

Medición de los niveles de gas radón intramuros en la región La Baja del municipio de California, Santander, asociados a la anomalía de uranio y sus implicaciones geomédicas

Karen Yulissa Bolívar Bohórquez y Andrea Juliana Muñoz Salazar

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Katherine Andrea León Palma

Geóloga M. Sc

Codirector

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Principalmente a Dios por cuidarme y protegerme todos los días de mi vida, por guiar mis pasos siempre y por permitirme llegar donde estoy.

A mi mamá por su constante apoyo, por ser una mujer luchadora, por siempre encomendarme en sus oraciones y por darme su amor incondicional.

A mi papá por ser el hombre más trabajador del planeta, por su ayuda y por creer en mí y en mis hermanas firmemente.

A mis hermanas Sofía y Paula, por todo el apoyo que me brindan, por ser mis amigas y compañía, por estar pendientes de mí siempre, las amo.

A Kevin, mi amor, por su paciencia y comprensión, por brindarme su amor sincero y sobre todo por escucharme y darme su apoyo en los momentos más difíciles.

A la memoria de mi nonita Rosa, porque ella con su amor siempre me inculcó que el estudio es una de las cosas más importantes en la vida.

A mis amigas BLAT, porque desde primer semestre fueron mi compañía y me brindaron una sincera amistad, les deseo muchos éxitos futuras colegas.

Andrea Muñoz

A mi mami por siempre estar conmigo, por animarme cuando me sentía desmotivada, por darme esperanza y por todo su amor incondicional.

A mi papi por creer en mí desde el principio y apoyarme económicamente durante toda mi educación y formación profesional.

A mi hermanita por hacerme reír todos los días y distraerme cuando estaba estresada.

A Héctor, por haber sido mi apoyo durante casi toda mi carrera y mi mejor compañía.

A la memoria de mi nonita Leo, porque gracias a ella y su infinito amor, nunca me rendí, estudié lo que me gustaba y en la universidad que quería.

Karen Bolívar

Agradecimientos

Principalmente a la profesora y directora del presente proyecto Katherine León, por su constante ayuda, por instruirnos, corregirnos y depositar su confianza en nosotras para la elaboración de la investigación. Por su apoyo económico al poner en nuestras manos el equipo *Radon Eye Plus*, con el cual se realizaron las mediciones.

Al profesor Andrés Cáceres por sugerirnos la zona de estudio y hacernos comprender de una mejor forma su geología desde el punto de vista metalogénico, por su paciencia a la hora de explicarnos la formación de la anomalía de uranio.

A la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, por su ayuda con el préstamo del equipo de medición gamma espectral.

Al profesor Gabriel Valderrama, por su ayuda en la corrección y escritura del presente documento.

A la señora Susana, habitante de La Baja, porque desde el primer día que inició esta investigación, aun sin conocernos, nos brindó su cariño, apoyo incondicional y nos ayudó a generar confianza entre sus vecinos.

A los habitantes de La Baja que nos prestaron sus hogares y cuidaron el equipo de medición con mucha responsabilidad y a las personas que nos transportaron desde el centro de California hasta La Baja sin esperar nada a cambio.

Tabla de contenido

Introducción.....	12
1. Justificación y planteamiento del problema	14
2. Objetivos.....	16
2.1 Objetivo General	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3. Marco Conceptual	17
3.1 Conceptos asociados al radón	17
3.1.1 Isotopos estables y no estables.....	17
3.1.2 Radiactividad natural.....	17
3.1.3 Isótopos de uranio	19
3.1.4 Cadena de desintegración del U-238.....	19
3.1.5 Radón-222.....	21
3.1.6 Medición del gas radón.....	22
3.1.7 Unidades de medición de gas radón.	24
3.1.8 Mecanismos de ingreso del gas radón en las viviendas	25
3.1.9 El gas radón y su afectación a la salud	25
3.2 Estado del arte en la medición de gas radón intramuros	26
3.2.1 A nivel internacional	26
3.2.2 A nivel nacional	29
3.3 Normativa para gas radón intramuros	30
4. Marco Geológico.....	31

4.1 Localización.....	31
4.2 Geología.....	33
4.3 Tectónica.....	36
4.4 ¿A qué se debe la anomalía de uranio en la zona?	38
5. Metodología.....	40
5.1 Fase 1: Localización y sectorización de la anomalía de uranio que se encuentra presente en la región La Baja del municipio de California, Santander	40
5.2 Fase 2: Obtención y análisis de los valores de radón presentes en la zona de estudio, mediante el detector <i>Radon Eye Plus</i>	41
5.3 Fase 3: Análisis sobre la salud de la población de la región La Baja, haciendo énfasis en las enfermedades asociadas a la exposición al gas radón, basado en las encuestas aplicadas	42
5.4 Fase 4: Generación del mapa e informe final del proyecto	43
6. Resultados y análisis	43
6.1 Anomalía de uranio en La Baja.....	43
6.2 Niveles de radón intramuros en La Baja, California.....	53
6.3 Análisis de las encuestas realizadas	69
6.4 Mapa de amenaza radiactiva de radón en La Baja.....	73
7. Conclusiones.....	76
8. Recomendaciones.....	77
Referencias Bibliográficas.....	79

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Abundancia y tiempo de vida media de cada uno de los isótopos de uranio.....	19
Tabla 2. Cronograma establecido para la toma de datos intramuros	41
Tabla 3. Valores de las mediciones gamma espectrales de U, K y Th tomadas en la zona de estudio	47
Tabla 4. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson	52
Tabla 5. Parámetros de medición del equipo.....	53
Tabla 6. Contenido aproximado de uranio, grado de ventilación e influencia tectónica de cada vivienda	55
Tabla 7. Grado de amenaza radiactiva según el promedio de radón intramural	55
Tabla 8. Nivel de amenaza radiactiva de las viviendas en las que se realizó la medición.....	66
Tabla 9. Resultados sintetizados de las encuestas realizadas	70
Tabla 10. Datos de las personas que han padecido cancer de pulmón en La Baja, según encuestas realizadas	72

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Cadena de desintegración del U-238.....	20
Figura 2. Esquema del funcionamiento interno del detector de cámara de ionización gaseosa....	24
Figura 3. Localización del área de estudio	32
Figura 4. Mapa geológico de la zona, en rojo La Baja, California, Santander.....	34
Figura 5. Fotografía de una falla local en la zona de estudio	37
Figura 6. Fotografías espectrales de las fases en cuestión	39
Figura 7. Equipo de medición <i>Radon Eye Plus</i>	42
Figura 8. Mapa de Gammaespectrometría de Minerales Energéticos (uranio), área La Baja, Calioformia.....	44
Figura 9. Malla de muestreo inicial para la elaboración del mapa de uranio de la región La Baja	45
Figura 10. Mapa de puntos tomados en campo para la elaboración del mapa de uranio en la región La Baja	46
Figura 11. Proceso de medición con el espectrómetro de rayos gamma	46
Figura 12. Histograma de frecuencia y <i>Trend Analysis</i> de los datos de uranio en ppm	49
Figura 13. Mapa de uranio en partes por millón de la región La Baja, California	50
Figura 14. Concentraciones de potasio (%) y torio (ppm) en La Baja.....	52
Figura 15. Localización de las viviendas seleccionadas para la medición de gas radón intramural en la región La Baja, California.....	54
Figura 16. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 1	56

Figura 17. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 2.....	57
Figura 18. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 3.....	58
Figura 19. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 4.....	59
Figura 20. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 5.....	60
Figura 21. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 6.....	61
Figura 22. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 7.....	62
Figura 23. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 8.....	63
Figura 24. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 9.....	64
Figura 25. Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 10.....	65
Figura 26. Resultados porcentuales de los niveles de amenaza radiactiva en La Baja.....	66
Figura 27. Correlación entre las concentraciones de uranio y radón intramuros	67
Figura 28. Mapa de gas radón intramuros en Bq/m ³ de la zona de estudio	74
Figura 29. Mapa de amenaza radiactiva por gas radón intramuros de la zona de estudio	75

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Datos de las mediciones intramurales, procesados en el software *AtmosLight 1.4.0.0*.

Apéndice B. Encuestas aplicadas a los habitantes de La Baja.

Resumen

Título: Medición de los niveles de gas radón intramuros en la región La Baja del municipio de California, Santander, asociados a la anomalía de uranio y sus implicaciones geomédicas *

Autor: Karen Yulissa Bolívar Bohórquez y Andrea Juliana Muñoz Salazar**

Palabras Clave: Radón, Uranio, Anomalía, La Baja, California, Geología médica, Radiactividad

Descripción: El radón es un gas radiactivo que hace parte de la cadena de desintegración del uranio. Es un gas inodoro e incoloro, por lo cual solo se puede detectar con equipos especializados. Se ha demostrado científicamente que este gas, al ser inhalado, representa una amenaza, debido a su relación con el desarrollo de cáncer de pulmón. En el presente estudio se llevó a cabo una medición intramural del gas radón en la región La Baja, del municipio de California, Santander, que cuenta con una de las anomalías de uranio más grandes del país. Para esto se tomó una muestra de diez viviendas y dentro de ellas se instaló el equipo *Radon Eye Plus*, un equipo de medición activa. El instrumento permaneció en cada casa por un periodo de diez días, tomando los niveles de radón cada 10 minutos. Los datos fueron procesados en el software *radonova* de donde se obtuvieron máximos, mínimos, promedio y gráficas de tiempo vs. nivel de radón en Bq/m^3 de cada vivienda. Con las diez mediciones obtenidas se estableció el primer mapa de radón intramuros de la región La Baja, donde se pueden observar zonas con amenaza radiactiva crítica y zonas un poco más moderadas. Este es el cuarto estudio de este tipo realizado en el país y en comparación con los anteriores, este arrojó las concentraciones más altas de radón. El 80% superó los 100 Bq/m^3 establecidos por la OMS como límite permisible de radón intramuros. Además, se realizaron encuestas a las familias de la región para determinar si su salud estaba siendo afectada o no por el radón, y se encontró que 35% de las familias encuestadas ha presentado casos de cáncer de pulmón.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Katherine Andrea León Palma. Geóloga M. Sc. Codirector: Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Geólogo M. Sc.

