partículas muy pequeñas de arcilla, su distribución determina su rugosidad o finura del suelo. Por lo que la textura es la proporción relativa de arena, limo y arcilla en un suelo. Las separaciones de suelos son los grupos de tamaños de partículas de minerales de 2 mm de diámetro o grupos de tamaño que son más pequeños que la grava.

Componente estructural del suelo. Granulometría

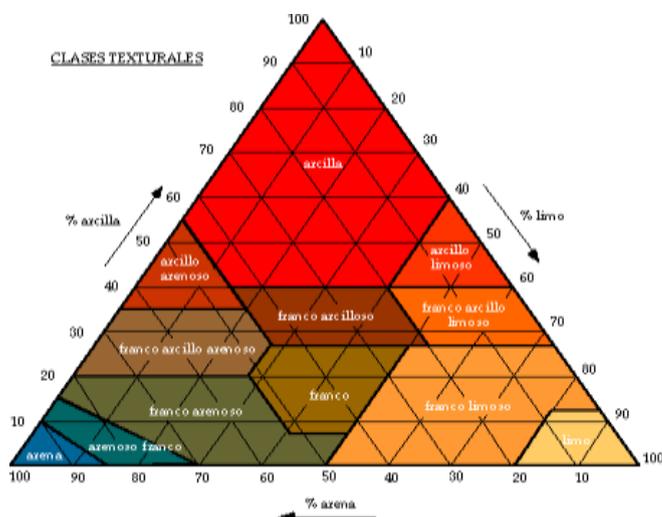


Figura 15: Triángulo textural del suelo de acuerdo a la FAO y el Departamento de Agricultura de USA. [10]

Espacio de poros de suelo y porosidad

Debido a que los suelos minerales tengan una densidad de partículas y una densidad aparente de 6,65 y 113 g/cm respectivamente, eso quiero decir

que los suelos tienen un espacio poroso total o porosidad de alrededor del 50%. Las rocas sin espacio poroso se descomponen por la erosión para formar suelos minerales que contiene alrededor del 50% de porosidad. Los espacios porosos pueden ser importante como la cantidad total de espacio poroso.

Se utilizan dos términos para expresar la densidad del suelo. La densidad de la partícula que es la densidad media de las partículas del suelo, y la densidad aparente que es la densidad del suelo en su estado natural.

Tabla 5:
Capacidad de almacenamiento de agua en suelos (cm de agua /30 cm de espesor de suelos)

| Textura del suelo | Capacidad de campo | Punto de marchitez | Agua disponible |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| Arena y arcilla | 5,6 | 2,8 | 2,8 |
| Arcilla y arena (50%) | 8,4 | 4,3 | 4,1 |
| Arcilla y arena | 9,9 | 5,3 | 4,6 |
| Arcilla | 11,9 | 6,3 | 5,6 |

Fuente: [12]

Diversos materiales parentales del suelo son fuente natural de ciertos metales pesados y otros elementos como los radionúclidos y éstos pueden representar un riesgo para el medio ambiente y la salud humana en concentraciones elevadas.

Los suelos y las rocas también son fuentes naturales del gas radioactivo radón. La difusión del radón desde las capas más profundas hacia la superficie está controlada, en parte, por la estructura del suelo y su porosidad. La radioactividad natural alta es común en rocas ígneas ácidas, principalmente en rocas ricas en feldespato y rocas ricas en illita, encontrándose mayor emisión

de radón en suelos que contienen carbonatos que en otro cualquier otro tipo de suelo o roca.

Tabla 6:
Actividades específicas de radionúclidos naturales en rocas y suelos (Bq/kg)

| Roca/suelo | ⁴⁰K | ²²⁶Ra | ²³²Th |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Areniscas | 461 | 35 | 4 |
| Rocas arcillosas | 876 | n.d. | 41 |
| Esquisto (Franconía) | 1000 | 3000 | 60 |
| Carbonatos | 97 | <10 | 5 |
| Rocas ígneas ácidas | 997 | 37 | 52 |
| Rocas ígneas básicas | 187 | 10 | 8 |
| Suelo desarrollado de loes | n.d. | 41 | 54 |
| Suelos desarrollados sobre granitos | ~1100 | 65-75 | 38-72 |
| Suelos desarrollados sobre cuarcita | ~300 | 54-56 | 63-70 |
| Suelos desarrollados de filita | n.d. | 40-70 | 50-80 |

Fuente: Blume et al 2016 [ONU, 2019] [30]

El radón en las viviendas

La mayor exposición al radón suele producirse en el hogar. La concentración de radón en una vivienda depende de:

- La cantidad de uranio que contienen las rocas y el terreno del subsuelo donde esta edificada;
- Las vías que el radón encuentra para filtrarse al interior de las viviendas; y
- la tasa de intercambio de aire entre el interior y el exterior, que depende del tipo de construcción, los hábitos de ventilación de sus habitantes y la estanqueidad del edificio.

El radón se filtra en las casas a través de grietas en los suelos o en la unión del piso con las paredes, espacios alrededor de las tuberías o cables, pequeños poros que presentan las paredes construidas con bloques de hormigón huecos, o por los sumideros y desagües. Por lo general, el radón suele alcanzar concentraciones más elevadas en los sótanos, bodegas y espacios habitables que están en contacto directo con el terreno. [25]

Las concentraciones de radón varían entre casas adyacentes, y dentro de una misma casa, de un día para otro o, incluso, de una hora para otra. La concentración de radón en las viviendas puede medirse de un modo sencillo y económico. Debido a esas fluctuaciones, es preferible calcular la concentración media anual en el aire de interiores, midiendo las concentraciones de radón al menos durante tres meses. Ahora bien, las mediciones han de llevarse a cabo con arreglo a los protocolos establecidos, a fin de garantizar su uniformidad y su fiabilidad a la hora de tomar decisiones [6].

Comportamiento de Radón en el suelo

De manera natural el uranio está presente en los suelos sobre los que nos asentamos, siendo un elemento sólido y en su proceso de desintegración aparece el radio, que es sólido; ambos no tienen la posibilidad de desplazarse individualmente sino es junto con la roca o suelo del que es parte, siendo las características de las aguas que circulan en el suelo dicho desplazamiento.

Los átomos de radón que se forma a partir del radio, debido a su contenido gaseoso van a poder desplazarse y desintegrarse dando lugar a progenies, siendo posible el desplazamiento si las condiciones de las rocas y el suelo lo permiten.

Así, los suelos muy porosos o rocas muy fracturadas pondrán pocas dificultades al desplazamiento del gas radón, permitiendo que este alcance la superficie del suelo con facilidad, así como también el aire exterior. El enorme volumen de aire en nuestra atmósfera diluirá el radón y hacer que su concentración, sea baja en este medio.

Otro factor físico importante es la permeabilidad de los suelos, que indica la mayor o menor dificultad que presentan al paso de los fluidos, por lo tanto, a mayor permeabilidad del terreno, la movilidad del radón será más importante. Así, las arcillas al tener alta concentración de uranio, su carácter impermeable hace que la cantidad de radón que alcanza la superficie sea muy pequeña, en caso de rocas calcáreas, muy permeables, cuyo contenido de uranio es inferior al de las arcillas, el radón se desplaza más fácilmente y puede alcanzar el suelo en una mayor proporción.

Los factores atmosféricos influyen en la cantidad de radón que puede escapar del suelo y alcanzar los edificios. Durante períodos de fuertes lluvias y debido a que el radón es un gas que se disuelve en agua, los poros del terreno se saturan, acumulándose en la tierra pudiendo desplazarse grandes distancias disueltos en dicha agua. Esto trae como consecuencia una disminución de la cantidad de radón que alcanza la superficie del suelo. Por el contrario, una caída de la presión atmosférica provoca una salida suplementaria de radón del suelo debido a un proceso convectivo motivado por la diferencia de presión en la interfase suelo – aire. Además, las diferencias de temperatura entre el interior de un edificio y exterior son responsables de la variación de la

concentración de radón a lo largo del día con un máximo a primeras horas de la mañana

En la siguiente tabla, se muestran las concentraciones representativas de uranio en rocas presentes en la corteza terrestre.

Tabla 7:
Concentración de uranio en rocas

| TIPOS DE ROCA | CONCENTRACIÓN DE ^{238}U (ppm) |
|---------------|---|
| Basálticas | 1.0 |
| Granitos | 5.0 |
| Arcillas | 3.7 |
| Arenas | 0.5 |

Fuente: Quindós, L (1995) [35]

Movilidad del radón terreno - superficie

El mecanismo que permite que el radón generado en el suelo, alcance los edificios, es básicamente el de difusión, relacionado con el gradiente de concentraciones; muy elevado en el suelo con relación al aire exterior, se puede modelizar por medio de la Ley de Fick. Y un segundo mecanismo denominado convección está relacionado con la diferencia de presiones que hace que este gas se mueva entre puntos con diferencias de presión del orden de pocos pascales (1 atmosfera equivale a 101000 pascales). A modo de explicación, la figura que se adjunta recoge los principales puntos de entrada en un edificio, sea vivienda, o puesto de trabajo. Este proceso depende de la permeabilidad del medio y del gradiente de presión y se modeliza mediante la Ley de Darcy [24,25].

Mientras que, se denomina *exhalación* al parámetro que pondera la cantidad de gas que deja escapar la roca fuente de radón, y *emanación* al parámetro que determina el movimiento del radón entre los poros del terreno hasta alcanzar la superficie terrestre

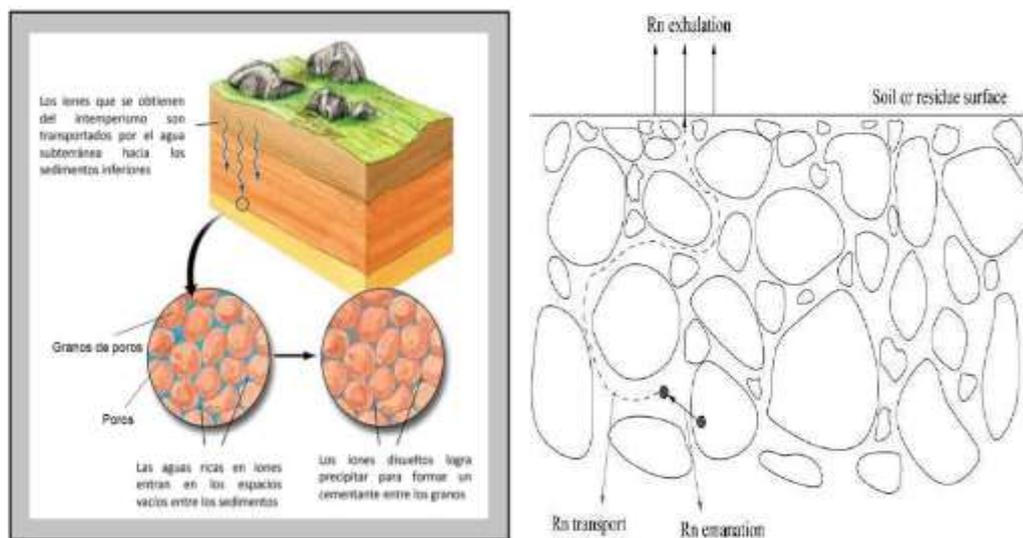


Figura 16: Transporte de radón en suelo. a) Esquema de porosidad y permeabilidad. b) Proceso de emanación y exhalación

En un edificio, la principal fuente de entrada del gas radón es el **terreno** en el que está asentado. Por otro lado, la concentración del gas en el aire dependerá también de las condiciones meteorológicas:

- *El viento.* Las infiltraciones de aire producidas por el viento pueden modificar las concentraciones de radón mientras que, por otro lado, las velocidades de viento se asocian a cambios de presión que modifican el flujo convectivo.
- *La presión atmosférica.* Las modificaciones de las presiones atmosféricas afectan de distinta manera al espacio intersticial de los poros del terreno que, al espacio aéreo en las proximidades de su superficie, por lo que se produce un cambio en el gradiente de presión que modifica el flujo convectivo que se traduce en una mayor exhalación de radón en periodos de bajas presiones.

- *La altura con respecto al suelo.* Dado que se trata de un gas más pesado que el aire (aproximadamente ocho veces más) la probabilidad de encontrar altas concentraciones a altura elevada sobre el terreno es baja.
- *La temperatura* afecta a los movimientos convectivos del aire como medio de transporte del radón. Durante el día, las concentraciones del gas a nivel de suelo son menores, debido a la dispersión vertical producida por el calentamiento de la atmósfera, mientras que, por las noches, debido a una mayor estabilidad atmosférica, se produce un incremento.

En interiores, se puede producir el llamado efecto *Stack* [12] por el cual, el aire caliente, por expansión, tiende a *fugarse* del edificio generando una ligera depresión que puede aumentar el flujo de radón hacia el interior.

- *La humedad ambiental y las lluvias.* En terrenos saturados, los poros se colmatan y el radón se disuelve en el agua desplazándose con ella por corrientes subterráneas dificultando la exhalación a la superficie. Por tanto, y resumiendo, la concentración de radón en el aire dependerá de:
- La capacidad que tenga el gas de escapar de la estructura de la roca (*emanación*). La porosidad y humedad que presente el terreno para que el radón pueda alcanzar la superficie (*exhalación*). Se produce una mayor emanación de radón en suelos porosos (suelo arenoso y con gravas) que, en suelos compactos o arcillosos, de menor porosidad. Con respecto al movimiento de radón, habrá mayor movimiento de radón en suelos graníticos fracturados que en aquellos compactos.