Abstract

Title: Measurement of intramural radon gas levels in La Baja region of the municipality of California, Santander, associated with the uranium anomaly and its geommedical implications *

Author(s): Karen Yulissa Bolívar Bohórquez and Andrea Juliana Muñoz Salazar **

Key Words: Radon, Uranium, Anomaly, La Baja, California, Medical Geology, Radioactivity

Description: Radon is a radioactive gas formed during the decay chain of uranium. It is an odorless, colorless gas and can only be detected with specialized equipment. Scientific studies have proven that this gas can cause lung cancer when inhaled. In the present investigation, indoor radon levels were measured in La Baja, California, Santander. This region has one of the highest uranium anomalies in the country. For this purpose, *Radon Eye Plus*, an active measurement equipment, was installed in ten houses for ten days, taking radon levels every 10 minutes. The data were processed in the *radonova* software, obtaining the maximum, minimum, average, and time vs. radon level graphs in Bq/m³ for each house. With the results of the ten measurements, the first indoor radon map of the La Baja region was established. This map showed areas with critical radioactive threats and others with moderate levels. This is the fourth study of this type that has been carried out in the country, and compared to the previous, it showed the highest concentrations. 80% exceeded the 100 Bq/m³ set by WHO as the permissible limit for indoor radon. In addition, families of the region were surveyed to determine whether their health was being affected by radon. According to the survey, 35% of respondents have suffered from critical breathing problems or lung cancer.

* Degree work

** Faculty of Physical Chemistry. School of Geology. Director: Katherine Andrea León Palma. Geologist M. Sc. Co-director: Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Geologist M.Sc.

Introducción

En la vida cotidiana, los seres humanos se encuentran expuestos al fenómeno de radiación natural, el cual además de ser de origen cósmico, también se produce como consecuencia de la desintegración de elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre. Sin embargo, la radiación natural no es constante en todos los lugares del planeta, por ejemplo, en algunas zonas de la India la radiactividad es 10 veces mayor que la media europea, debido a la composición de las arenas de la India, las cuales contienen torio, un elemento radiactivo natural; asimismo, en los Alpes y otras cordilleras también se tiene un nivel de radiactividad relativamente elevado, debido a la composición granítica de estos orógenos, los cuales contienen uranio, otro elemento radiactivo natural (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2015).

Altos niveles de radiactividad también pueden estar presentes dentro de algunas edificaciones, debido a la construcción de estas sobre litologías que contienen uranio que, junto con la presencia de fallas geológicas y cimientos inadecuados, generan el entorno perfecto para que se concentren los elementos radiactivos. Dicha radiactividad proviene de los elementos que conforman la cadena de desintegración del uranio, entre los cuales se encuentra el radón, un isótopo que puede estar presente tanto en rocas ígneas, como en sedimentarias y metamórficas.

Se ha demostrado científicamente que la exposición prolongada a altas concentraciones de radón-222, tiene efectos cancerígenos en las personas, debido a que este gas, y varios de sus productos de decaimiento como el polonio-218 y polonio-214, emiten partículas alfa, las cuales al ser inhaladas por el ser humano afectan el tejido epitelial de los pulmones, lo que aumenta las probabilidades de padecer cáncer de pulmón (Field et al., 2000).

El radón-222 representa una amenaza radiactiva natural que en Colombia es poco estudiada (Salazar et al., 2004). Hasta la fecha, se han realizado mediciones de radón en estudios espeleológicos en cuevas naturales, también en estudios volcanogénicos, sísmicos y en depósitos hidrotermales (Burbano et al., 2018; Salazar et al., 2004; Díaz et al., 2019). Sin embargo, el estudio de las mediciones de radón en interiores es todavía escaso y no existe un mapa a gran escala de la exposición a este gas en el país (Giraldo et al., 2020).

La región La Baja del municipio de California, localizado en el departamento de Santander, es reconocida por presentar una de las anomalías positivas de uranio más altas en todo el país (Bueno, 1995), lo cual puede ocasionar un riesgo radiológico para la población debido al decaimiento radiactivo de este elemento. En este trabajo de grado, la zona de estudio corresponde al área uranífera de San Antonio y el filón Pie de Gallo ubicados en La Baja.

Geológicamente, el área de estudio se sitúa sobre el Granito de Pescadero y el Neis de Bucaramanga. El granito es considerado como una de las litologías que más contenido promedio (*Clark*) de uranio presentan de acuerdo con Gundersen et al., 1993, debido a su alto grado de diferenciación. Pero esta litología no es responsable del enriquecimiento de uranio en la zona, según el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016), este se generó por fluidos epitermales de características ácidas y oxidadas que lixiviaron y movilizaron los minerales de la roca caja que contienen uranio en su estructura cristalina, tales como zircón, monacita, xenotimo, entre otros; y finalmente el uranio precipitó, en zonas reducidas, en forma de uraninita y cofinita, en donde se concentró en grandes cantidades.

La importancia de la anomalía de uranio en la zona de estudio del proyecto actual radica en que, el radón hace parte de la cadena de decaimiento del uranio. Por ende, al existir grandes concentraciones de uranio, es posible que los niveles de radón sean más altos que el promedio.

De igual manera, la Plancha 110 – Pamplona, del Servicio Geológico Colombiano, muestra en la zona de estudio una falla geológica local, la cual puede influir significativamente, debido a que las fallas y grietas facilitan el transporte del gas radón desde el subsuelo hacia la superficie, en donde puede haber asentamientos humanos.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, este trabajo de investigación surge de la necesidad de evaluar los niveles de gas radón intramuros en la región La Baja del municipio de California, Santander, debido a que la salud de sus habitantes puede estar siendo afectada. Así mismo, la investigación busca proponer soluciones de remediación a corto y largo plazo, según los resultados que se obtengan.

1. Justificación y planteamiento del problema

El radón-222 es un gas noble y radiactivo (BEIR VI, 1999). Este gas es de origen geogénico, es decir, se forma a partir de procesos naturales, como la desintegración de los elementos radiactivos pertenecientes a la cadena de desintegración del uranio-238. En dicha cadena, el isótopo padre uranio-238, que se encuentra contenido en minerales de uranio, presenta una secuencia de decaimientos radiactivos hasta llegar al radio-226, el cual también está contenido en los minerales en estado sólido (ICRP, 1993). Posteriormente, este isótopo, presenta un decaimiento radiactivo y forma el radón-222, el cual se encuentra en estado gaseoso y aprovecha los poros y/o fracturas de la roca para salir a superficie, o para almacenarse en el agua subterránea, ya que es soluble en esta (Canoba et al., 1998).

El radón-222 tiene un tiempo de vida media de 3.8 días, y a su vez, se desintegra en elementos sólidos radiactivos, entre los cuales se encuentra el polonio-218 (BEIR VI, 1999). El

radón, al ser un gas, puede ser aspirado por los pulmones y ocasionar a largo plazo enfermedades respiratorias como cáncer de pulmón, el cual causa anualmente la muerte de 3875 personas en Colombia (Minsalud, 2011). La OMS estima que el radón causa entre un 3 y 14% de todos los cánceres de pulmón en cualquier país, (según la concentración media de radón en el correspondiente país), y por esta razón, el radón es la segunda causa mundial de cáncer de pulmón, después del tabaco.

El municipio de California, Santander, es reconocido por tener uno de los yacimientos de tipo epitermal de alta sulfuración más grandes de Colombia, lo cual hace que sea una zona con una alta demanda de trabajadores mineros. En el área uranífera de San Antonio y en el filón Pie de Gallo, ubicados en la región La Baja, se han detectado en las zonas mineras, en las cuales también hay asentamientos humanos, importantes anomalías de uranio asociadas a minerales como la uraninita y cofinita, lo cual puede representar un riesgo radiológico para la población debido al decaimiento radiactivo del uranio. Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivo medir las concentraciones de radón dentro de un número representativo de las viviendas de la región La Baja, y de esta manera, evaluar si existen zonas de riesgo radiológico para la población, sugerir sistemas de mitigación para evitar la concentración de este gas en los hogares y adicionalmente, indagar la posible afectación de salud en esta comunidad debido a la exposición al gas radón.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Medir los niveles de gas radón, asociados a la anomalía de uranio, mediante el detector de medición activa *Radon Eye Plus*, de forma intramural en la región La Baja del municipio de California, Santander.

2.2 Objetivos Específicos

- Localizar y sectorizar la anomalía de uranio, que se encuentra presente en la región La Baja del municipio de California, mediante mediciones gamma espectrales.

- Analizar a través de los datos obtenidos por el detector, las anomalías de gas radón presentes en la región La Baja del municipio de California, teniendo en cuenta los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en los cuales el umbral para niveles de radón intramuros es de 100 Bq/m³.

- Realizar encuestas de salud a una muestra de la población de la región La Baja del municipio de California, sobre enfermedades asociadas a la exposición al gas radón.

- Generar un mapa de la zonificación de la amenaza radiactiva generada por el gas radón, de la región La Baja del municipio de California, Santander.

3. Marco Conceptual

En este apartado se mencionan todos los conceptos y bases necesarios para comprender el presente estudio, iniciando con los conceptos que se asocian al gas radón, seguidos de un estado del arte de la medición de gas radón intramuros a nivel internacional y nacional, y finalizando con las normas necesarias para evaluar las mediciones del presente proyecto.

3.1 Conceptos asociados al radón

3.1.1 Isotopos estables y no estables

Los isótopos son átomos del mismo elemento que presentan diferente contenido de neutrones y por ello distinto número másico. De los 92 elementos que se encuentran en la naturaleza, se observan 280 isótopos, los cuales se denominan isótopos naturales. Dentro de esta clasificación, se tienen dos subtipos de isótopos: estables e inestables (Rodríguez et al., 2015).

En los isótopos estables se caracterizan porque su núcleo atómico no se desintegra espontáneamente transcurrido un cierto tiempo. Por el contrario, los isótopos inestables, o también llamados radioisótopos, son isótopos radiactivos ya que tienen un núcleo atómico inestable (debido al balance entre neutrones y protones), por lo cual, emiten partículas y energía cuando cambian a una forma más estable. (Redondo, 2008).

3.1.2 Radiactividad natural

La radiactividad natural es el proceso de descomposición espontánea y transformación de los átomos inestables, acompañado por la emisión de partículas nucleares y/o radiación electromagnética (L'Annunziata, 2007). La energía liberada por un radioisótopo (isótopo padre o radiactivo) cuando se convierte en otro elemento (isótopo hijo o radiogénico) da lugar a una emisión llamada radiación ionizante, y esta se da principalmente en forma de rayos alfa, beta

(electrones o positrones) o gamma (energía electromagnética). En donde las partículas alfa tienen carga positiva, las partículas beta son negativas y los rayos gamma son neutrales; y cada tipo de emisión tiene diferente poder de penetración en la materia. La radiación alfa puede recorrer una distancia de apenas unos cuantos centímetros en el aire y puede ser detenida por una simple hoja de papel. La radiación beta puede recorrer una distancia de unos cuantos metros en el aire; puede ser detenida con una placa de vidrio o de madera. Y, la radiación gamma puede recorrer cientos de metros en el aire y se requiere de espesores importantes de plomo o cemento para detenerla (López e Iturbe, 2004). Los principales mecanismos de decaimiento radiactivo según White (2015) son:

- Decaimiento β^- (negatrón): puede definirse como la transformación de 1 neutrón en 1 protón y 1 electrón. Es decir, el número atómico del isótopo hijo se incrementa en uno y el número de neutrones se reduce en uno, quedando el mismo número de masa.

- Decaimiento β^+ (positrón): es la transformación de 1 protón en 1 neutrón + 1 positrón + 1 neutrino. El isótopo hijo tiene el mismo número de masa que el padre, pero un protón menos.

- Decaimiento α (alfa): este tipo de decaimiento ocurre en átomos pesados mayores que el Bismuto. Puesto que las partículas alfa están compuestas por 2 protones y 2 neutrones, la emisión de una de estas partículas reduce en dos unidades el número atómico y en cuatro unidades al número de masa.

- Decaimiento γ (gamma): se presenta en núcleos con un nivel energético excitado. La composición del núcleo no se ve alterada y solo se emite un fotón con un alto nivel de energía en forma de ondas electromagnéticas; normalmente acompañada de procesos de fisión (ruptura de un núcleo en dos partes más estables que la inicial); no posee carga eléctrica, tiene naturaleza ondulatoria.

3.1.3 Isótopos de uranio

El uranio es un elemento radiactivo natural, compuesto por 3 isótopos radiactivos: el uranio-238 el más abundante; el uranio-235 utilizado en los reactores nucleares dada su capacidad de fisionarse, es decir, de dividir su núcleo al capturar un neutrón incidente; y el uranio-234, el menos abundante (Cuney, 2008), tal como se muestra en la Tabla 1. Estos tres isótopos tienen el mismo comportamiento químico, pero tienen diferentes propiedades radiactivas. El uranio U-238 presenta la cadena de desintegración radiactiva más extensa de este elemento y uno de sus subproductos es el radón-222, el cual es el isótopo de radón más abundante y con el tiempo de vida media más largo, por lo que es aquel que se puede medir mejor. No obstante, el radón también está presente en otras cadenas de decaimiento, como la del U-235 y T-232, en donde su tiempo de vida media es de 3.96 y 55 segundos, respectivamente.

Tabla 1

Abundancia y tiempo de vida media de cada uno de los isótopos de uranio

Isótopos de U	N. de protones	N. de neutrones	N. de electrones	N. másico	Abundancia	Tiempo de vida media (años)
U-234	92	142	92	234	0.0054 %	4.488×10^9
U-235	92	143	92	235	0.72 %	0.7038×10^9
U-238	92	146	92	238	99.28 %	4.469×10^9

Nota. Modificado de Clark, 1966 y Cuney, 2008.

3.1.4 Cadena de desintegración del U-238

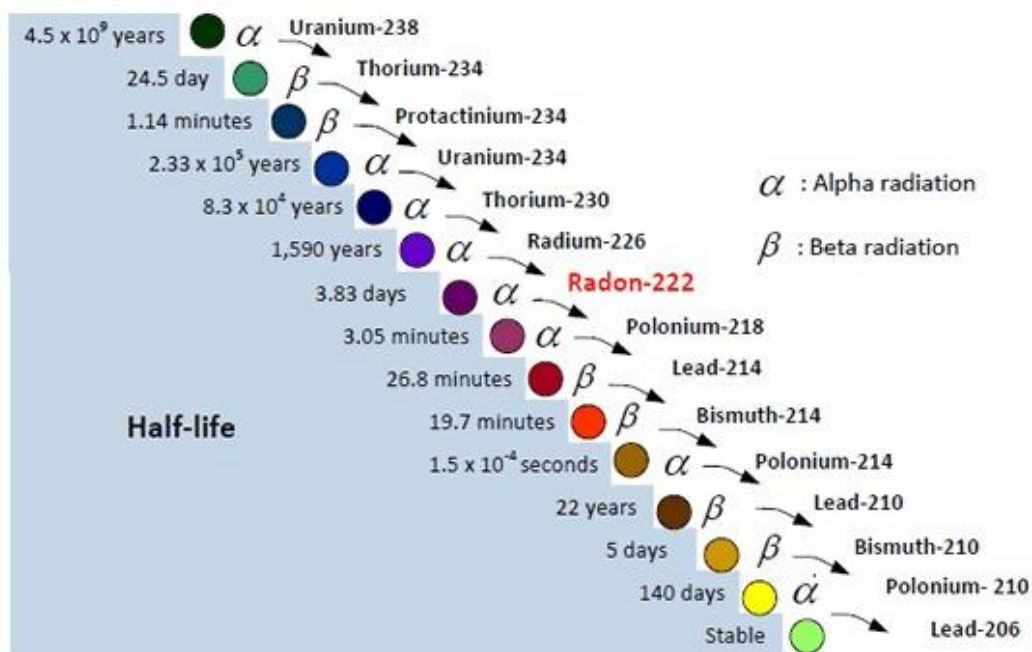
La cadena de desintegración radiactiva del U-238 es compleja y produce radiación alfa, beta y gamma. Como se puede observar en la Figura 1, esta cadena de desintegración consta de 15 reacciones de decaimiento y en cada una se muestra los mecanismos de decaimiento más

probables, con su tiempo de vida media respectiva. Y, el producto final de esta cadena siempre es plomo (Pb-206), el cual es un isótopo estable.

La gran mayoría de los isótopos pertenecientes a la cadena de desintegración del U-238 se encuentran en estado sólido, a excepción del radón-222, el cual se encuentra en estado gaseoso. Al ser un gas, su movimiento es de mucha mayor intensidad en comparación a los demás isótopos sólidos, razón por la cual el gas radón es capaz de salir hacia la superficie, aprovechando las porosidades primarias y secundarias de la roca; lo cual genera aproximadamente un 65% de la amenaza radiactiva natural terrestre.

Figura 1

Cadena de desintegración del U-238



Nota. Tomado de Canadian Nuclear Safety Commission, 2012.

3.1.5 Radón-222

El radón es un gas inodoro, incoloro, insípido y radiactivo, 7.5 veces más pesado que el aire, soluble en agua y en líquidos orgánicos. Existen varios isótopos de este elemento, de los cuales el radón-222 es el más abundante en la naturaleza (más del 80% de todo el radón). Su periodo de semidesintegración es de 3,8 días, el más duradero en comparación con los otros isotopos de radón; y sus descendientes son el polonio-214 y el polonio-218, estos tienen una vida media muy corta y emiten en su desintegración partículas alfa, las cuales son carcinógenas (ICRP, 1993). Por esta razón, el radón se considera la primera causa de cáncer pulmonar en personas no fumadoras y la segunda causa en personas fumadoras (OMS, 2015).

El gas radón tiende a acumularse en sótanos mal ventilados y casas aisladas que están construidas sobre tipos específicos de suelo o roca madre rica en minerales de uranio. Dado que es un gas inodoro e incoloro, puede pasar desapercibido en los hogares durante años. Sin embargo, una vez identificado el peligro del gas radón, este se puede mitigar fácilmente y los hogares pueden volverse seguros, realizando algunas modificaciones en las construcciones (Guevara, 2018).