- A mayor permeabilidad del terreno mayor movilidad del radón. Así, las arcillas, a pesar de contener alta concentración en uranio, su carácter impermeable hace que la cantidad de radón que alcanza la superficie sea muy pequeña. Mientras que, por el contrario, en rocas calcáreas (muy permeables), con contenido de uranio hasta 10 veces inferior al de las arcillas, el radón se desplaza más fácilmente alcanzando el suelo en una mayor proporción.

En la siguiente figura se muestra un esquema del mecanismo del transporte del radón, desde su generación en el suelo, su transporte por los poros hasta ingresos a edificios.

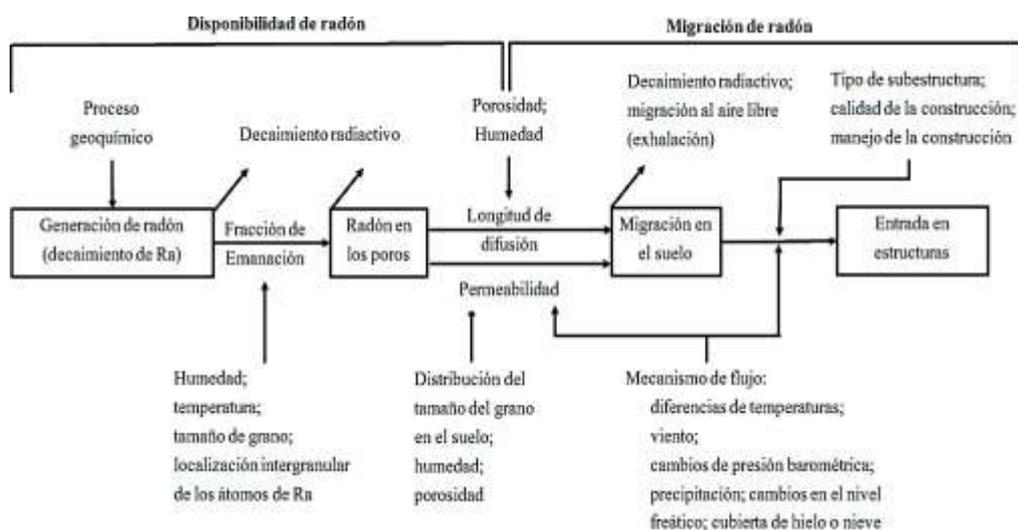


Figura 17: *Representación esquemática de la producción y migración de radón en el suelo y su entrada a una vivienda o edificio. [18].*

Radón en Agua

El gas radón, tras haber emanado de las rocas puede disolverse en corrientes de agua subterráneas y trasportarse de esta manera hacia su destino final (balnearios de aguas termales, manantiales, etc.). Una vez liberado al aire, el radón disuelto en el agua puede contribuir al incremento de la concentración en locales cerrados.

Respecto a los contenidos de radón en aguas, existen como referencia los valores establecidos por la Recomendación de la Comisión Europea (2001/928/Euratom) de 20 de diciembre de 2001 relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable.

2.2.5. Teoría de difusión de los gases en un medio

Difusión de los gases

Cuando dos gases se ponen en contacto, se mezclan espontáneamente, debiéndose esto al movimiento de las moléculas de un gas dentro de otro, o de una zona de alta concentración a otra de baja concentración de algún componente del gas, el que se debe a movimientos moleculares aleatorios. Este proceso, provocado por el movimiento aleatorio de las moléculas, se llama difusión, ley formulada por Thomas Graham.

La ley de difusión de Graham establece: “Bajo las mismas condiciones de temperatura y presión, la rapidez de difusión de diferentes gases es inversamente proporcional al cuadrado de las raíces de las masas moleculares

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{\sqrt{PM_B}}{\sqrt{PM_A}} \quad v_A = \text{velocidad de difusión del gas A}$$

Donde:

$$v_A = \text{velocidad de difusión del gas A}$$

$$PM_A = \text{Peso molecular del gas A}$$

$$PM_B = \text{Peso molecular del gas B}$$

En los gases, los procesos de difusión son rápidos ($10\text{cm}/\text{min}$) mientras que son mucho más lentos en líquidos ($0.05\text{cm}/\text{min}$) y en sólidos ($0,00001\text{cm}/\text{min}$) [21].

Primera ley de Fick

La difusión axial de un gas en un medio poroso es gobernada por la ley de Fick. Según esta ley, el flujo, J , o sea la cantidad de gas que difunde por unidad de área y por unidad de tiempo, es proporción al gradiente de la concentración.

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

Siendo D la constante de difusión (m^2/s). El signo negativo de la ecuación indica que la corriente de difusión es contraria al gradiente de la concentración.

En el caso del radón ^{222}Rn , un gas que decae radiactivamente, la conservación de la masa y su aplicación de la ecuación de (1) nos lleva a la ecuación de difusión

$$\frac{\partial C(z, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(z, t)}{\partial z^2} - \lambda C(z, t) \quad (2)$$

Donde:

$C(z, t)$ = Concentración de ^{222}Rn (Bq/m^3)

t = tiempo (h)

z = distancia en la dirección axial (m)

D = constante de difusión (m^2/h)

λ = constante de decaimiento del ^{222}Rn (h^{-1})

Penetración y acumulación del radón en espacios habitados

El gas radón proveniente del suelo, generado por la desintegración del radio, exhala a la atmósfera y se mezcla con el resto de gases, disminuyendo así su concentración sin que alcance niveles importantes. Ahora bien, si existiese una edificación sobre el terreno, y debido a la diferencia de presión que se establece entre los poros del terreno y el espacio cerrado de la edificación (normalmente alta debido a ventilaciones o ausencia de las mismas), se establecería un flujo desde el terreno hacia el interior de la edificación. Por su condición de gas, su movilidad es alta entre los poros de los materiales normalmente usados en la edificación y penetra fácilmente en el interior de la vivienda, atravesando los forjados, soleras o muros o introduciéndose a través de grietas o fisuras. La acumulación de radón en el interior de los edificios eleva las concentraciones y por tanto el riesgo para la salud de sus habitantes.

Debido a las ventilaciones de los edificios, a las evacuaciones de aire viciado de cuartos húmedos, a las chimeneas, y a las filtraciones por ventanas y puertas, unido todo ello a las variaciones atmosféricas, es normal que exista una pequeña depresión en el interior de los edificios en comparación con la que existe en el terreno donde se está generando radón de forma continua.

A medida que ha ido evolucionando la construcción, primando conceptos de ahorro energético, los edificios han ido mejorando en propiedades

de estanqueidad y con menores filtraciones. Ello ha provocado un incremento en los niveles de radón en el interior por la escasa ventilación. Incluso, usando sistemas de extracción de aire viciado como los que recomienda el actual Código Técnico de Construcción Sostenible D.S. N°014-2021 [36].- vivienda si no se disponen holgadas aberturas de inmisión, puede ocurrir el fenómeno de depresión interior que favorezca la entrada de radón

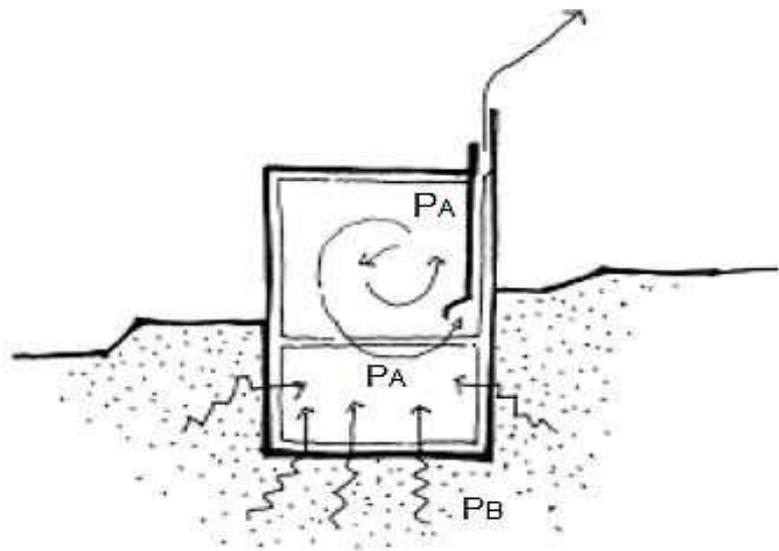


Figura 18: El flujo de radón hacia el interior, debido a procesos convectivos, se establece cuando el gradiente de presiones es positivo ($P_B > P_A$) [15].

2.2.6. Detectores de huellas nucleares de estado sólido

En el presente trabajo de investigación se utilizó detectores desnudos LR 115 tipo 2 y cámaras de difusión color blanco que son diseño propio del grupo GITHUNU PUCP modelo G2 [34].

Detector LR 115 tipo 2

Los detectores LR115 tipo 2, son películas que consiste en una base de poliéster de 100 μm de grosor que está recubierta con una fina capa delgada de nitrato de celulosa de color rojo de 12 μm .

La película de celulosa del LR115 es sensible a las partículas α . Cuando una partícula α golpea la capa delgada, causa daño a la estructura molecular del nitrato de celulosa. Esto se puede observar visiblemente a través de un microscopio, cuando la película expuesta se graba en un baño de solución diluida de hidróxido de sodio bajo condiciones específicas establecidas como se muestra en la Figura 19. Después de este procesamiento, pequeños agujeros son visibles bajo el microscopio que pueden ser contados y por lo tanto ser exactamente cuantificados con precisión. Los agujeros tienen diámetros de 1 μm a 15 μm y están ubicados donde la película fue golpeada por partículas α . La película LR115 no es sensible a otros tipos de radiación, como β , γ o rayos X. [21]

Antes del análisis, los detectores son tratados químicamente en un proceso de grabado. Después del grabado químico las huellas en las películas son visibles bajo un microscopio. La estabilidad y el control de los parámetros críticos del grabado (temperatura y concentración del baño de grabado, tiempo de grabado...) son requisitos básicos para obtener resultados confiables y precisos. Incluso pequeñas variaciones en la temperatura del baño pueden causar resultados incorrectos. Sin embargo, el tiempo de grabado de las películas LR115 es de solo 1.5 horas (en comparación con ~ 8 horas para otros detectores como el CR 39) y el hecho de que las películas LR115 son grabadas en grandes recipientes que minimizan los cambios de temperatura, los resultados del análisis del radón LR115 dosímetros son muy confiables y precisos. [22]

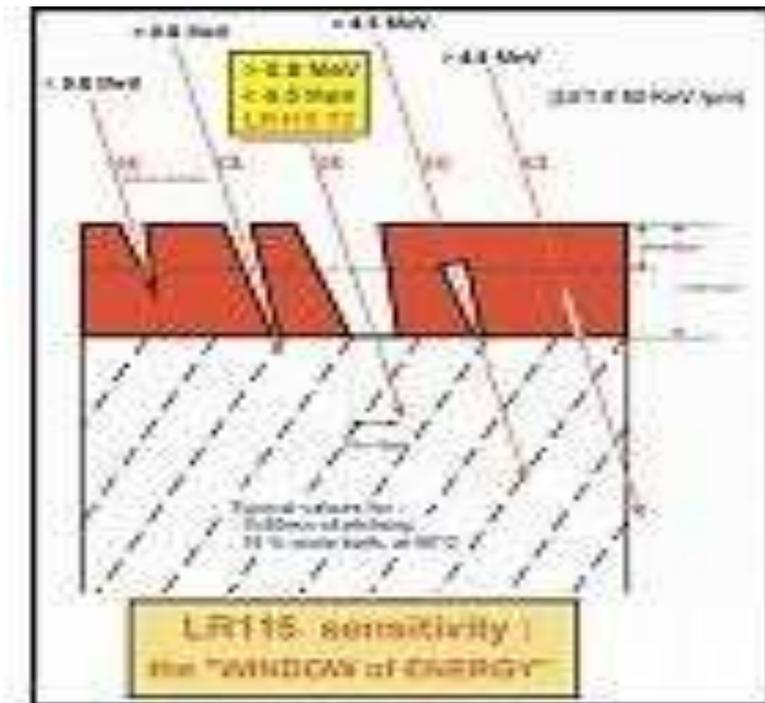


Figura 19: Formación de huellas en LR 115 tipo 2, en rangos de energía, luego de un baño químico. Recuperado de Kodalpha Radon- Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications. www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf [22]

Resumen de las características del detector LR 115 tipo 2

- Para la detección de partículas α , por lo tanto, es necesaria una distancia mínima entre la película y la fuente de las partículas α .
- Posee un rango de medición de energía entre 0,8 MeV a 4,5 MeV.
- La distancia mínima en aire para las partículas alfas provenientes del radón ^{222}Rn es de aproximadamente 5 mm.
- La distancia máxima en aire para la detección es de aproximadamente 35 mm para el radón.
- Las películas LR115 son insensibles a la deposición en la superficie de los productos sólidos de descomposición de radón que emiten partículas α , tales

como Po-218. Por esta razón, los dosímetros no están influenciados por el efecto de plate out.