Los principales factores que generan anomalías en las concentraciones de gas radón en el suelo son: la presencia de fallas activas y la litología presente (Salazar et al., 2004). La mayoría de los materiales geológicos naturales contienen una pequeña cantidad de uranio, normalmente entre una y tres partes por millón (ppm). La concentración de uranio suele ser aproximadamente la misma en los suelos derivados de una roca, que en la roca fuente original. Sin embargo, algunos tipos de rocas (y suelos) tienen concentraciones iniciales mucho más altas de uranio, que van hasta 100 ppm o más. Los tipos de rocas que tienen más probabilidades de causar problemas de radón en interiores incluyen lutitas negras carbonáceas, areniscas que contienen glauconita, ciertos tipos de areniscas fluviales y sedimentos fluviales; fosforitas, rocas carbonatadas que producen karst,

ciertos tipos de depósitos glaciales, bauxita, rocas graníticas, rocas metamórficas de composición granítica, rocas volcánicas ricas en sílice, muchas rocas cortadas o falladas, algunos carbones y ciertos tipos de rocas metamorfoseadas de contacto. Mientras que los tipos de rocas con menos probabilidad de causar problemas de radón incluyen arenas marinas de cuarzo, lutitas y limolitas no carbonosas, ciertos tipos de arcillas, rocas metamórficas e ígneas pobres en sílice y basaltos (Gundersen et al., 1993).

Otros factores que controlan los niveles de gas radón intramuros, como la temperatura y la precipitación, han sido estudiados previamente por Schubert et al. (2018) y Arvela et al. (2015), respectivamente. En donde se determinó que, a menores temperaturas del aire con respecto al suelo, aumentan las concentraciones de gas radón, debido a que un mayor gradiente de temperatura facilita la movilización del radón. Por otra parte, a mayores precipitaciones, aumentan los niveles de gas radón. Sin embargo, esta última correlación aún no tiene un consenso establecido, ya que estudios posteriores, como el de Mullerova et al. (2017), han encontrado correlaciones negativas entre la precipitación y los niveles de gas radón (Domínguez, 2021).

3.1.6 Medición del gas radón

Generalmente se conocen dos métodos para medir el gas radón: una medición pasiva y una activa (Miles, 2004). Las mediciones pasivas no requieren corriente eléctrica para realizar mediciones de los niveles de gas radón, pero no son de lectura directa, mientras que las mediciones activas requieren electricidad y permiten obtener un registro continuo de la concentración y las fluctuaciones del gas durante el periodo de medición (OMS, 2015).

Según Miles (2004), dentro de los detectores pasivos se pueden encontrar detectores de carbón, en los cuales el radón adsorbido en el carbón se desintegrará y los productos de desintegración formados se conservarán, lo que permitirá medir el radón adsorbido mediante

espectrometría gamma. También se encuentran las cámaras iónicas de electretos, en las cuales el radón se difunde en el volumen de la cámara y el electreto pierde carga debido a la ionización general del aire producida por el radón y sus productos de descomposición en el volumen de la cámara, para observar los resultados de estos métodos, se requiere enviar el dispositivo a un laboratorio. Otro equipo de medición pasiva es el detector de trazas grabadas, el cual se basa en el uso de un material plástico para registrar las huellas de partículas alfa del radón y sus productos de descomposición, cuando entra en contacto con dicho material.

Por otro lado, se encuentran los detectores activos, entre los cuales están las células de centelleo y finalmente las cámaras de ionización, este último método permite que el aire ingrese a la cámara y esta detecta la corriente causada por la ionización del radón y sus productos de decaimiento; y depende de la tecnología del instrumento distinguir de qué elemento proviene la radiación (Miles, 2004).

Es importante mencionar que la medición pasiva puede verse afectada por condiciones climáticas como temperatura y humedades extremas (superiores a 80%), ya que éstas provocan valores erróneos de medición (Sánchez, 2022). Debido a las altas humedades que se presentan en la región La Baja, California, en el presente estudio se ha optado por un dispositivo de medición activa llamado *Radon Eye Plus*, el cual cuenta con el sistema de cámara de ionización pulsada estructurada dual, un circuito de detección de alta precisión.

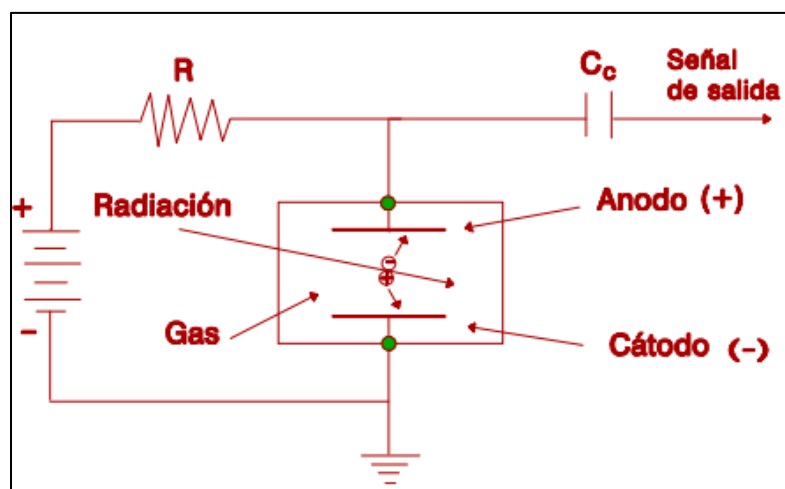
Para comprender mejor las bases teóricas del equipo a utilizar, es necesario mencionar que uno de los principales efectos de la radiación al atravesar la materia, es la producción de carga. Cuando la radiación ionizante atraviesa un gas, provoca la ionización de una parte de sus átomos y, por consiguiente, la liberación de iones positivos y electrones negativos. Entonces, el gas que inicialmente se comportaba como un aislante, pasa a ser parcialmente conductor. Por lo tanto, para

determinar la intensidad de radiación de una muestra, basta con medir la corriente eléctrica que por esta circula (CSN, 2009).

Los detectores de cámaras de ionización presentan un circuito lleno de un gas a presión en el que se disponen dos electrodos a los cuales se les aplica una tensión de polarización, creando un campo eléctrico en el interior del detector, como se muestra en la Figura 2 (CSN, 2009).

Figura 2

Esquema del funcionamiento interno del detector de cámara de ionización gaseosa



Nota. Tomado de CSN, 2009.

3.1.7 Unidades de medición de gas radón.

La radiactividad se mide en una unidad conocida como picocurio (pCi), que es aproximadamente igual a la cantidad de radiación producida por la descomposición de dos átomos de un elemento inestable por minuto (Kusky, 2015). Sin embargo, el Curio no es una unidad establecida en el Sistema Internacional de Unidades, por lo que la mayoría de los países en el mundo usan el Becquerelio (Bq), esta unidad es más pequeña que el Curio, un Curio equivale a 3.7×10^{10} Bq, y para la medición de los niveles de gas radón, se utiliza la unidad Becquerels

por metro cúbico (Bq/m^3), esto representa la actividad radiactiva de un metro cúbico de aire con radón (Domínguez, 2021).

3.1.8 Mecanismos de ingreso del gas radón en las viviendas

Las concentraciones de radón en el suelo varían entre 10000 y 50000 Bq/m^3 y según Ramírez et al. (2011), el ingreso o desplazamiento de este gas desde el subsuelo hasta el interior de las construcciones se puede dar a través de tres mecanismos. El primer mecanismo es la emanación, en la cual los terrenos permeables y fracturados, permiten que el radón salga con mayor facilidad del subsuelo e ingrese a aquellas viviendas construidas con materiales porosos. El segundo mecanismo es la advección, esta se da por las diferencias de presión entre el subsuelo y el interior de las viviendas; el radón tiene la capacidad de movilizarse con pequeñas diferencias de presión y es por esto que la advección es el principal mecanismo por el cual el radón se desplaza en el subsuelo; además, una vivienda que no cuente con ventilación constante, estará creando diferencias de presión entre esta y el subsuelo y de esta forma, generando mayores concentraciones de gas radón. Finalmente, el tercer mecanismo es la difusión, esta se da debido a que el átomo de radón tiene la capacidad de atravesar materiales con el transcurso de un determinado tiempo, y este tránsito de flujo gaseoso depende de factores como densidad, porosidad del material, etc.

3.1.9 El gas radón y su afectación a la salud

La relación entre las muertes por problemas respiratorios y las altas concentraciones de radón han sido evidenciadas desde el siglo XVI, sin embargo, fue en 1988 cuando el radón se declaró formalmente como un agente cancerígeno (Field, 2015). Desde entonces se ha seguido investigando y algunos estudios proponen que el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón aumenta un 16 % por cada 100 Bq/m^3 de incremento en la concentración a la que está expuesta una persona de manera continua (Darby et al., 2005).

La OMS estima que el radón causa entre el 3 y el 14% de todos los cánceres de pulmón en cualquier país. Domínguez (2021) menciona que, si bien la mayoría de los estudios han asociado el radón en altas concentraciones con el cáncer de pulmón, otros han logrado asociar aumentos en las concentraciones de radón con incrementos en mortalidad por Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) (Turner et al., 2012), cáncer de cerebro (Ruano et al., 2017), Alzheimer (Lehrer et al., 2017) y cáncer de estómago cuando es ingerido por medio del agua (Auvinen et al., 2005). Otros padecimientos como leucemia, cáncer de tráquea o daño en el sistema vascular, también pueden estar relacionados al radón (Espinosa y Ángeles, 2018).

3.2 Estado del arte en la medición de gas radón intramuros

3.2.1 A nivel internacional

Desde hace varias décadas, en países tanto desarrollados como en vía de desarrollo, se han realizado diferentes proyectos e investigaciones en mediciones de gas radón intramuros, debido a que este es un agente carcinógeno, cuando se es inhalado por periodos prolongados de tiempo, tal como lo ha declarado la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (USEPA) y la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) (Ruano et al., 2014).

Países desarrollados como Reino Unido, Irlanda, Estados Unidos, Canadá, Suecia, España e Italia cuentan con normativas en donde se establecen normas de seguridad básicas que regulan la exposición al gas radón y también cuentan con mapas de exposición a este gas en la mayor parte de su territorio, en donde clasifica la concentración por entidades geográficas administrativas (condados, municipios) o por cuadrículas (Ruano et al., 2014).

Uno de los países más avanzados respecto a este tema es Reino Unido, debido a que, desde hace varias décadas este país puso en marcha un Plan Nacional de Radón y ha realizado aproximadamente 600.000 mediciones intramurales, en las cuales el nivel de acción es de 200

Bq/m³ (Vive sin Radón, s.f). En el artículo titulado *Exploring the relationship between social deprivation and domestic radon levels in the East Midlands, UK*, publicado por Denman et al., 2019, se mostró un mapa de la distribución geográfica de las viviendas en Reino Unido con concentraciones de radón que exceden el nivel de acción, y se analizó una correlación entre bajas concentraciones de radón en los principales centros urbanos, con el asentamiento de estos sobre suelos arcillosos de baja permeabilidad y suelos aluviales con bajo potencial de este gas.

En otros países como España, el número de mediciones de radón intramuros desciende a aproximadamente 10.000, y recientemente, el Consejo de Seguridad Nuclear realizó un mapa de exposición al radón residencial con una resolución de 10 x 10 kilómetros. En esta elaboración, participaron la Universidad de Cantabria, la Universidad de Santiago de Compostela y la Universidad Politécnica de Cataluña. Se observó que las zonas que presentan mayor riesgo son: Galicia, el sur y el oeste de Castilla y León, el norte de Extremadura y la Comunidad de Madrid, en donde el subsuelo es fundamentalmente granítico y el granito contiene uranio en altas cantidades (Ruano et al., 2014).

Por otra parte, pese a que, en países en vía de desarrollo como Brasil, Perú, Argentina, Venezuela, Ecuador y otros países de América del Sur y Centro América, se han realizado varios estudios de mediciones de gas radón intramuros en algunas ciudades y distritos de sus respectivos territorios, estos países todavía no cuentan con un mapa de exposición nacional, ni con un enfoque legislativo unificado para combatir la presencia de radón en los hogares (Giraldo et al., 2020).

En América del Sur, una de las primeras mediciones de gas radón intramuros fueron realizadas en 1983, en un trabajo destinado a la medición de 2689 viviendas durante 14 años, en distintas ciudades de la República Argentina. Para ello, se utilizaron como métodos de medición: detectores de trazas nucleares, detectores *electrets* y detectores basados en la absorción en carbón

activado. Los resultados indicaron un valor promedio de gas radón de 41,6 Bq/m³ y algunos valores anómalos que superaban los 200 Bq/m³ (Canoba et al., 1998).

En el 2004, la Universidad de Zulia realizó un estudio de las concentraciones de gas radón en una zona urbana del estado de Zulia, en Venezuela. Para ello, se midieron los niveles de gas radón en el suelo adyacente a 15 casas durante 5 meses, utilizando detectores de trazas *LR-115 Tipo II de la Kodak-Pathe*, y los resultados de las mediciones permitieron la generación de un mapa preliminar de exposición al gas radón. Adicionalmente, en este estudio se realizaron encuestas a 375 habitantes, en donde se tenían en cuenta variables como: edad, sexo, ocupación, consumo de tabaco, convivencia con algún consumidor de tabaco, enfermedades crónicas de vías respiratorias, enfermedades crónicas del sistema digestivo, casos de cáncer en familiares, tiempo de construida la vivienda, tiempo de habitar en ella, tipos de materiales con los que está construida, condiciones de las paredes y el suelo, uso de aire acondicionado, entre otros, dando como resultado cierta correlación entre las zonas con niveles altos de radón y los casos de cáncer estomacal (Viloria et al., 2004).

Un artículo publicado en el 2016, por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, midió las concentraciones de gas radón en residencias y lugares de trabajo en la Ciudad de Riobamba, Ecuador. Este trabajo consideró como factor influyente el material de construcción en la concentración de gas radón, pues muestra concentraciones mayores en materiales como: cemento, concreto, porcelana, granito y mármol: y niveles de exhalación mayores en estos mismos. Por esta razón, se caracterizaron los lugares medidos con base en el material de construcción, y también con base en el número de planta, la ventilación y los años de antigüedad. Esto dio como resultado una mayor concentración de gas radón en residencias antiguas y en laboratorios poco ventilados (Cuadrado y Carrasco, 2016).

3.2.2 A nivel nacional

Salazar y Garzón realizaron las primeras mediciones de gas radón intramuros en algunas edificaciones en 1997, no obstante, la primera medición sistemática de radón, destinada al estudio de la amenaza radiactiva, fue desarrollada en una tesis de pregrado de la Universidad de Caldas y el INGEOMINAS o actual Servicio Geológico Colombiano, en el año 2002. En este trabajo se generó el primer mapa de gas radón en Colombia y Sur América. Dicho mapa del suroriente de Manizales a escala 1:25.000, fue elaborado mediante la instalación de una red de 43 estaciones permanentes en un área de 8 km², y el radón fue medido en el aire intramural, el suelo y las aguas públicas mediante sistemas de cámaras de ionización tipo EPERM, dando como resultados niveles bajos de radón en las aguas públicas, niveles altos en suelos cercanos a fallas geológicas y niveles altos en algunas viviendas, debido a escasa ventilación y a la actividad neotectónica, la cual libera gases a la superficie (Garzón et al., 2002).

En el 2020, la Universidad de Caldas, en asociación con la Universidad de Santiago de Compostela, España y con el Grupo de investigación de promoción de la salud y prevención de la enfermedad (GIPSE), comenzó un estudio piloto de radón residencial desarrollado en la ciudad de Manizales. En este se realizaron 210 mediciones: 173 en la zona urbana y 37 en la zona rural; con detectores tipo alfa-track (CR-39), desde enero hasta junio de 2020. Lo anterior dio como resultado concentraciones menores que 25 Bq/m³, en un 90% de las mediciones y una concentración mayor registrada de 50 Bq/m³ (Giraldo et al., 2020).

Por último, el artículo más recientemente publicado en Colombia fue desarrollado en una tesis de pregrado de la Universidad de los Andes, en un estudio exploratorio de radón residencial en Bogotá y sus municipios aledaños, en junio de 2021. En este se determinaron las concentraciones de radón intramuros mediante el uso de detectores pasivos, los cuales se instalaron

en diferentes residencias durante 35 días. En este trabajo se generó un mapa de radón residencial con 30 puntos de medición, los cuales mostraron resultados de 90 Bq/m³ en promedio y un valor máximo de 407 Bq/m³. Adicionalmente, por medio del ajuste de modelos de regresión lineal y logística, se encontró que la presencia de radón estaba asociada con el aumento en la edad de construcción de las residencias con la medición en sótanos, sin embargo, la relación entre las concentraciones de radón y las variables geológicas no fue clara, lo cual pudo deberse al bajo número de mediciones realizadas por cada litología (Domínguez, 2021).

3.3 Normativa para gas radón intramuros

Varias organizaciones y países han establecido diferentes normativas y legislaciones para proteger a sus ciudadanos de los efectos carcinogénicos del radón. El nivel límite permisible de radón es la máxima concentración de este gas aceptable dentro de las viviendas y constituye un componente importante en los programas nacionales, ya que, de esta manera, se realizan medidas de corrección y mitigación en viviendas que superen dicho nivel. La Organización Mundial de la Salud (OMS) propone un nivel de referencia para minimizar los riesgos derivados de la exposición al gas radón en interiores de 100 Bq/m³, y establece que, si dicho nivel no pudiera alcanzarse en las actuales circunstancias concretas de un país, el nivel de referencia elegido no deberá superar en ningún caso los 300 Bq/m³ (OMS, 2015). Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) establece un nivel de referencia de 148 Bq/m³ y, desde 1986, esta agencia recomienda que primer y segunda planta de las edificaciones se sometan a pruebas para detectar la presencia de radón y se mitiguen aquellas con niveles que excedan el umbral (Canoba et al., 2002). A su vez, los compradores de viviendas tienen derecho a conocer la concentración de radón interior de la vivienda que pretenden comprar, y las empresas de medición de radón deben estar acreditadas (Ruano et al., 2014).

Por su parte, la Unión Europea (UE) publicó en diciembre de 2013 la directiva (2013/59/EURATOM) en la cual se establece 300 Bq/m³ de exposición promedio anual, como nivel admisible de radón en domicilios y lugares de trabajo. E indica que los estados miembros deberían incluir en sus Códigos Técnicos de Edificación el problema del gas radón y cómo solucionarlo (Ruano et al., 2014).

En Latinoamérica y Colombia se espera que paulatinamente se apliquen normativas de protección contra el radón, ya que actualmente no existe ninguna norma para prevenir o mitigar las concentraciones de radón elevadas dentro de construcciones. No obstante, una opción viable para el desarrollo de este trabajo de grado es adoptar el nivel de referencia establecido por la OMS y algunas recomendaciones presentes en su manual sobre el radón en interiores, en el cual se identifican las zonas geográficas donde la población corre un mayor riesgo derivado de la exposición al radón y se concientiza a la opinión pública sobre los peligros para la salud. Adicionalmente, se aborda la cuestión del radón tanto en la construcción de nuevos edificios (prevención), como en los edificios que ya existen (mitigación o corrección) (OMS, 2015).