- El nivel de saturación típico de la película LR115 es de aproximadamente 600 trazas / mm² (diámetro de las trazas: 1 - 15 μm).
- La exposición máxima (nivel de saturación) de la película LR115 está en el rango de 70 MBq.h / m³ cual es significativamente mayor en comparación con otros tipos de dosímetros y muy superior al promedio ambiental.
- La exposición mínima, que significa el umbral de detección más bajo, es de solo 2 kBq.h / m³.

Cálculo de la concentración de radón

En los primeros estudios hechos en minas, se trabajaba con una unidad llamada Working Level (WL), unidad de densidad de energía volumétrica (MeV/L) energía que puede ser depositada por las hijas del Radón en el pulmón, debido a ello se tomó un límite de concentración para el radón en minas de 100pCi/L, dado que en las viejas minas la ventilación era deficiente, se puede llegar a un estado en donde tanto el radón y sus hijas pueden llegar al equilibrio y en esas condiciones para la concentración del radón antes mencionada, las hijas del radón pueden liberar 130000 MeV de energía por decaimiento alfa entonces se tiene que, 1WL = 130000 MeV/L, esto en el aire, luego de ella se definió el working level month = 1WL exposición por 170 horas

El WL es un parámetro importante ya que nos da una referencia de cuanta dosis podríamos recibir respecto las hijas del radón, dado por lo general

a un equilibrio, entonces la concentración de las hijas se estima en un 40% siendo pues el factor de conversión de $1\text{pCi/L} = 24\mu\text{WLM}$. Se asume un factor de equilibrio de 0,40, en estas condiciones se asume también que el promedio de permanencia en casa es 7000 horas durante un año esto es pues $1\text{WLM} = 4\text{mSv}$, es una aproximación de cuanta dosis podríamos recibir.

Como se ha visto, es importante determinar las concentraciones de Radón, ya que a partir de ella se puede estimar la dosis a la que podríamos estar expuestas debido a las hijas del Radón, entonces la relación que se usa para determinar la concentración de Radón 222 usando (SSNTD).

$$C = \frac{T}{Kt} \quad \dots\dots (3)$$

Donde:

C; es la concentración en Bq/m^3 , $1\text{pCi/L} = 37 \text{Bq/m}^3$

T; es la densidad de huellas, $\#\text{Huellas/mm}^2$

K; factor de calibración $\frac{\#\text{Huellas/mm}^2}{\left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right)h}$

t; es el tiempo a la que el detector estuvo expuesto (h), horas.

Mediante esta ecuación podemos calcular la concentración, sin embargo, hay que tener ciertas consideraciones respecto al factor calibración, por ejemplo, las condiciones ambientales cuando se realizan las medidas.

Capítulo III: Resultados de la investigación

3.1. Resultados de la detección de radón ^{222}Rn suelos del distrito de Lambayeque

En abril del 2019, se inició la medición de niveles de radón ^{222}Rn en suelos del distrito de Lambayeque, durante las estaciones de verano, otoño e invierno. Las mediciones se realizaron durante un periodo de un año.

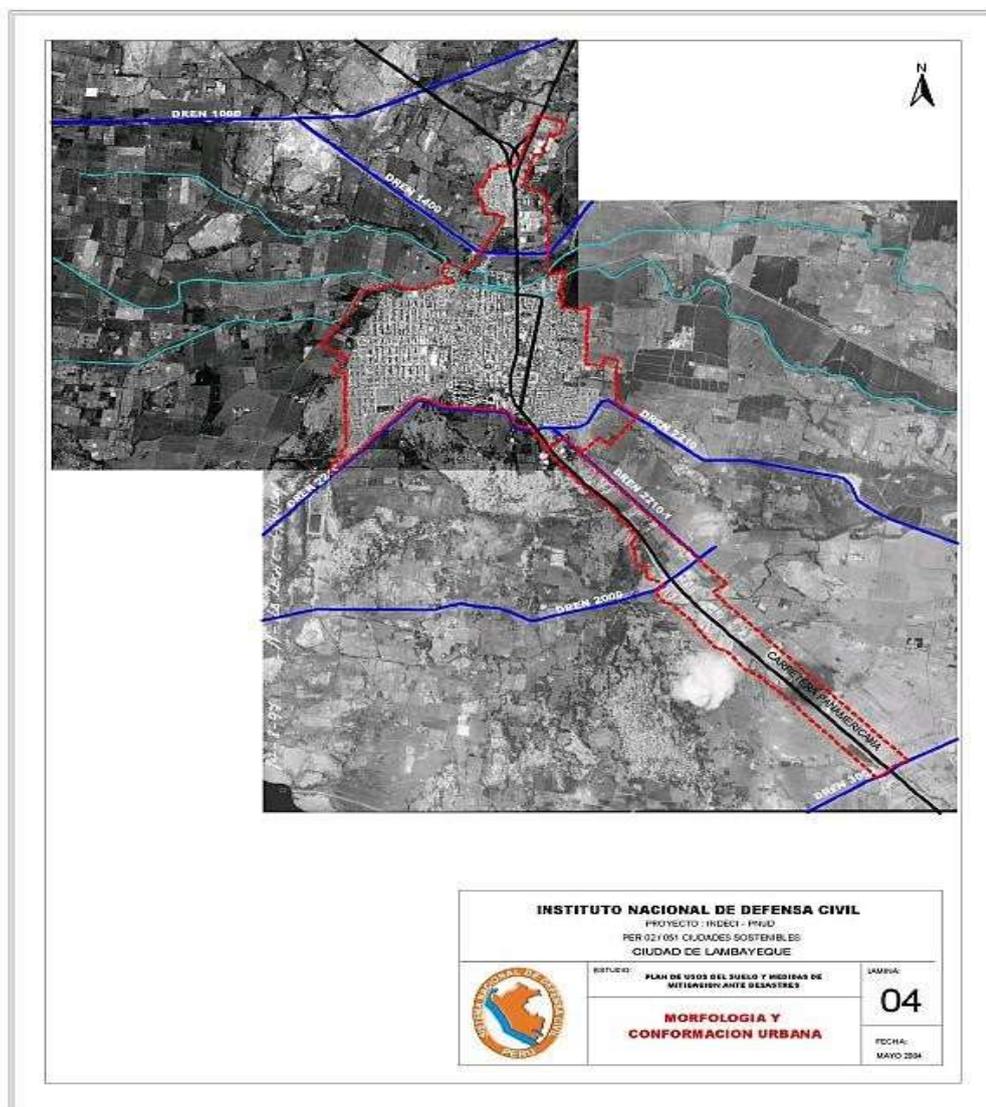


Figura 20: Ubicación de los pozos en suelos urbanos de la ciudad de Lambayeque formando un polígono cerrado

En la Tabla 8 se detalla la cantidad de detectores instalados y los puntos donde fueron ubicados según figura 20.

Tabla 8:
Número de detectores instalados durante el estudio.

| Condiciones de detectores | Cantidad |
|---------------------------------|----------|
| N° de pozos instalados | 4 |
| N° de detectores instalados | 236 |
| N° de detectores Desinstalados | 236 |
| N° de detectores en buen estado | 216 |
| N° de detectores Deteriorados | 20 |

La temperatura en verano fluctúa según datos de la Estación Reque año 2019, entre 12.0°C (Dic.) y 32.2°C (Feb.), siendo la temperatura máxima anual de 32.0°C, la temperatura mínima anual de 12.0°C, en el mes de setiembre con una temperatura media anual de 22°C. En otoño la temperatura máxima anual de 32.2°C, la temperatura mínima anual de 18°C. En invierno la temperatura máxima anual de 27°C, la temperatura mínima de 12°C.



Figura 21: Polígono de la zona de medición en los suelos de la ciudad de Lambayeque

Tabla 9:
Periodos de medición en los suelos del Distrito de Lambayeque

| PERIODO | MES / AÑO | PERIODO | MES / AÑO |
|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|
| P1 | Abril 7 - Abril 22 - 2019 | P13 | Octubre 8 - Octubre 23 - 2019 |
| P2 | Abril 22 - Mayo 7 - 2019 | P14 | Octubre 23 - Noviembre 7 - 2019 |
| P3 | Mayo 7 - Mayo 22 - 2019 | P15 | Noviembre 7 - Noviembre 22 - 2019 |
| P4 | Mayo 22 - Junio 6 - 2019 | P16 | Noviembre 22 - Diciembre 7 - 2019 |
| P5 | Junio 6 - Junio 21 - 2019 | P17 | Diciembre 7 - Diciembre 22 - 2019 |
| P6 | Junio 21 - Julio 8 - 2019 | P18 | Diciembre 22 - Enero 6 - 2019 |
| P7 | Julio 8 - Julio 23 - 2019 | P19 | Enero 6 - Enero 21 - 2019 |
| P8 | Julio 23 - Agosto - 8/2019 | P20 | Enero 21 - Febrero 5 - 2019 |
| P9 | Agosto 8 - Agosto 23 - 2019 | P21 | Febrero 5 - Febrero 20 - 2019 |
| P10 | Agosto 23 - Setiembre 8 - 2019 | P22 | Febrero 20 - Marzo 7 - 2019 |
| P11 | Setiembre 8 - Setiembre 23 - 2019 | P23 | Marzo 7 - Marzo 31 - 2019 |
| P12 | Setiembre 23 - Octubre 8 - 2019 | | |

Tabla 10:
Variables meteorológicas en el período de medición en la ciudad de Lambayeque

| VARIABLE | Máx | Min |
|--------------------------|--------|--------|
| Humedad (%) | 80 | 78 |
| Temperatura(°C) | 31 | 16 |
| Presión Atmosférica (mb) | 1020.1 | 1013.2 |

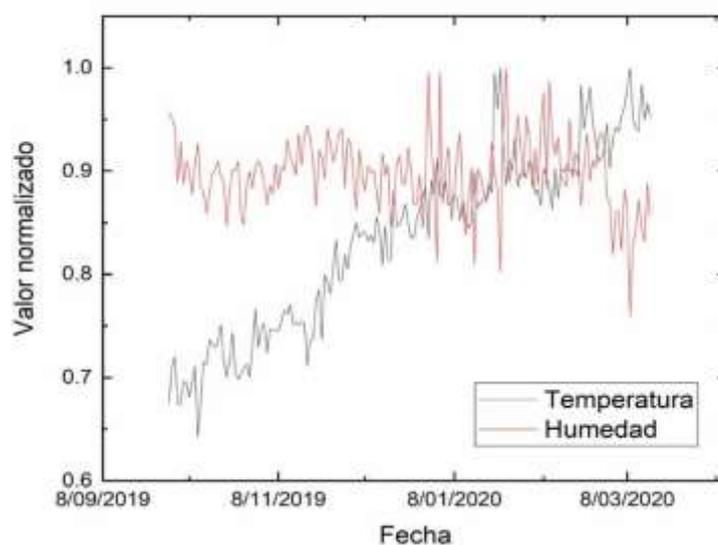


Figura 22: Datos de variables meteorológicas durante el periodo 08/09/2021 al 08/04/2021.[44]

Se presentan los datos de los 10 primeros períodos, en los cuales sólo se colocaron cámara de difusión externa e interna durante las mediciones.

Tabla 11:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P1 (Abril 7- Abril 22-2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 12.01 ± 6.01 | 33.67 ± 16.88 |
| G2- INT- POZO A | 37.83 ± 15.56 | 106.06 ± 43.73 |
| G2-EXT- POZO B | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2- INT- POZO B | 2.97 ± 1.49 | 8.33 ± 4.19 |
| G2-EXT- POZO C | 8.32 ± 11.48 | 23.33 ± 32.20 |
| G2- INT- POZO C | 17.02 ± 15.56 | 47.72 ± 43.65 |
| G2-EXT- POZO D | 13.38 ± 6.69 | 37.51 ± 18.79 |
| G2-INT- POZO D | 14.05 ± 14.16 | 39.39 ± 39.72 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Tabla 12:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P2 (Abril 22 - Mayo 7- 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 14.05 ± 14.16 | 39.39 ± 39.72 |
| G2- INT- POZO A | 8.11 ± 11.39 | 22.74 ± 31.94 |
| G2-EXT- POZO B | 16.51 ± 8.26 | 46.29 ± 23.20 |
| G2- INT- POZO B | 9.59 ± 15.56 | 26.89 ± 33.85 |
| G2-EXT- POZO C | 12.01 ± 6.01 | 33.67 ± 16.88 |
| G2- INT- POZO C | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2-EXT- POZO D | 19.81 ± 15.86 | 55.54 ± 44.50 |
| G2-INT- POZO D | 1.49 ± 0.75 | 4.18 ± 2.11 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno G2 – INT

Tabla 13:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P3 (Mayo 7- Mayo 22- 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | - | - |
| G2- INT- POZO A | 16.35 ± 8.18 | 45.84 ± 22.97 |
| G2-EXT- POZO B | - | - |
| G2- INT- POZO B | - | - |
| G2-EXT- POZO C | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.6 |
| G2- INT- POZO C | 5.94 ± 2.97 | 16.65 ± 8.34 |
| G2-EXT- POZO D | 1.49 ± 0.75 | 4.18 ± 2.11 |
| G2-INT- POZO D | 9.82 ± 12.17 | 27.53 ± 34.13 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno : G2 – INT