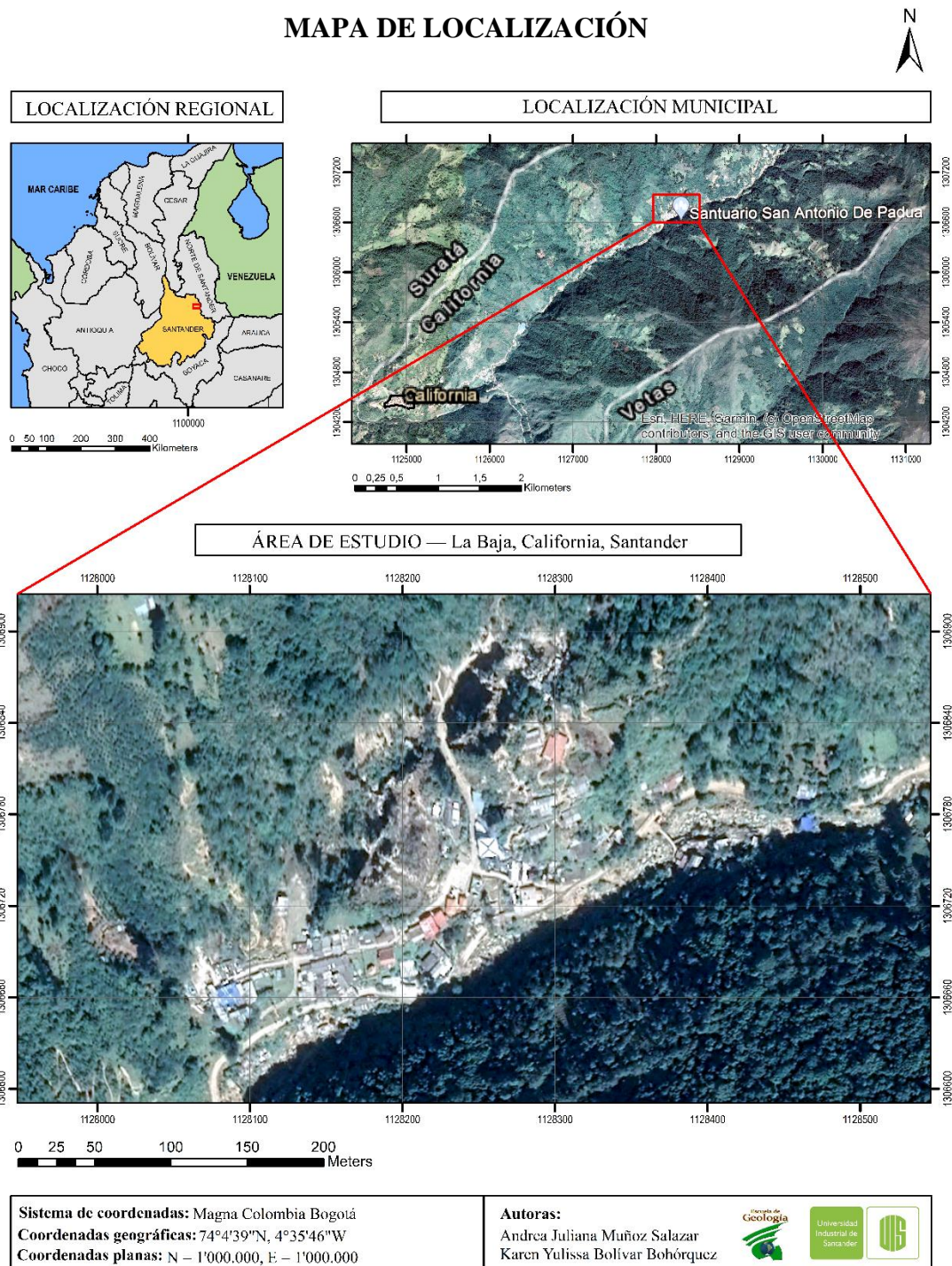
4. Marco Geológico

4.1 Localización

De manera regional, el área de estudio se localiza al NE del departamento de Santander, en el municipio de California, el cual se encuentra ubicado en la provincia de Soto Norte, a 51 km al noreste de la ciudad de Bucaramanga, pasando por los municipios de Matanza y Suratá. Localmente, se encuentra en la región La Baja, dentro de las coordenadas con origen Bogotá, E: 1127960 a E: 1128530 y N: 1306920 a N: 1306610; como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Localización del área de estudio



Nota. Mapa base tomado de Google Earth Pro.

4.2 Geología

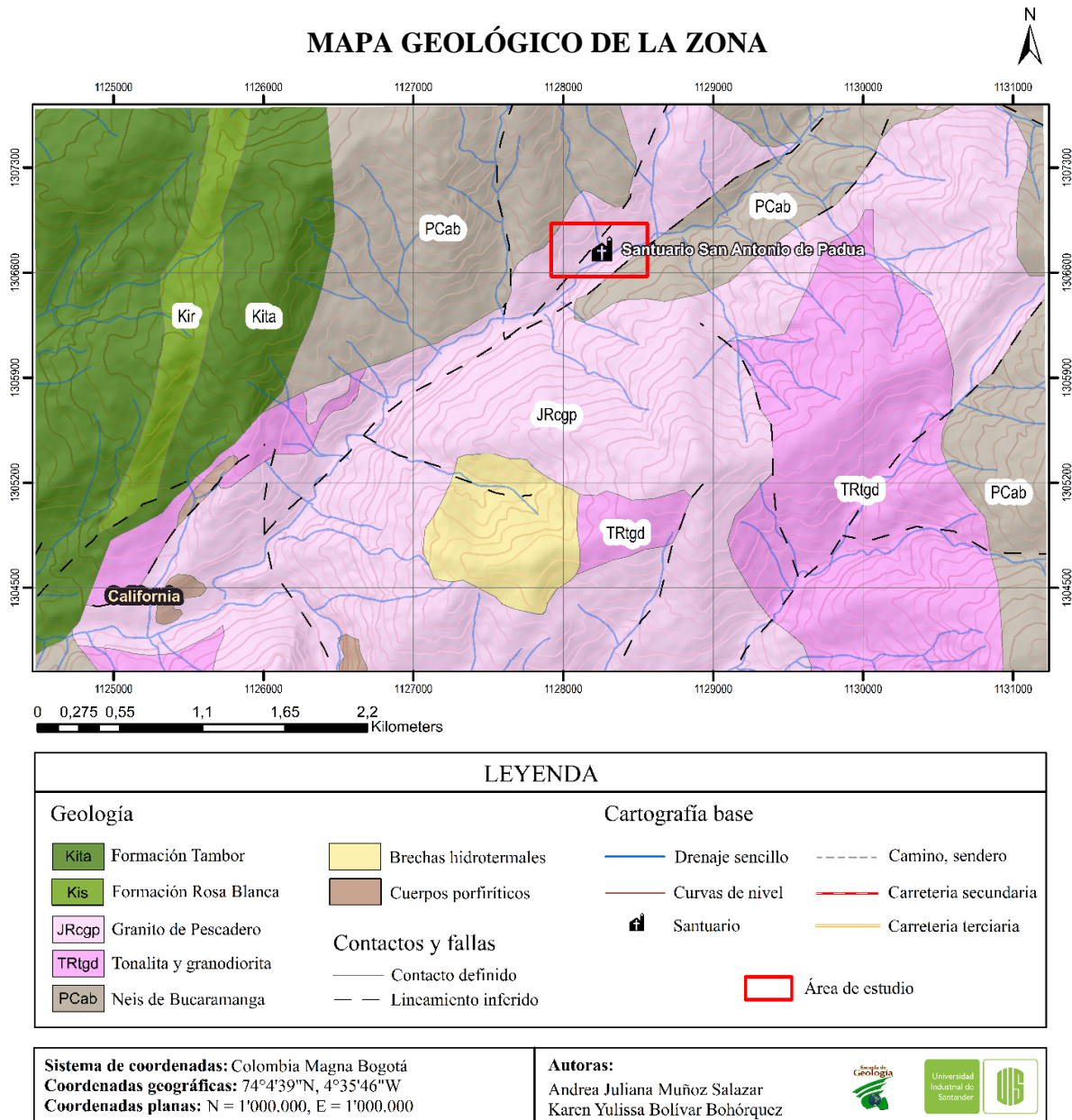
El municipio de California forma parte del Macizo de Santander, el cual está constituido por rocas metamórficas e ígneas, y en menor medida por rocas sedimentarias, las cuales van desde el Proterozoico hasta el Cretácico. También existe presencia de rocas más jóvenes que van desde el mioceno tardío hasta el Plio-pleistoceno, las cuales corresponden a cuerpos porfiríticos, que cortan como diques y sills las litologías ígneas y metamórficas. Además, también hay presencia de brechas hidrotermales producto de eventos magmáticos – hidrotermales (SGC, 2016).

Localmente, en la región La Baja del municipio de California, afloran principalmente dos litologías, las cuales corresponden al Neis de Bucaramanga y al Granito de Pescadero, tal como se observa en la Figura 4. Según el SGC (2016), el Neis de Bucaramanga presenta valores de radiación promedio, mientras que el Granito de Pescadero presenta altos valores de radiación en la zona de estudio.

El Neis de Bucaramanga es la unidad más antigua del basamento ígneo-metamórfico del Macizo de Santander. A esta unidad generalmente se le asigna un rango de edad entre el Precámbrico y el Cámbrico, de 680 ± 140 millones de años (Ma) reportado por Goldsmith et al. (1971) con base en dataciones Rb – Sr en hornblenda de un neis biotítico en la zona de Berlín – Vetas (Urueña y Zuluaga, 2011). El Neis de Bucaramanga se encuentra aflorando en tres fajas: la más occidental, al este de la Falla Bucaramanga-Santa Marta; la central, la cual comprende el área de Berlín y California-Cachirí y la oriental que aparece cerca de Chitagá al sur de Pamplona. En el caso de estudio, es decir, la faja Central aflora una secuencia de neis arenáceo, neis pelítico y neis hornbléndico (SGC, 2016). Hacia los municipios de Vetas y California, el neis está afectado por numerosas intrusiones de granodioritas y leucogranitos, posiblemente relacionado con la intrusión de batolitos Mesozoicos del Macizo de Santander (Jaramillo y Mendoza, 1975); y por

Figura 4

Mapa geológico de la zona, en rojo La Baja, California, Santander



Nota. Geología base tomada del Mapa Geológico Área de California, Santander (Versión 2016), presente en el Geoportal del Servicio Geológico Colombiano; y cartografía base tomada de la plancha 110IC del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

una fuerte actividad hidrotermal evidenciada por la presencia de minerales de alteración como clorita, epidota, feldespato alcalino, sericita y pirita (Urueña y Zuluaga, 2011), la que además ha originado mineralizaciones de Au con edades de 8.4 ± 0.2 y 9.0 ± 0.2 Ma (Mantilla et al., 2009).

El Granito de Pescadero es una roca ígnea intrusiva félsica de color rosado y grano fino, con variaciones a facies porfiríticas. Según Vargas et al. (1981), la roca es típicamente leucocrática. No obstante, es importante tener en cuenta las variaciones litológicas que presenta esta unidad en el departamento de Santander, razón por la cual los intrusivos en el municipio California pueden agruparse en dos unidades petrográficamente diferentes. La unidad más antigua está constituida por una cuarzodiorita con ligeras variaciones a granodiorita y diorita. Mientras que la unidad más joven se constituye por alasquitas, que corresponden a rocas ígneas leucocráticas de grano fino a medio y de composición granito – cuarzomonzonita; y pórfidos (rocas hipoabisales con más de 10 % de fenocristales en una matriz fanerítica holocristalina) de composición granodiorítica, dacítica y andesítica. En el área de estudio del presente proyecto aflora la unidad más joven, es decir, los pórfidos y las alasquitas. Las alasquitas están localmente cortadas por diques aplíticos y de cuarzomonzonita de grano fino y se caracterizan por presentar venillas de cuarzo y alteración hidrotermal, principalmente silicificación y piritización. Por otra parte, las rocas porfiríticas de California se presentan como diques, silos y pequeños cuerpos de forma irregular; y de manera local, aflora un pequeño stock de pórfido granodiorítico a lo largo del Río La Baja, desde la Quebrada Chicaguá hasta la región La Baja. Este stock, llamado stock de La Baja, se extiende en dirección NE, y está compuesto por fenocristales de feldespato y cristales más pequeños de hornblenda y biotita en una matriz compuesta por cuarzo y feldespato con ligera alteración sericítica (Jaramillo y Mendoza, 1975).

La edad de los intrusivos de California se asume que es Triásico-Jurásico (entre 210 y 196 Ma (Mantilla et al., 2013). Por otro lado, la edad de las rocas andesíticas porfiríticas aflorantes en el sector de la quebrada La Baja, fueron datadas mediante el método U-Pb en circones, usando la técnica LA-ICPMS, arrojando una edad de 10.1 ± 0.2 Ma (Mantilla et al., 2011), mientras que la edad de las brechas hidrotermales es 2.63 ± 0.09 Ma (SGC, 2016).

4.3 Tectónica

En general, el Macizo de Santander exhibe tres tendencias estructurales principales al NNE, NNW y WNW (Velandia et al., 2016). El *trend* estructural principal del distrito minero de Vetas – California está definido por las fallas regionales de rumbo sinistral: Bucaramanga – Santa Marta de tendencia NW y Cucutilla de tendencia NE (Ward et al., 1973; Mendoza y Jaramillo, 1979; Parra, 2007). Regionalmente, los patrones de drenaje son paralelos a los lineamientos con tendencia NE y en los afloramientos a lo largo de estos drenajes se evidencia un fracturamiento intenso (SGC, 2016).

Localmente, en la región se ha comprobado la presencia de pliegues sinclinales, diaclasas y de fallas con movimiento pre y post-Cretáceo (Julivert y Téllez, 1963). Gran parte de los lineamientos presentes en la zona de estudio están orientados en sentido NNE y probablemente algunos corresponden a fallas, debido a la presencia de texturas cataclásticas acompañadas por cambios en la orientación e inclinación de las diaclasas y a la presencia de intensas alteraciones y brechamientos en el filón de Pie de Gallo, el cual es un afloramiento presente en la zona de roca - silícea pirítica, con alto registro de radiactividad debido a la presencia significativa de uranio.

Algunos de estos lineamientos corresponden a los cursos de las quebradas Chicaguá, San Juan y La Baja. En la zona de estudio aflora este último y corresponde a la Falla La Baja, una falla de rumbo dextral con tendencia NE-SW y una extensión de 500 a 1500 metros que controla la

mineralización en la parte NW del distrito Minero de Vetas – California (SGC, 2016), a su vez, esta es una posible rama de la Falla de Cucutilla sugerida por Ward et al. (1973), la cual favorece el transporte del gas radón hacia la superficie en la zona (Jaramillo y Mendoza, 1975). Adicionalmente, en la región La Baja aflora una falla sintética a la Falla La Baja, la cual se observa en la Figura 5, tiene un dato estructural de 235/65 y muestra una cinemática dextral, esta genera el brechamiento del filón de Pie de Gallo y en el presente proyecto se nombrará Falla de la Quebrada San Antonio.

Figura 5

Fotografía de una falla local en la zona de estudio



4.4 ¿A qué se debe la anomalía de uranio en la zona?

Una alta diferenciación magmática permite el enriquecimiento en elementos incompatibles y en la mayoría de los granitos, las concentraciones de estos se encuentran incorporadas en los minerales accesorios. Algunos minerales accesorios como el circón, el xenotimo y la monacita son capaces de concentrar uranio dentro de su estructura cristalina, y este elemento puede ser lixiviado de dichos minerales en eventos de alta acidez (SGC, 2016). La roca caja que se encontraba en la zona de estudio, correspondía a una alaska de edad Triásica – Jurásica que, entre sus minerales accesorios, contiene circón, xenotimo y monacita.

Además de la roca caja, otro elemento fundamental para que se lograra la mineralización de uranio en la región La Baja fue el evento de alteración hidrotermal de alta sulfuración que generó fluidos altamente ácidos y oxidados. Este evento detonó la removilización y el transporte del uranio hasta su posterior precipitación, debido a que, el uranio removilizado en estado U^{+6} es reducido rápidamente por la abundancia de H_2S en el sistema, lo cual está relacionado con el evento de alta sulfuración.

Según el Servicio Geológico Colombiano (2016) y Gil y Pacheco (2022), las fases de mineralización del uranio en las cuales se formaron cofinita y uraninita se dividen en dos:

Fase 1. Lixiviación – catalización - recristalización: el circón ($ZrSiO_4$) es un mineral accesorio resistente que, durante procesos hidrotermales muy ácidos, forma mediante reacciones de re-equilibrio químico, soluciones sólidas isoestructurales con algunos minerales como la cofinita ($USiO_4$), debido a que el uranio es un elemento compatible con la estructura del circón y se incorpora como una nueva zona de sobrecrecimiento en su superficie, generando anillos de cofinita pseudomórfica, tal como se muestra en la Figura 6a. A su vez, parte del uranio contenido

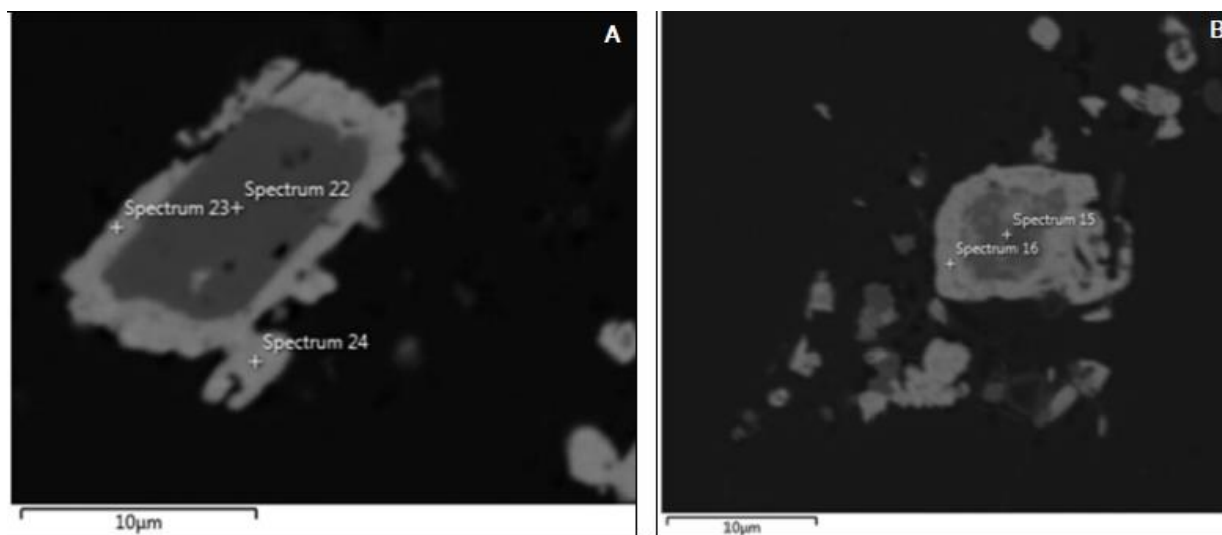
dentro del circón es removilizado por esos fluidos hidrotermales ácidos y oxidados, para su posterior transporte en su estado de oxidación U^{+6} .