(-) Detectores deteriorados impidieron su lectura

Tabla 14: Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P4 (Mayo 22-Junio 6 -2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 71.36 ± 15.64 | 200.06 ± 44.24 |
| G2- INT- POZO A | 18.82 ± 15.64 | 52.76 ± 43.87 |
| G2-EXT- POZO B | 27.13 ± 15.78 | 76.06 ± 44.30 |
| G2- INT- POZO B | 22.97 ± 15.56 | 64.40 ± 43.67 |
| G2-EXT- POZO C | 39.31 ± 15.56 | 110.21 ± 43.74 |
| G2- INT- POZO C | 14.05 ± 14.16 | 39.39 ± 39.72 |
| G2-EXT- POZO D | 16.51 ± 8.26 | 46.29 ± 23.20 |
| G2-INT- POZO D | 14.86 ± 7.43 | 41.66 ± 20.87 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno : G2 – INT

Tabla 15:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período otoño – P5 (Junio 6-Junio 21-2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2- INT- POZO A | 5.13 ± 10.05 | 14.38 ± 28.17 |
| G2-EXT- POZO B | 7.43 ± 3.72 | 20.83 ± 10.45 |
| G2- INT- POZO B | 17.02 ± 15.56 | 47.72 ± 43.65 |
| G2-EXT- POZO C | 11.89 ± 5.95 | 33.33 ± 16.71 |
| G2- INT- POZO C | 10.62 ± 5.31 | 29.77 ± 14.91 |
| G2-EXT- POZO D | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2-INT- POZO D | 11.89 ± 5.95 | 33.33 ± 16.71 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno : G2 – INT

Tabla 16:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P6 (Junio 21-Julio 8-2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 6.62 ±10.71 | 16.38 ± 26.50 |
| G2- INT- POZO A | 4.46 ± 2.23 | 11.03 ± 5.52 |
| G2-EXT- POZO B | 10.40 ± 5.20 | 25.73 ± 12.89 |
| G2- INT- POZO B | 11.89 ± 5.95 | 29.41 ± 14.74 |
| G2-EXT- POZO C | 7.43 ± 3.72 | 18.38 ± 9.22 |
| G2- INT- POZO C | 3.03 ± 1.52 | 7.50 ± 3.77 |
| G2-EXT- POZO D | 11.89 ± 5.95 | 29.41 ± 14.74 |
| G2-INT- POZO D | 1.50 ± 0.75 | 3.71 ± 1.86 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Tabla 17:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P7 (Julio 8-Julio 23-2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2- INT- POZO A | 8.92 ± 4.46 | 25.01 ± 12.53 |
| G2-EXT- POZO B | 7.51 ± 3.76 | 21.05 ± 10.56 |
| G2- INT- POZO B | 11.89 ± 5.95 | 33.33 ± 16.71 |
| G2-EXT- POZO C | 96.04 ± 17.05 | 269.25 ± 48.45 |
| G2- INT- POZO C | 57.15 ± 15.56 | 160.22 ± 43.87 |
| G2-EXT- POZO D | 184.89 ± 32.02 | 518.35 ± 91.04 |
| G2-INT- POZO D | 87.39 ± 15.70 | 245.00 ± 44.60 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Tabla 18:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P8 (Julio 23 - agosto 8 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 64.58 ± 15.56 | 169.74 ± 41.20 |
| G2- INT- POZO A | 85.82 ± 16.41 | 225.56 ± 43.63 |
| G2-EXT- POZO B | 68.36 ± 15.64 | 179.67 ± 41.44 |
| G2- INT- POZO B | 82.72 ± 15.93 | 217.42 ± 42.35 |
| G2-EXT- POZO C | 7.43 ± 3.72 | 19.53 ± 9.79 |
| G2- INT- POZO C | 63.09 ± 15.56 | 165.82 ± 41.18 |
| G2-EXT- POZO D | 73.50 ± 15.56 | 193.18 ± 41.29 |
| G2-INT- POZO D | 5.13 ± 10.05 | 13.48 ± 26.41 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno : G2 – INT

Tabla 19:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P9 (Agosto 8 – Agosto – 23 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 205.85 ± 32.57 | 577.12 ± 92.86 |
| G2- INT- POZO A | 198.91 ± 31.33 | 557.66 ± 89.34 |
| G2-EXT- POZO B | 163.68 ± 31.50 | 458.89 ± 89.33 |
| G2- INT- POZO B | 203.46 ± 32.02 | 570.41 ± 91.31 |
| G2-EXT- POZO C | 188.47 ± 33.14 | 528.39 ± 94.19 |
| G2- INT- POZO C | 184.21 ± 33.55 | 516.45 ± 95.27 |
| G2-EXT- POZO D | 149.58 ± 32.20 | 419.36 ± 91.11 |
| G2-INT- POZO D | 202.16 ± 32.95 | 566.77 ± 93.86 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Tabla 20:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P10 (Agosto 23 - Setiembre 8 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 52.69 ± 15.56 | 138.49 ± 41.10 |
| G2- INT- POZO A | 70.52 ± 15.56 | 185.35 ± 41.26 |
| G2-EXT- POZO B | 34.86 ± 15.56 | 91.62 ± 40.98 |
| G2- INT- POZO B | 75.87 ± 15.64 | 199.41 ± 41.52 |
| G2-EXT- POZO C | 16.51 ± 8.26 | 43.39 ± 21.75 |
| G2- INT- POZO C | 14.86 ± 7.43 | 39.06 ± 19.56 |
| G2-EXT- POZO D | 49.72 ± 15.56 | 130.68 ± 41.08 |
| G2-INT- POZO D | 58.63 ± 15.56 | 154.10 ± 41.15 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

A partir de la tabla 21, se presentan los datos correspondientes a las cámaras de difusión G2 externa e interna, y también de los detectores desnudos (DC) colocados

durante las mediciones en los siguientes períodos. Los detectores desnudos fueron usados para contrastar las mediciones de las cámaras de difusión.

Tabla 21:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período invierno P11 (Setiembre 8 - Setiembre 23 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 98.76 ± 15.56 | 276.88 ± 44.37 |
| G2- INT- POZO A | 119.00 ± 15.56 | 335.22 ± 44.71 |
| DC- INT- POZO A | 8.92 ± 4.46 | 29.73 ± 15.08 |
| G2-EXT- POZO B | 104.95 ± 15.86 | 294.23 ± 45.29 |
| G2- INT- POZO B | 155.23 ± 15.56 | 435.20 ± 45.45 |
| DC-INT- POZO B | 13.51 ± 6.76 | 45.03 ± 22.85 |
| G2-EXT- POZO C | 125.19 ± 15.78 | 350.98 ± 45.42 |
| G2- INT- POZO C | 512.92 ± 45.97 | 1438.01 ± 135.58 |
| DC-INT- POZO C | 86.87 ± 15.56 | 289.57 ± 57.41 |
| G2-EXT- POZO D | 85.87 ± 15.70 | 240.74 ± 44.58 |
| G2-INT- POZO D | 141.98 ± 15.70 | 398.05 ± 45.53 |
| DC-INT- POZO D | 15.82 ± 14.99 | 52.73 ± 50.16 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 22:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque Período primavera P12 (Setiembre 23 - Octubre 8 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 2.97 ± 1.49 | 8.33 ± 4.19 |
| G2- INT- POZO A | 5.13 ± 10.05 | 14.38 ± 28.17 |
| DC- INT- POZO A | 9.59 ± 12.07 | 31.97 ± 40.33 |
| G2-EXT- POZO B | 4.46 ± 2.23 | 12.50 ± 6.26 |
| G2- INT- POZO B | 10.95 ± 5.48 | 30.70 ± 15.39 |
| DC-INT- POZO B | 138.91 ± 30.23 | 463.03 ± 108.18 |
| G2-EXT- POZO C | 9.82 ± 12.17 | 27.53 ± 34.13 |
| G2- INT- POZO C | 144.92 ± 30.23 | 406.29 ± 85.58 |
| DC-INT- POZO C | 3.00 ± 1.50 | 10.00 ± 5.07 |
| G2-EXT- POZO D | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2-INT- POZO D | 5.94 ± 2.97 | 16.65 ± 8.34 |
| DC-INT- POZO D | 11.08 ± 12.76 | 36.93 ± 42.65 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno : G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 23:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P13 (Octubre 8 - Octubre 23 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 7.43 ± 3.72 | 20.83 ± 10.45 |
| G2- INT- POZO A | 7.43 ± 3.72 | 20.83 ± 10.45 |
| DC- INT- POZO A | 8.92 ± 4.46 | 29.73 ± 15.08 |
| G2-EXT- POZO B | 4.46 ± 2.23 | 12.5 ± 6.26 |
| G2- INT- POZO B | 24.45 ± 15.56 | 68.55 ± 43.67 |
| DC-INT- POZO B | 28.91 ± 15.56 | 96.37 ± 52.51 |
| G2-EXT- POZO C | 18.51 ± 15.56 | 51.89 ± 43.65 |
| G2- INT- POZO C | 439.20 ± 30.37 | 1231.00 ± 92.46 |
| DC-INT- POZO C | 292.00 ± 30.23 | 973.43 ± 130.38 |
| G2-EXT- POZO D | 10.40 ± 5.20 | 29.16 ± 14.60 |
| G2-INT- POZO D | 14.05 ± 14.16 | 39.39 ± 39.72 |
| DC-INT- POZO D | 8.11 ± 11.39 | 27.03 ± 38.03 |

Nota: Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 24:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P14 (Octubre 23- Noviembre 7- 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 45.26 ± 15.56 | 126.89 ± 43.78 |
| G2- INT- POZO A | 40.92 ± 15.78 | 114.72 ± 44.37 |
| DC- INT- POZO A | - | - |
| G2-EXT- POZO B | 40.80 ± 15.56 | 114.39 ± 43.75 |
| G2- INT- POZO B | 91.94 ± 15.70 | 257.76 ± 44.66 |
| DC-INT- POZO B | - | - |
| G2-EXT- POZO C | 27.97 ± 15.93 | 78.42 ± 44.72 |
| G2- INT- POZO C | 312.10 ± 30.53 | 874.99 ± 89.34 |
| DC-INT- POZO C | - | - |
| G2-EXT- POZO D | - | - |
| G2-INT- POZO D | - | - |
| DC-INT- POZO D | - | - |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

(-) Detectores deteriorados impidieron su lectura

Tabla 25:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P15 (Noviembre 7 – Noviembre 22 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 63.09 ± 15.56 | 176.88 ± 43.93 |
| G2- INT- POZO A | - | - |
| DC- INT- POZO A | - | - |
| G2-EXT- POZO B | - | - |
| G2- INT- POZO B | - | - |
| DC-INT- POZO B | - | - |
| G2-EXT- POZO C | - | - |
| G2- INT- POZO C | - | - |
| DC-INT- POZO C | - | - |
| G2-EXT- POZO D | 37.89 ± 16.01 | 106.23 ± 44.99 |
| G2-INT- POZO D | - | - |
| DC-INT- POZO D | - | - |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Modo desnudo interno : DC - INT

(-) Detectores deteriorados impidieron su lectura

Tabla 26:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P16 (Noviembre 22 - Diciembre 7 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 45.84 ± 15.64 | 128.52 ± 44.01 |
| G2- INT- POZO A | - | - |
| DC- INT- POZO A | - | - |
| G2-EXT- POZO B | - | - |
| G2- INT- POZO B | 55.41 ± 15.86 | 155.35 ± 44.70 |
| DC-INT- POZO B | - | - |
| G2-EXT- POZO C | 62.36 ± 15.64 | 174.83 ± 44.15 |
| G2- INT- POZO C | - | - |
| DC-INT- POZO C | - | - |
| G2-EXT- POZO D | 52.69 ± 15.56 | 147.72 ± 43.84 |
| G2-INT- POZO D | - | - |
| DC-INT- POZO D | - | - |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Modo desnudo interno : DC - INT

(-) Detectores deteriorados impidieron su lectura

Tabla 27:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P17 (Diciembre 7 - Diciembre 22 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 70.03±15.78 | 196.33±44.61 |
| G2- INT- POZO A | 58.63±15.56 | 164.37±43.89 |
| DC- INT- POZO A | 87.88±15.64 | 292.93±57.77 |
| G2-EXT- POZO B | 77.37±15.64 | 216.91±44.30 |
| G2- INT- POZO B | 64.64±15.70 | 181.22±44.33 |
| DC-INT- POZO B | 69.04±15.56 | 230.13±55.43 |
| G2-EXT- POZO C | 53.35±15.64 | 149.57±44.61 |
| G2- INT- POZO C | 412.33±30.08 | 1156±90.87 |
| DC-INT- POZO C | 539.29±45.28 | 1797.00±214.77 |
| G2-EXT- POZO D | 66.06±15.56 | 185.20±43.96 |
| G2-INT- POZO D | 95.38±15.64 | 267.40±44.54 |
| DC-INT- POZO D | 120.90±15.64 | 403.00±62.38 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 28:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período primavera P18 (Diciembre 22 - Enero 6 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 57.15 ± 15.56 | 160.22 ± 43.87 |
| G2- INT- POZO A | 63.09 ± 15.56 | 176.88 ± 43.93 |
| DC- INT- POZO A | 77.95 ± 15.56 | 259.83 ± 56.37 |
| G2-EXT- POZO B | 65.36 ± 15.64 | 183.24 ± 44.17 |
| G2- INT- POZO B | 60.12 ± 15.56 | 168.55 ± 43.90 |
| DC-INT- POZO B | 72.01 ± 15.56 | 240.03 ± 55.73 |
| G2-EXT- POZO C | 63.09 ± 15.56 | 176.88 ± 43.93 |
| G2- INT- POZO C | 401.29 ± 30.37 | 1125.04 ± 91.29 |
| DC-INT- POZO C | 525.64 ± 30.37 | 1752.13 ± 180.08 |
| G2-EXT- POZO D | 66.06 ± 15.56 | 185.20 ± 43.96 |
| G2-INT- POZO D | 84.87 ± 15.64 | 237.94 ± 44.40 |
| DC-INT- POZO D | 107.10 ± 15.70 | 357.00 ± 60.49 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC – INT

Tabla 29:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Periodo verano P19 (Enero 6 – Enero 21 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 63.09 ± 15.56 | 176.88 ± 43.93 |
| G2- INT- POZO A | 82.41 ± 15.56 | 231.04 ± 44.14 |
| DC- INT- POZO A | 91.33 ± 15.56 | 304.43 ± 57.96 |
| G2-EXT- POZO B | 98.00 ± 15.70 | 274.75 ± 44.74 |
| G2- INT- POZO B | 89.84 ± 15.56 | 251.87 ± 44.24 |
| DC-INT- POZO B | 76.47 ± 15.56 | 254.90 ± 56.21 |
| G2-EXT- POZO C | 56.35 ± 15.64 | 157.98 ± 44.09 |
| G2- INT- POZO C | 401.61 ± 30.23 | 1125.94 ± 90.93 |
| DC-INT- POZO C | 486.21 ± 30.37 | 1620.70 ± 170.96 |
| G2-EXT- POZO D | 64.58 ± 15.56 | 181.05 ± 43.94 |
| G2-INT- POZO D | 102.89 ± 15.64 | 288.46 ± 44.65 |
| DC-INT- POZO D | 113.40 ± 15.64 | 378.00 ± 61.24 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 30:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P20 (Enero 21 - Febrero 5 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 55.66 ± 15.56 | 156.05 ± 43.86 |
| G2- INT- POZO A | 77.37 ± 15.64 | 216.91 ± 44.30 |
| DC- INT- POZO A | 82.41 ± 15.56 | 274.7 ± 56.88 |
| G2-EXT- POZO B | 54.85 ± 15.64 | 153.78 ± 44.08 |
| G2- INT- POZO B | 19.15 ± 15.70 | 53.69 ± 44.05 |
| DC-INT- POZO B | 79.44 ± 15.56 | 264.80 ± 56.54 |
| G2-EXT- POZO C | 11.32 ± 15.64 | 31.74 ± 43.96 |
| G2- INT- POZO C | 291.96 ± 30.08 | 818.53 ± 87.67 |
| DC-INT- POZO C | 474.08 ± 30.37 | 1580.27 ± 168.20 |
| G2-EXT- POZO D | 55.66 ± 15.56 | 156.05 ± 43.96 |
| G2-INT- POZO D | 102.21 ± 15.78 | 286.55 ± 45.03 |
| DC-INT- POZO D | 99.52 ± 15.70 | 331.73 ± 59.45 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 31:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P21 (Febrero 5 - Febrero 20 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 82.41 ± 15.56 | 231.04 ± 44.14 |
| G2- INT- POZO A | 92.82 ± 15.56 | 260.23 ± 44.28 |
| DC- INT- POZO A | 72.01 ± 15.56 | 240.03 ± 55.73 |
| G2-EXT- POZO B | 82.41 ± 15.56 | 231.04 ± 44.14 |
| G2- INT- POZO B | 84.83 ± 15.86 | 237.83 ± 45.01 |
| DC-INT- POZO B | 123.66 ± 15.78 | 412.20 ± 63.20 |
| G2-EXT- POZO C | 83.37 ± 15.64 | 233.73 ± 44.38 |
| G2- INT- POZO C | 535.22 ± 30.23 | 1500.53 ± 95.46 |
| DC-INT- POZO C | 717.85 ± 45.97 | 2392.83 ± 254.65 |
| G2-EXT- POZO D | 87.87 ± 15.64 | 229.53 ± 44.36 |
| G2-INT- POZO D | 115.58 ± 15.93 | 324.04 ± 45.66 |
| DC-INT- POZO D | 192.60 ± 30.53 | 642.00 ± 115.46 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 32:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P22 (Febrero 20 - Marzo 7 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 45.26 ± 15.56 | 118.96 ± 41.05 |
| G2- INT- POZO A | 87.88 ± 15.64 | 230.98 ± 41.66 |
| DC- INT- POZO A | 57.15 ± 15.56 | 178.59 ± 50.94 |
| G2-EXT- POZO B | 113.40 ± 15.64 | 298.05 ± 42.02 |
| G2- INT- POZO B | 106.50 ± 15.86 | 279.92 ± 42.48 |
| DC-INT- POZO B | 87.88 ± 15.64 | 274.63 ± 54.16 |
| G2-EXT- POZO C | 89.38 ± 15.64 | 234.92 ± 41.68 |
| G2- INT- POZO C | 369.90 ± 31.01 | 972.23 ± 86.33 |
| DC-INT- POZO C | 621.59 ± 30.53 | 1942.00 ± 190.69 |
| G2-EXT- POZO D | 75.25 ± 15.7 | 197.78 ± 41.67 |
| G2-INT- POZO D | 114.68 ± 16.25 | 301.42 ± 43.61 |
| DC-INT- POZO D | 100.25 ± 15.56 | 313.28 ± 55.44 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

Tabla 33:

Resultados de densidad de huellas y concentración de Rn 222 de cada pozo monitoreado con su respectivo promedio, el cual se considera representativo el suelo del distrito de Lambayeque – Período verano P23 (Marzo 7 - Marzo 31 - 2019)

| CÓDIGO | Densidad (huellas/mm²) | Concentración (Bq/m³) |
|------------------------|--|---|
| G2-EXT- POZO A | 64.58 ± 15.56 | 113.16 ± 27.47 |
| G2- INT- POZO A | 91.33 ± 15.56 | 160.03 ± 27.66 |
| DC- INT- POZO A | 86.87 ± 15.56 | 180.98 ± 35.88 |
| G2-EXT- POZO B | 79.44 ± 15.56 | 139.2 ± 27.57 |
| G2- INT- POZO B | 70.52 ± 15.56 | 123.57 ± 27.50 |
| DC-INT- POZO B | 105.58 ± 15.70 | 351.93 ± 60.28 |
| G2-EXT- POZO C | 69.04 ± 15.56 | 120.97 ± 27.49 |
| G2- INT- POZO C | 798.35 ± 46.21 | 1398.89 ± 90.73 |
| DC-INT- POZO C | 1096.94 ± 62.83 | 2285.29 ± 234.24 |
| G2-EXT- POZO D | - | - |
| G2-INT- POZO D | 152.56 ± 30.08 | 266.79 ± 53.28 |
| DC-INT- POZO D | 203.18 ± 30.84 | 423.29 ± 73.64 |

Cámara de difusión externo: G2 – EXT

Cámara de difusión interno: G2 – INT

Detector desnudo interno : DC - INT

(-) Detectores deteriorados impidieron su lectura.

Tabla 34:
Concentración de Radón 222 durante los periodos de medición

| PUNTOS | G2 INTERIOR | G2 EXTERIOR | DC INTERNO |
|---------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| P1 | 50.38 ± 32.82 | 30.92 ± 20.62 | |
| P2 | 20.74 ± 20.63 | 43.72 ± 31.08 | |
| P3 | 30.01 ± 21.81 | 16.67 ± 8.34 | |
| P4 | 49.55 ± 37.03 | 108.16 ± 155.48 | |
| P5 | 31.3 ± 25.86 | 28.12 ± 14.09 | |
| P6 | 12.92 ± 6.47 | 22.48 ± 15.89 | |
| P7 | 115.89 ± 29.43 | 209.45 ± 41.16 | |
| P8 | 155.57 ± 38.39 | 140.53 ± 33.43 | |
| P9 | 552.82 ± 92.44 | 495.94 ± 91.87 | |
| P10 | 132.73 ± 35.87 | 101.05 ± 36.23 | |
| P11 | 303.38 ± 39.64 | 290.721 ± 44.92 | 452.51 ± 64.56 |
| P12 | 131.19 ± 40.02 | 19.38 ± 14.80 | 121.3 ± 43.41 |
| P13 | 56.29 ± 36.59 | 28.6 ± 18.74 | 567.88 ± 68.99 |
| P14 | 186.24 ± 44.52 | 106.57 ± 44.08 | 874.99 ± 89.34 |
| P15 | - | 141.56 ± 44.46 | - |
| P16 | 155.35 ± 44.7 | 150.36 ± 44.00 | - |
| P17 | 210.78 ± 47.05 | 187 ± 44.24 | 912.39 ± 106.45 |
| P18 | 205.85 ± 46.99 | 176.39 ± 43.98 | 873.5 ± 97.06 |
| P19 | 256.57 ± 47.31 | 197.39 ± 44.18 | 857.27 ± 95.27 |
| P20 | 205.49 ± | 124.42 ± | 751.31 ± |
| P21 | 308.58 | 231.34 | 1193.85 |
| P22 | 271.74 | 212.42 | 851.64 |
| P23 | 225.58 | 124.44 | 1072.11 |

() Ausencia de detector descubierto

(-) Detectores deteriorados impidieron su lectura

3.2. Análisis e interpretación de los datos

Se utilizó para realizar las mediciones en los pozos, cámaras de difusión G2 (exterior e interior) por condiciones de alta humedad. La humedad influye en las mediciones de radón 222, con el uso de las cámaras de difusión se buscó mitigar la

influencia de la humedad ambiental, con respecto al detector LR-115 en modo desnudo o expuesto a la atmósfera.

Los resultados de las mediciones realizadas en los pozos, para estudiar el comportamiento del radón ^{222}Rn en cada zona de medición, durante los 23 periodos establecidos se presentan en el siguiente cuadro resumen:

Tabla 35:

Promedios parciales de la concentración de $\text{Rn } 222$ por estaciones de los pozos, durante los períodos de medición

| ESTACIONES: PERIODOS | POZOS | G2- INTERNO (Bq/m³) | G2 – EXTERNO (Bq/m³) | DESCUBIERTO (Bq/m³) |
|---------------------------------|--------------|---|--|---|
| OTOÑO: P1 – P5 | POZO A | 48.36 ± 34.14 | 75.57 ± 28.86 | - |
| | POZO B | 36.84 ± 31.34 | 43.09 ± 23.14 | - |
| | POZO C | 32.54 ± 24.24 | 45.94 ± 24.83 | - |
| | POZO D | 29.22 ± 22.71 | 34.54 ± 20.64 | - |
| INVIERNO: P6 – P11 | POZO A | 223.31 ± 39.50 | 201.3 ± 43.44 | - |
| | POZO B | 247.53 ± 42.01 | 178.53 ± 40.08 | - |
| | POZO C | 155.68 ± 37.75 | 244.99 ± 38.14 | - |
| | POZO D | 230.19 ± 42.24 | 255.29 ± 53.97 | - |
| PRIMAVERA: P12 – P18 | POZO A | 98.24 ± 34.16 | 116.86 ± 33.55 | 153.62 ± 42.39 |
| | POZO B | 172.43 ± 39.44 | 107.91 ± 37.81 | 958.73 ± 89.88 |
| | POZO C | 257.39 ± 67.96 | 109.85 ± 42.44 | 1133.3 ± 132.58 |
| | POZO D | 140.35 ± 34.25 | 113.78 ± 34.33 | 205.99 ± 50.89 |
| VERANO : P18 – P23 | POZO A | 219.84 ± 40.41 | 159.22 ± 40.09 | 235.75 ± 51.48 |
| | POZO B | 189.38 ± 40.66 | 219.36 ± 40.51 | 1163.22 ± 90.22 |
| | POZO C | 311.70 ± 58.08 | 155.87 ± 38.75 | 1964 ± 203.75 |
| | POZO D | 293.45 ± 46.45 | 191.1 ± 43.46 | 417.66 ± 73.05 |

Los datos de la Tabla 34, son presentados en la figura 23, para una mejor

lectura de los mismos

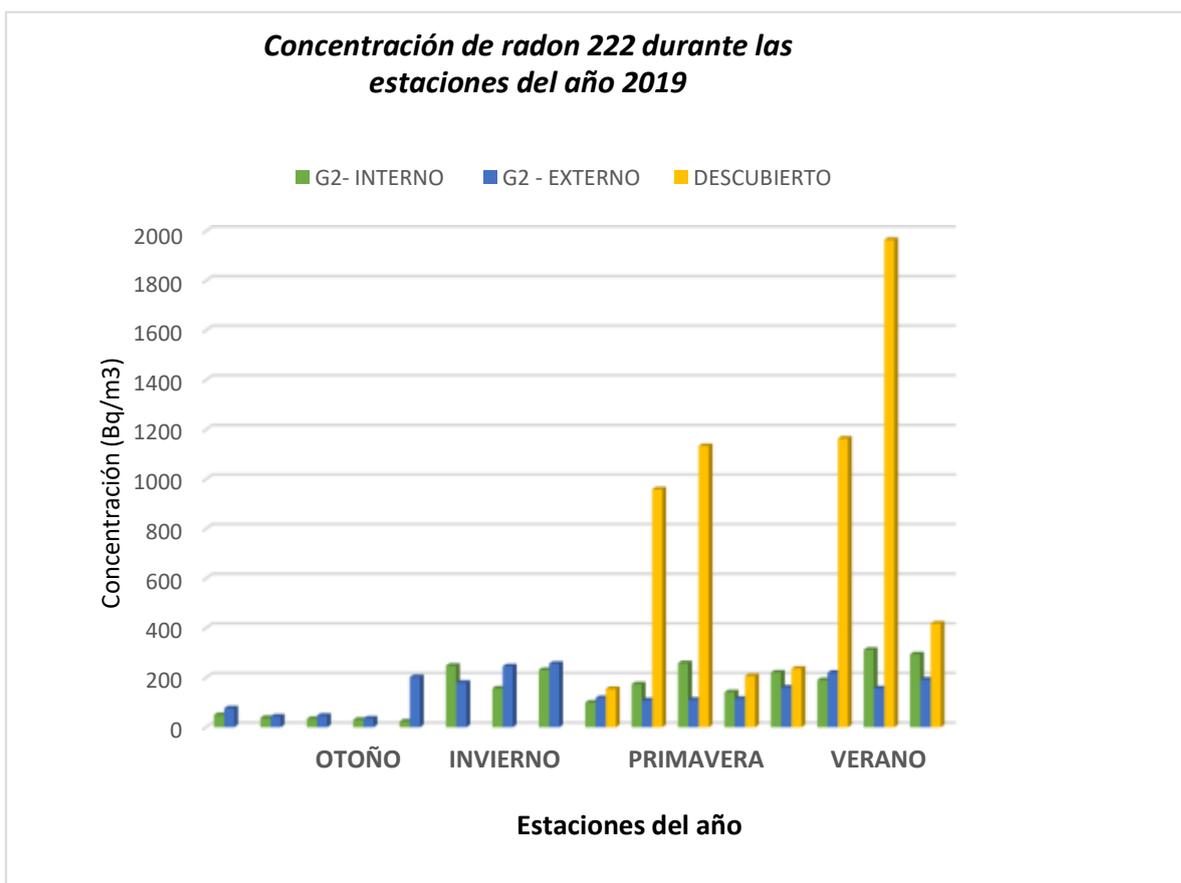


Figura 23: Concentración de radón 222 durante las estaciones del año.

En la figura 23, se aprecia que los valores de la concentración promedio de radón 222 fluctúan en las estaciones del año 2019; esto se debe a la naturaleza gaseosa del radón 222, y se observa que los detectores descubiertos son los que han registrado una mayor concentración del radón y su progenie.

Tabla 36:
Promedios de la concentración de Rn 222 en los 4 pozos durante las estaciones de 2019.

| Estación | G2 Exterior (Bq/m ³) | G2 Interior (Bq/m ³) | Detector desnudo LR – 115 (Bq/m ³) |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Otoño | 49.79 ± 24.37 | 36.74 ± 28.11 | - |
| Invierno | 210.03 ± 43.91 | 214.18 ± 40.37 | - |
| Primavera | 112.10 ± 37.03 | 167.10 ± 43.95 | 612.91 ± 79.58 |
| Verano | 181.39 ± 40.70 | 253.59 ± 46.40 | 945.16 ± 104.62 |

En la tabla 36, se observa que los valores de concentración de radón 222, medidos con el detector LR 115 en modo desnudo son más altos, esto es debido a que en esta modalidad del detector no se discriminan las alfas de la progenie del radón, lo que no sucede con el detector LR 115 en las cámaras de difusión, como se demuestra en el artículo de B. Pérez y colaboradores [34].

A continuación, se presentan las figuras 24 a 27 que corresponden a los datos tomados en cada pozo, y presentados en las tablas del 11 al 33.

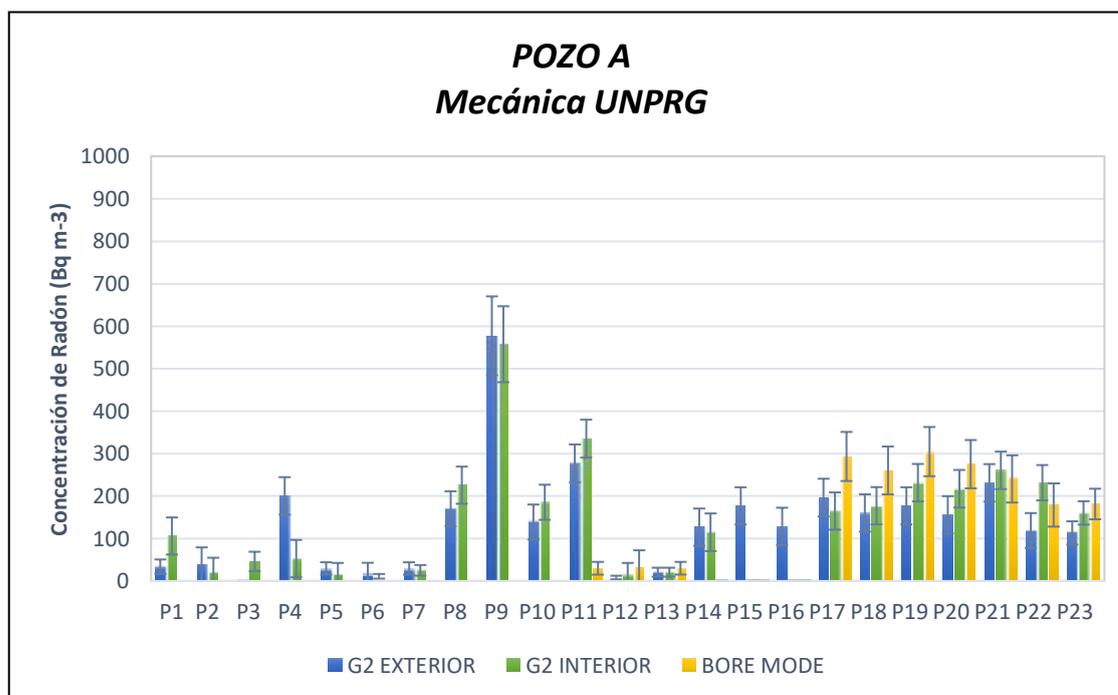


Figura 24: Concentración de radón 222 durante el periodo de medición del pozo A

En la figura 24, se observa que los valores registrados con la cámara de difusión G2 interior en el pozo A, son más altos en los períodos 9 y 11 correspondientes a la estación de invierno. Las características del suelo en el pozo A son: arena con finos, arena arcillosa o arena limosa.

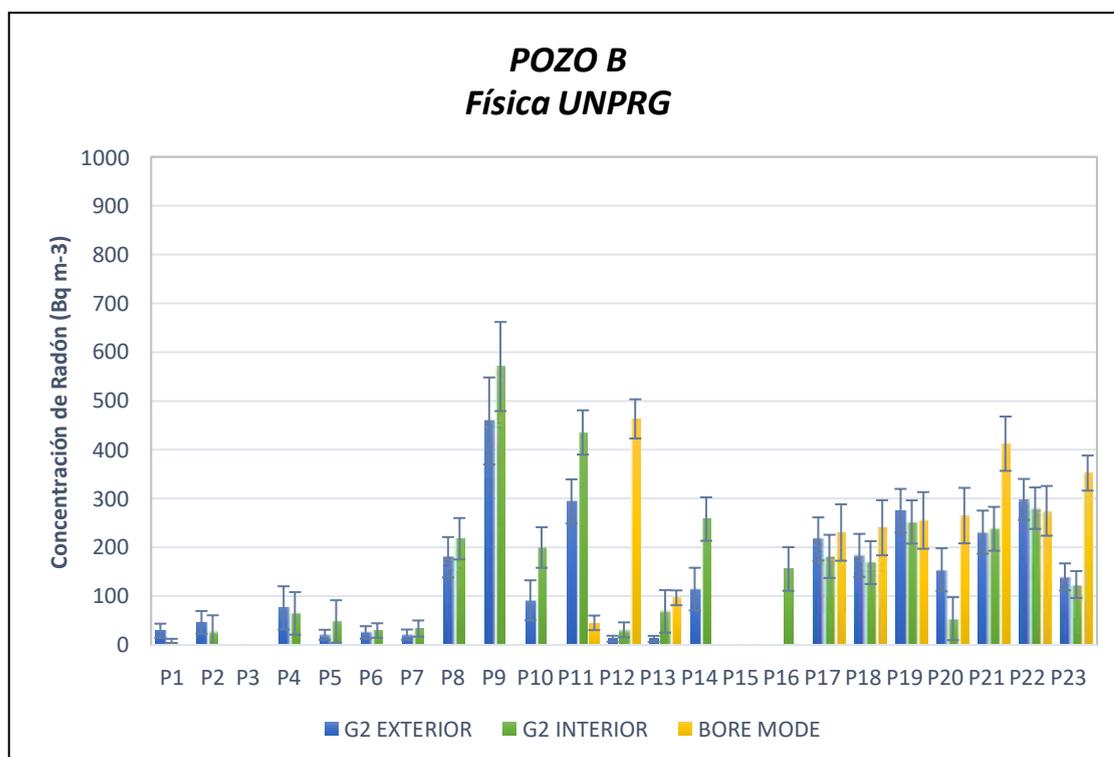


Figura 25: Concentración de radón 222 durante el periodo de medición del pozo B

En la figura 25 correspondientes a los datos registrados con la cámara de difusión G2 interior en el pozo B, se observa que los valores más altos se dan en los períodos 9 y 11 en la estación de invierno. Las características del suelo en el pozo B son: arena con finos, arena arcillosa o arena limosa.

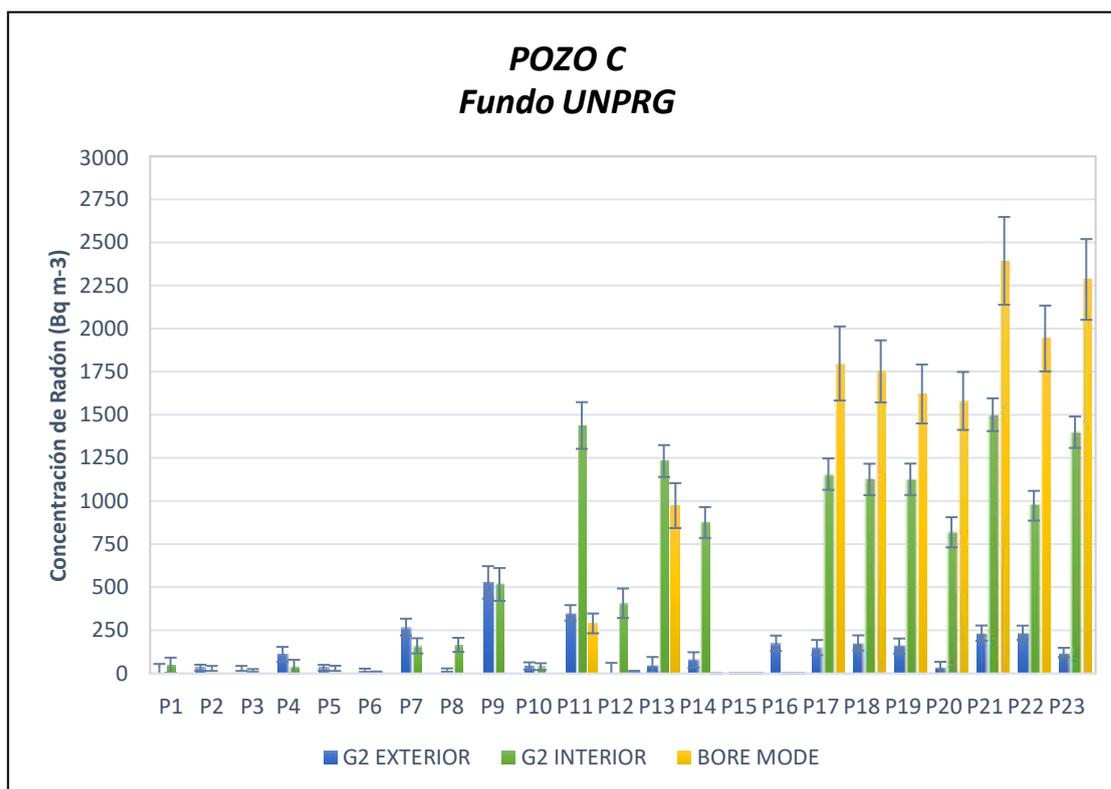


Figura 26: Concentración de radón 222 durante el periodo de medición del pozo C

En la figura 26 correspondientes a los datos obtenidos con la cámara de difusión G2 interior en el pozo C, se observa que los valores más altos se dan en los períodos 11,13, 14 y del 17 al 23 correspondientes a las estaciones de primavera y verano. Las características del suelo en el pozo C son: arcilla, limoso de alta plasticidad o suelo fino

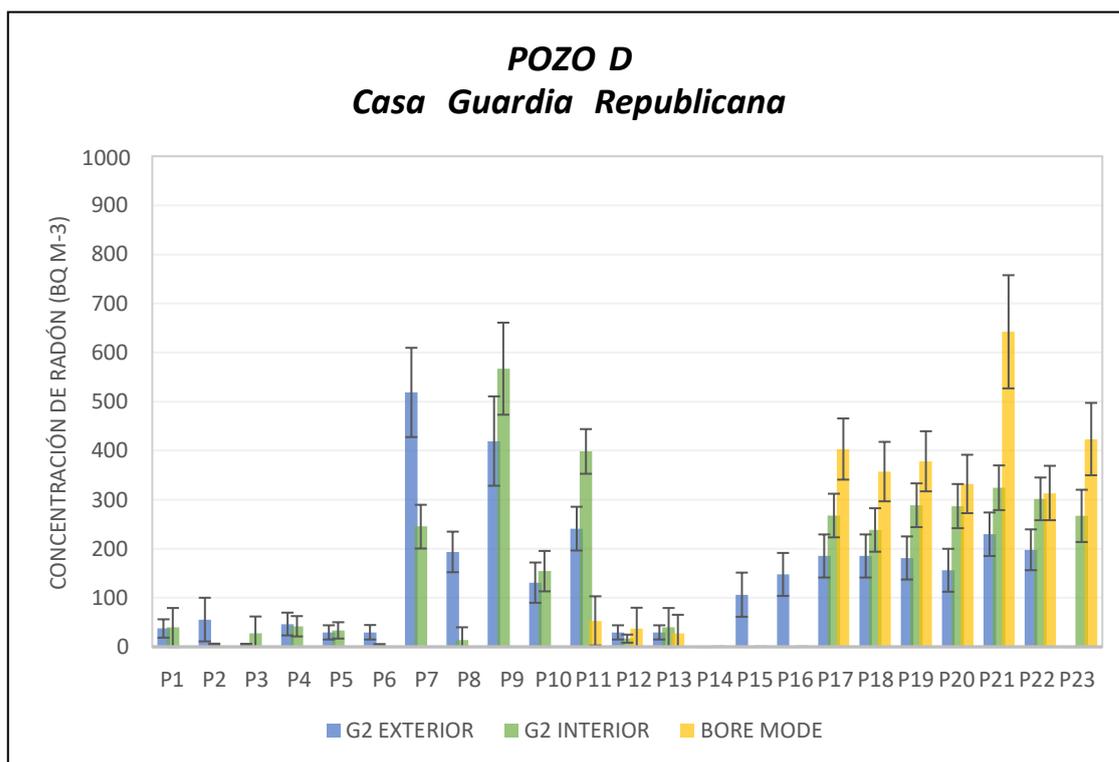


Figura 27: Concentración de radón 222 durante el período de medición del pozo D

En la figura 27 correspondientes a los datos obtenidos con la cámara de difusión G2 interior en el pozo D, se observa que los valores más altos se dan en los períodos 9,11 correspondiente a la estación de invierno. Las características del suelo en el pozo D son: arena pobremente gradada, con material granular.

Resumiendo, en los cuatro pozos se encuentran coincidentemente valores altos de la concentración de radón 222 en los períodos 9 y 11 en la estación de invierno, corresponden a los meses de agosto y setiembre durante los cuales hubo ausencia de riegos destinados a los cultivos de arroz, en los alrededores de las zonas de medición, según lo reportado por los dueños de los terrenos de cultivo.

También se presenta los resultados promedios por pozos de los 23 períodos de medición en la tabla 37 y en la Figura 28

Tabla 37:

Promedios de la concentración de Radón 222 en cada zona de medición durante los periodos de medición

| Zona (Pozo) | G2 Exterior (Bq/m ³) | G2 Interior (Bq/m ³) | Detector desnudo LR – 115 (Bq/m ³) |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Pozo A | 138.24 ± 36.49 | 147.44 ± 37.05 | 194.69 ± 46.94 |
| Pozo B | 76.5 ± 16.5 | 161.55 ± 15.1 | 87.7 ± 20.9 |
| Pozo C | 57.4 ± 10.2 | 440.3 ± 101.9 | 637.4 ± 151.7 |
| Pozo D | 62.5 ± 14.7 | 109.7 ± 26.4 | 133.9 ± 31.7 |

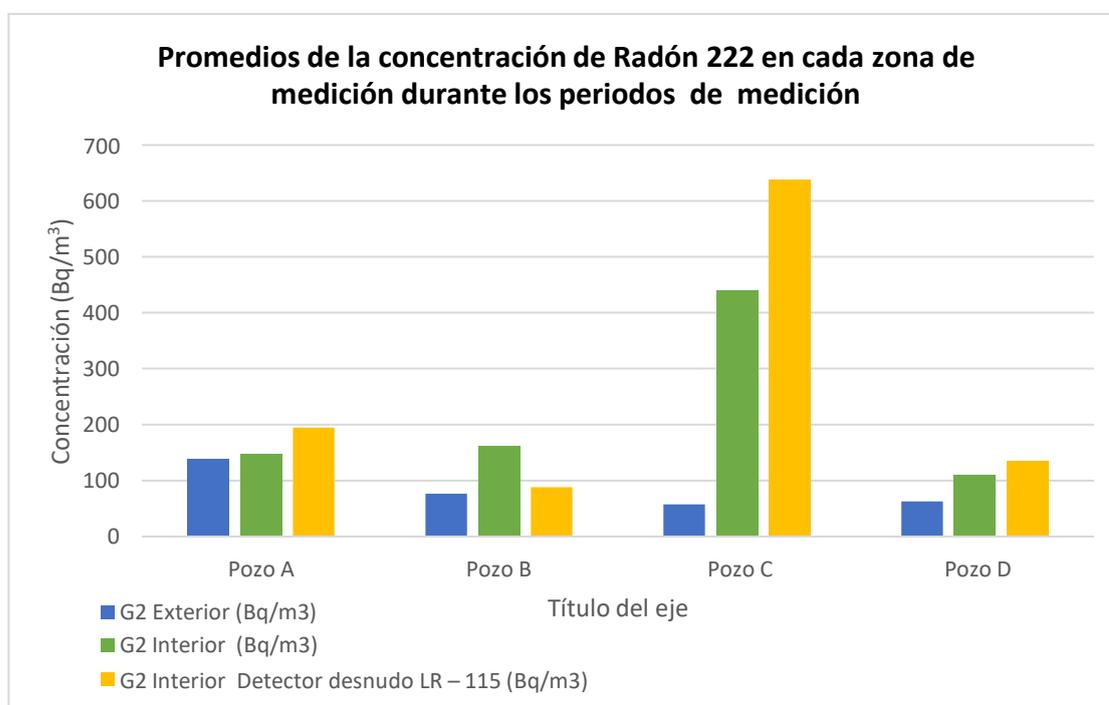


Figura 28: Valores promedio de la Concentración de radón 222 en cada pozo y por tipo de detector

En la figura 28, se observa que los valores promedios de concentración de radón 222 más altos, medidos en el 2019 en los pozos, corresponden al pozo C, estos valores fueron obtenidos con la cámara de difusión G2 interior y con el detector desnudo colocado al interior del pozo.

Con el objetivo de encontrar una relación entre las concentraciones de radón reportadas por cada uno de los detectores colocados en los pozos, en las

configuraciones establecidas G2 interior y G2 exterior en los 23 períodos y el detector en modo desnudo en los periodos del 11 al 23, se realizan análisis gráficos comparativos. Un análisis gráfico se hace en la figura 29, que corresponde a la Tabla 34 del Capítulo II, para estudiar la variación en las mediciones durante cada período.

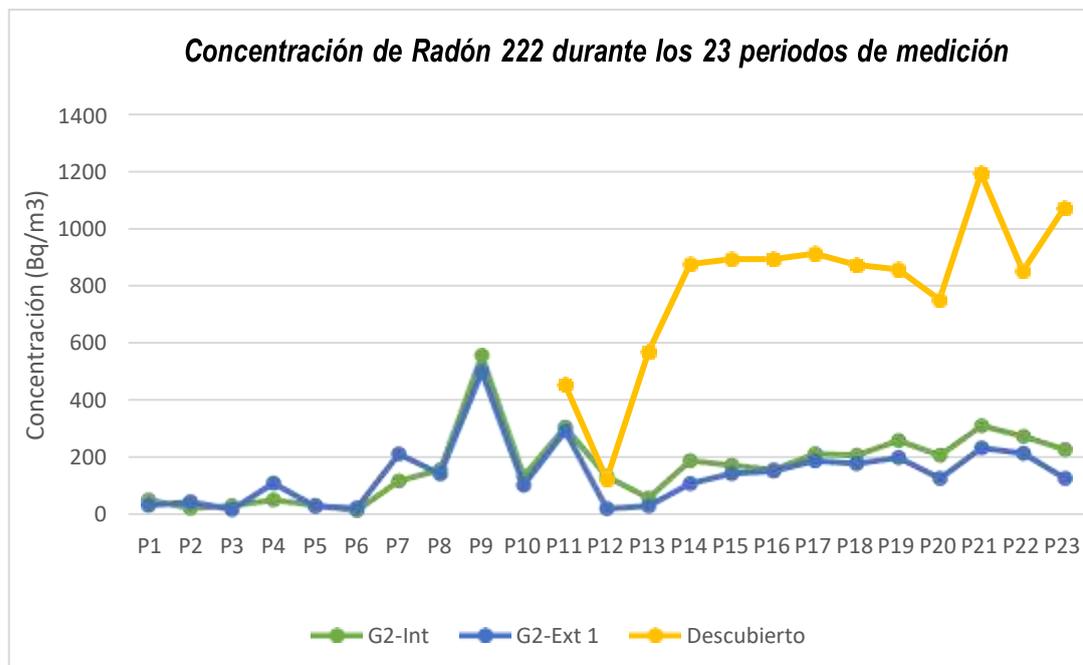


Figura 29: Comparación entre las mediciones al interior de los pozos en suelos del distrito de Lambayeque

En la figura 29, se puede observar que existe una correlación entre las mediciones realizadas con la cámara de difusión G2 interno y externa en los 23 períodos de medición. Y a partir del período 11 hasta el 23, se observa una correlación entre las mediciones realizadas con las cámaras de difusión G2 interno y externa y el detector desnudo (bare mode).

En las Tablas 11 al 34, se puede observar que hay una tendencia marcada en que los niveles de concentraciones mayores se encuentran en el pozo C, obteniéndose valores que superan los límites máximos permisibles establecidos por la norma nacional [20].

En los 23 periodos de medición se analizan las concentraciones de radón obtenidas con la cámara de difusión G2 en el interior y con la G2 al exterior del pozo evidenciándose una correlación estadística de Pearson positiva directa significativa como se demuestra en la siguiente tabla.

Tabla 38:
Correlación entre las mediciones de los 23 períodos de las cámaras de difusión G2 interior y exterior

| POZOS | N | Correlación Pearson |
|---------------|----------|--------------------------------|
| POZO A | 20 | 0,919 |
| POZO B | 23 | 0,909 |
| POZO C | 20 | 0,493 |
| POZO D | 19 | 0,763 |

El valor N debió ser igual a 23 (23 períodos), pero como se reportó anteriormente algunos detectores se perdieron por problemas en el proceso de grabado.

En la tabla 39, se encuentran que en los pozos A y B existe una correlación positiva muy alta, mientras que en el pozo D se da una correlación positiva alta y en el pozo C se produce una correlación positiva moderada, cuando se comparan los resultados encontrados con las cámaras de difusión G2 interior y exterior.

Por otro lado, cuando se analizan los datos de concentración de radón 222, obtenidos con el detector en modo desnudo (bare mode) en los períodos 11 al 23, se observa que los resultados son comparables con los obtenidos con el detector en la cámara de difusión G2 interior colocada en cada pozo, lo que se puede observar en la tabla 40.

Tabla 39:
Correlación entre las mediciones de los períodos 11 al 23 de G2 interior y modo desnudo de LR -115

| POZOS | N | Correlación Pearson |
|---------------|----------|----------------------------|
| POZO A | 9 | 0,847 |
| POZO B | 11 | 0,497 |
| POZO C | 8 | 0,955 |
| POZO D | 9 | 0,899 |

El valor N debió ser igual a 13 (períodos 11 al 23), pero como se reportó anteriormente algunos detectores se perdieron por problemas en el proceso de grabado.

En la tabla 40, se encuentran que en los pozos C y D existe una correlación positiva muy alta, mientras que en el pozo A se da una correlación positiva alta y en el pozo B se produce una correlación positiva moderada, cuando se comparan los resultados encontrados con las cámaras de difusión G2 interior y modo desnudo LR 115.

Conclusiones

La investigación realizada en suelos urbanos del distrito de Lambayeque en el año 2019, para determinar el nivel de exhalación radón 222, nos permite concluir lo siguiente:

1. La variación de radón 222 medida en el interior de los cuatro (04) pozos instalados en el distrito de Lambayeque, permite estudiar la exhalación de este gas desde el suelo.
2. Se encontró que al interior del pozo C, el nivel de concentración es más alto con respecto a los demás pozos, los valores encontrados fueron: con cámara de difusión G2 interno 1398.89 Bq/m^3 y en modo desnudo (bare mode), 2285.29 Bq/m^3 ; valores que superan los límites permisibles de 200 Bq/m^3 según norma nacional DECRETO SUPREMO N° 099 - 97- EM [20].
3. Los datos obtenidos con los detectores desnudos y con la cámara de difusión G2 colocados al interior de cada pozo presentan una alta correlación estadística positiva.
4. Las pequeñas diferencias encontradas en las mediciones con los detectores desnudos y con la cámara de difusión G2 se explican por la presencia de la progenie del radón, que incide en las mediciones con el detector LR 115 en modo desnudo.
5. Los resultados que se encuentran al comparar las mediciones con la cámara de difusión G2 y el detector desnudo, están de acuerdo con la propuesta del Grupo de investigación en Técnicas de Huellas Nucleares – GITHUNU de trabajar con la cámara de difusión G2 externa para las investigaciones en mediciones de radón 222 y su progenie, evitando la presencia del Thoron (radón 220).
6. Esta investigación revela que el pozo C ubicado a $6^{\circ}42'5.02''\text{S}$ $79^{\circ}55'4.40''\text{W}$ entrada del fundo “El Ciénago” de la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, presentó los

niveles más altos de concentración, obteniéndose un valor promedio de G2 interior 440.3 Bq/m³ y en modo desnudo (bare mode) 637.4 Bq/m³, la zona corresponde a un tipo de suelo arcilloso, limoso de alta plasticidad y muy sensible a la presencia de humedad proveniente de riegos en la zona.

7. Así mismo el valor de menor concentración se encontró en el pozo A, con un valor promedio de G2 interior 74.3 Bq/m³ y en modo desnudo (bare mode) 79.4 Bq/m³, el pozo está situado en una zona con un tipo de arena fina, arena arcillosa o arena limosa; esto se explica por la concentración de arena en la zona de localización del pozo.
8. El pozo A ubicado a 6°42'29"S 79°54'16"W y el pozo B ubicado a 6°42'26.38"S 79°54'23.71"W, en el que se obtuvieron menor concentración de radón 222 presentan suelos de tipo arena fina, arena arcillosa o arena limosa, con una napa freática entre 2m a 1.72 m, con respecto al pozo D ubicado a 6°42'28.24"S 79°54'48.62"W que se obtuvo una concentración promedio de G2 interior 109.7 Bq/m³ y en modo desnudo (bare mode) 133.9 Bq/m³ con tipo de suelo arena pobremente gradada de material granular.
9. En las figuras 24 al 27, se puede observar un valor mínimo de concentración de radón 222, que coincide con las épocas de cultivos de arroz en la cual el nivel de la napa freática se eleva considerablemente y además coincide con la época de verano (aumento de temperatura).
10. La alta concentración de radón 222 y su progenie obtenida en el pozo C, que sobrepasa los límites permisibles según la norma nacional que indica como máximo permisible 200 Bq/m³ y por tratarse de una zona en proceso de población y de urbanización, se prevé efectuar un informe de esta investigación al teniente gobernador de la localidad

de Lambayeque, con la finalidad de que estos resultados sean tomados en cuenta cuando se proyecten futuras construcciones y proyectos de urbanización.

Recomendaciones

Después de realizar el análisis de los resultados obtenidos en esta investigación para determinar el nivel de concentración de radón 222 en suelos urbanos de la ciudad de Lambayeque, se recomienda para futuras investigaciones:

1. Realizar estudios similares con un mayor número de pozos por área, para obtener un mapeo adecuado de radón 222 proveniente de suelos del distrito de Lambayeque.
2. Hacer un estudio exhaustivo sobre la variación de la napa freática, y su relación con la exhalación de radón 222.
3. Hacer estudios similares en otras zonas del Distrito de Lambayeque, para lo cual se necesita mayor presupuesto, para poder establecer cuáles serían las zonas mejor habitables y con un menor riesgo para la población.

Referencias Bibliográficas

1. Acosta, V. et al (2014). *Física Moderna*. México. Harla S.A.
2. Agencia de protección Ambiental de EEUU (EPA). Recuperado de <https://espanol.epa.gov/cai/acerca-del-radon>
3. Alonso, H (2015). *El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas del as Islas Canarias Orientales* (Tesis Doctoral) Universidad de las Palmas de Gran Canaria. España
4. Cinelli,G., Tositti, L., Capacicioni, B., Brattich, E., y Mostacci,D. Soil gas radon assessment and development of a radon risk map in Bolsena, Central Italy. Springer. DOI 10.1007/s10653-014-9649-9
5. Cohen,B.L. & Cohen, E.S (1983). *Theory and practice of radón monitoring with charcoal adsorption*. Health Pyhs.
6. Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., ... Doll, R. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 330(7485), 223. <http://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
7. Distrito.pe Lambayeque. Recuperado de <https://www.distrito.pe/distrito-lambayeque.html>
8. Efstratios, G. Vogiannis and Dimitrios, N. (2014). *Radon Spources and Associated Risk in Terms of Exposure and Dose*. *Front Public Health*. 2:207. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4283434/>

9. Eisberg, R. y Resnick, R. (2006). *Física Cuántica*. México. Limusa Noriega Editores
10. Ferrer, A. (2003). *Física Nuclear y de Partículas*. Valencia, España. QUILES Artes Gráficas S. A. Universitat
11. Foth, H (1990). *Fundamentals of soil science*. Michigan State University. Eighth Edition
12. Frutos, B (2010). *Protección frente a la inmisión de gas Radón en edificios*. España. Consejo de Seguridad Nuclear
13. Gerrard, J. (2000). *Fundamentals of soil*. Published Routledge
14. Gómez, I (2016). *Flujo de radón en suelo para uso habitacional en la ciudad de Fresnillo, Zacatecas* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas. México
15. González, K (2018). *Correlación de las variables meteorológicas y físicas del suelo, con la concentración de Radón en el mismo, en ocho puntos de la periferia de la ciudad de Cuenca, Ecuador*” (Trabajo de Titulación). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
16. González, M (2017). *Medición de la concentración de radón 222 en viviendas unifamiliares en la provincia de Lambayeque-2017* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo- Lambayeque.
17. González, M., Pereyra, P., López, M., Palacios, D., Guevara, C y Castañeda, J (2020). *Medición de radón-222 en interiores de la vivienda de la Provincia de Lambayeque, Perú utilizando detectores LR 115*. *Pakamuros*, 9(1), 54-65.
<https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v9i1.163>

18. Guevara, C (2019). *Medición de Radón-222 en Lima Metropolitana utilizando tres tipos de detectores de Trazas Nucleares* (Tesis de maestría). Universidad Pontificia Católica del Perú. Lima.
19. Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI- PNUD-PER/02/051 (2003). *Mapa de peligros de la Ciudad de Lambayeque*. XXX
20. Instituto peruano de Energía Nuclear IPEN. (1997). *Reglamento de seguridad radiológica*. DS. N°099-97-EM. Recuperado de http://www.ipen.gob.pe/transparencia/regulacion/normatividad/ds009_97em.pdf.
21. International Agency for Research on cáncer. Recuperado de <file:///C:/Users/Acer/Downloads/mono43.pdf>
22. Kodalpha Radon- *Dosimeters and LR 115 SSNTD Specifications*. Recuperado de www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf
23. Lantz, P., Mendez, D., y Philbert M. (2013). Radon, smoking, and lung cáncer: the need to refocus radón control policy. *US National Library of Medicine National Institutes of Health* 103(3).443-7. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3673501/>
24. López, F; y Canoba, A (2001). *Estudios teóricos de la adsorción de gas Rn 222 en carbón activado*. Argentina. Autoridad Regulatoria Nuclear.
25. Manual de la OMS sobre el radón en interiores. (2015). *Una perspectiva de salud pública*. Recuperado de: apps.who.int/iris/bitstream/10665/161913/1/9789243547671_spa.pdf

26. Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social (2019). *Guía El gas Radón en el ámbito laboral*. España. Secretaría de Salud Laboral y Medio Ambiente
UGT-CEC
27. Municipalidad provincial de Lambayeque. Recuperado de
http://www.munilambayeque.gob.pe/ubicacion_geografica.php
28. Organización de las Naciones Unidas (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
29. Organización Internacional de Energía Atómica. Recuperado de https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1651_S_web.pdf
30. Organización Mundial de la Salud (2016). *El Radón y sus efectos en la salud*.
Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>
31. Ortiz, J (2004). *Decaimiento Radiactivo*. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. IPB
32. Otton, J (1992). *The geology of Radon*.US. Department of the Interior
33. P. Vikotich, V. et al (2002). Radon concentrations in soil of the city of Podgorica, Montenegro. *Geofísica Internacional*, 41(3), 277-280.
34. Pérez, B., López, M., Palacios, D. (2020) Theoretical and experimental study of the LR-115 detector response in a non-commercial radón monitor
35. Quindós, L (1995). *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa*.
Universidad de Cantabria. Consejo de Seguridad Nuclear

36. Rojas, J (2016). *Monitoreo de Radón en la zona sur de Lima*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.
37. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2020). *Normas del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)*. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
38. Sánchez, S (2013). *Planeamiento Estratégico. Desarrollo de un diagnóstico*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Recuperado de <https://es.slideshare.net/branlyhuacchillocordova/diagnostico-de-lambayeque>
39. Smith, T et al (2007). *Ecología*. Madrid. Pearson Education. S.A.6ta Edition
40. Stephen, M (2000). *Essentials of Geology*. Sixth Edition.
41. Torres, J. (2018). *Estudio del radón 222 y su progenie proveniente del suelo en la estación meteorológica Hipólito Unanue-PUCP* (Tesis de maestría). Universidad Pontificia Católica del Perú. Lima.
42. Universidad Nacional de Ingeniería. Centro Peruano de Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres. (2018). *Estudios de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de Lambayeque*
43. Vilcapoma, L. (2019). *Medición de radón en suelos de la ciudad de Lima durante el periodo 2016-2017* (Tesis de maestría). Universidad Pontificia Católica del Perú. Lima.

44. Vilcapoma, L., López, M., Pereyra, P., Palacios, D., Pérez, B., Rojas, J y Sajo, L (2019). Measurement of radon in soils of Lima City- Peru during the period 2016-2017. *Earth Sciences*. 23(3). 171-183.
45. Weather Spark. Informes climatológicos. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/h/y/19287/2020/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2020-en-Lambayeque-Per%C3%BA#Figures-Temperature>.

Anexos

ANEXO I

INSTALACIÓN DE POZOS EN SUELOS DEL DISTRITO DE LAMBAYEQUE

SELECCIÓN DE UBICACIÓN DE POZOS DE ESTUDIO



PERFORACIÓN DE LOS POZOS CILÍNDRICOS EN ESTUDIO



INSTALACIÓN DE TUBOS PVC EN LOS PUNTOS DE ESTUDIO



INSTALACIÓN DE TUBOS PVC EN LOS PUNTOS DE ESTUDIO



INSTALACIÓN DE CÁMARAS DE DIFUSIÓN G2 EN EL INTERIOR Y EXTERIOR DE CADA POZO



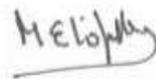
CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, MARÍA ELENA LÓPEZ HEREDIA, Asesora de Tesis, de la doctorante MARÍA ASUNCIÓN GONZÁLEZ ESQUECHE.

Titulada: **DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RADÓN 222 PROVENIENTE DE SUELOS EN EL DISTRITO DE LAMBAYEQUE AÑO 2019**, luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud de 13% verificable en el reporte de similitud del programa Turnitin.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender las tesis cumple con todas las normas para el uso de las citas y referencias establecida por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Lambayeque, 23 de abril de 2022



MARÍA ELENA LÓPEZ HERRERA
ASESORA

Se adjunta:

- Constancia del Turnitin.
- Recibo digital
- 1ra. Página del porcentaje de similitud

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RADÓN 222 PROVENIENTE DE SUELOS EN EL DISTRITO DE LAMBAYEQUE AÑO 2019

INFORME DE ORIGINALIDAD

| | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 13% INDICE DE SIMILITUD | 13% FUENTES DE INTERNET | 1% PUBLICACIONES | 3% TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|--|---------------|
| 1 | www.who.int Fuente de Internet | 1% |
| 2 | www.fao.org Fuente de Internet | 1% |
| 3 | oa.upm.es Fuente de Internet | 1% |
| 4 | www.conama.org Fuente de Internet | <1% |
| 5 | hyperphysics.phy-astr.gsu.edu Fuente de Internet | <1% |

MARÍA ELENA LÓPEZ HERRERA
ASESORA



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: **Mariá Asunción González Esqueche**
Título del ejercicio: **Nueva revision tesis MAGE**
Título de la entrega: **NUEVA REVISIÓN MAGE**
Nombre del archivo: **IS_DOCTORAL_-_MAR_A_ASUNCI_N_GONZ_LEZ_ESQUECHE_16...**
Tamaño del archivo: **2.16M**
Total páginas: **92**
Total de palabras: **21,251**
Total de caracteres: **99,919**
Fecha de entrega: **23-abr.-2022 01:26p. m. (UTC-0700)**
Identificador de la entrega: **1818231626**



Derechos de autor 2022 Turnitin. Todos los derechos reservados.

MARÍA ELENA LÓPEZ HERRERA
ASESORA