Fase 2. Precipitación por reducción: el uranio lixiviado se transportó en su estado móvil U^{+6} y precipitó como uraninita (UO_2) en los bordes de esfalerita y pirita, los cuales son el reflejo de la existencia de ácido sulfhídrico en el sistema, un agente reductor que reduce el U^{+6} a U^{+4} .

Finalmente, se tuvo un proceso de silicificación, el cual atrapó los minerales primarios de uranio formados en la fase 1 de la mineralización. Y se observa que la cofinita es el resultado de procesos de alta acidez sobre circones, y la uraninita sobre xenotimos y monacitas.

Figura 6

Fotografías espectrales de las fases en cuestión



Nota. Figura A: Se muestra un anillo de cofinita pseudomórfica en circón y se observa como los minerales de uranio se forman a partir de la lixiviación del circón. Figura B: Se muestra la lixiviación del xenotimo mostrando la formación de uraninita y su subsecuente separación del mineral principal. Tomado de SGC, 2016.

De acuerdo con la secuencia paragenética propuesta por Rodríguez (2014), la mineralización de uranio habría comenzado en la fase 1, de edad 10 a 8 Ma; tendría su máximo pico y finalización durante la fase 2, de edad de 4 a 3.25 Ma; y en la fase 3 todo el uranio formado sería encapsulado en la sílice hidrotermal que cementó la roca (SGC, 2016).

5. Metodología

Para desarrollar los objetivos específicos propuestos se llevó a cabo la siguiente metodología, dividida principalmente en cuatro fases.

5.1 Fase 1: Localización y sectorización de la anomalía de uranio que se encuentra presente en la región La Baja del municipio de California, Santander

En esta fase se realizó un mapa de anomalía de uranio, basado en la gamma espectrometría. Para ello, primero se realizó una malla o rejilla mediante un software de SIG, con el objetivo de tomar mediciones equidistanciales en la zona de estudio. Posteriormente se tomaron las mediciones en los puntos pre-establecidos en la malla con el Espectrómetro de Rayos Gamma, brindado en calidad de préstamo por la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Finalmente, se descargaron los valores tomados, con su respectiva ubicación y se realizó una interpolación de estos para dar como resultado el mapa de la anomalía de uranio en la región La Baja, California. Es importante mencionar que ya existe en la plataforma del Servicio Geológico Colombiano, un mapa de este tipo, pero no cuenta con una escala detallada, por lo cual, fue de suma importancia para el proyecto actual, contar con un mapa que brindara más información.

5.2 Fase 2: Obtención y análisis de los valores de radón presentes en la zona de estudio, mediante el detector *Radon Eye Plus*

En primer lugar, se realizó una visita de reconocimiento, en la cual se obtuvo el inventario del número de viviendas que existen en la zona de estudio. Se identificó que, en la zona de estudio, que tiene un área de 0.18 km², existen 35 casas y se estableció que realizar las mediciones en diez de estas, es una muestra representativa para el proyecto. También se habló con los pobladores de La Baja acerca del proyecto y se determinó cuáles serían las diez viviendas en las que se tendría el permiso de poner el equipo de medición. En las visitas posteriores, se instaló el equipo *Radon Eye Plus* en los hogares, como se muestra en la Figura 7, y este permaneció en cada vivienda por un lapso aproximado de diez días, tomando mediciones del nivel de gas radón cada diez minutos, para obtener una medición significativa. Adicionalmente, para que las mediciones fueran lo más precisas posibles, se adoptó la sugerencia de la empresa *Radonova*, casa matriz del equipo, la cual precisó que este debía tener un tiempo de descanso, es decir de no medición, de aproximadamente tres horas, entre una vivienda y la otra. El cronograma de las fechas en las cuales se instaló el equipo en cada vivienda se muestra en la Tabla 2.

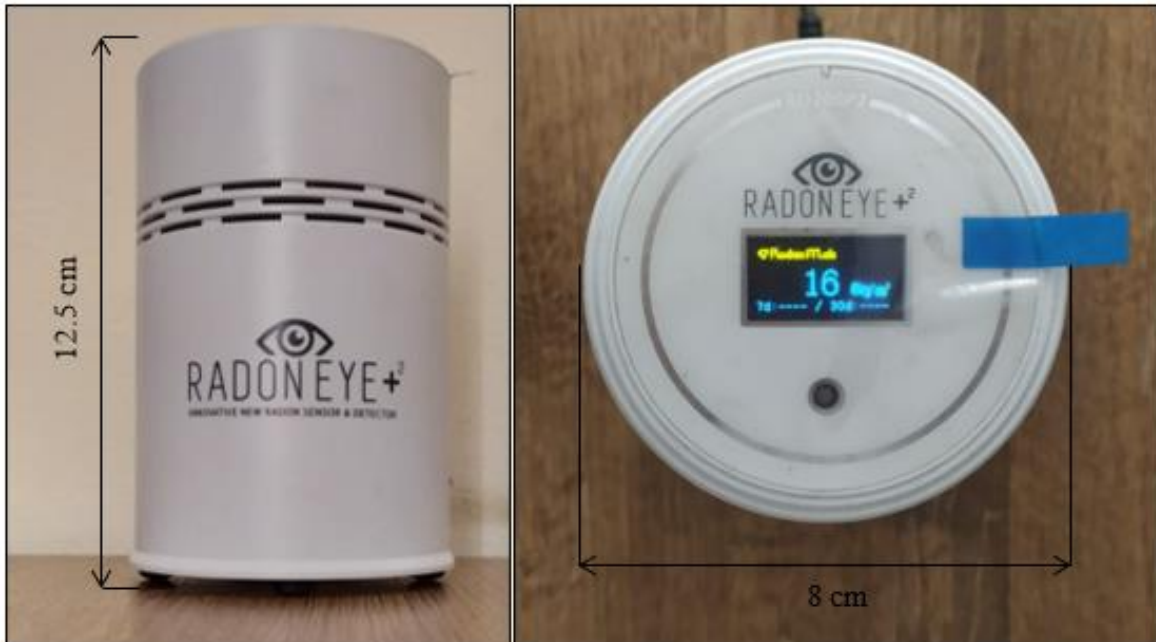
Tabla 2

Cronograma establecido para la toma de datos intramuros

MEDICIÓN	FECHA INICIO	HORA INICIO	FECHA FIN	HORA FIN	TIEMPO TOTAL DE MEDICIÓN
1	30-sep	11:00 a. m.	10-oct	10:00 a. m.	9 días y 23 horas
2	10-oct	2:00 p. m.	20-oct	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
3	20-oct	2:00 p. m.	30-oct	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
4	30-oct	2:00 p. m.	9-nov	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
5	9-nov	2:00 p. m.	19-nov	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
6	19-nov	2:00 p. m.	29-nov	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
7	29-nov	2:00 p. m.	9-dic	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
8	9-dic	2:00 p. m.	19-dic	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
9	19-dic	2:00 p. m.	29-dic	10:00 a. m.	9 días y 20 horas
10	29-dic	2:00 p. m.	8-ene	10:00 a. m.	9 días y 20 horas

Figura 7

Equipo de medición Radon Eye Plus



Con base a los resultados obtenidos en las diferentes mediciones, se realizó un análisis de los factores determinantes en las concentraciones de gas radón para este estudio y una comparación con los valores estándares establecidos por la OMS, y de esta forma se analizó qué partes de la zona presentan una amenaza radiológica natural.

5.3 Fase 3: Análisis sobre la salud de la población de la región La Baja, haciendo énfasis en las enfermedades asociadas a la exposición al gas radón, basado en las encuestas aplicadas

En esta etapa se elaboró una encuesta que contenía preguntas enfocadas a la salud y las enfermedades asociadas al gas radón. Para formular dichas preguntas, se realizó una extensa búsqueda bibliográfica sobre el radón y su afectación en la salud, de tal manera que se tuvieron en cuenta diferentes variables como: edad, género, profesión, tiempo de residencia en la vivienda, consumo de tabaco, etc. Posteriormente, se aplicaron las encuestas a veinte habitantes de La Baja,

principalmente a aquellos que prestaron sus viviendas para las mediciones con el equipo. Y finalmente, se analizaron los datos obtenidos en las encuestas junto con los datos obtenidos por el detector, para establecer si la población está siendo afectada en su salud por el gas radón.

5.4 Fase 4: Generación del mapa e informe final del proyecto

Con los niveles de gas radón en las viviendas obtenidos por el equipo, se realizó un mapa de la zonificación de la amenaza radiactiva de la región La Baja del municipio de California, para ello, se tomó el promedio de los niveles de gas radón por vivienda y se utilizó este valor para hacer una interpolación usando el método de *Kriging*. Finalmente, se realizó el informe final del proyecto, empalmando el análisis de las encuestas con el análisis de los niveles de radón obtenidos, para dar respuesta a la problemática planteada inicialmente y proponer posibles soluciones o alternativas, de ser necesario.

6. Resultados y análisis

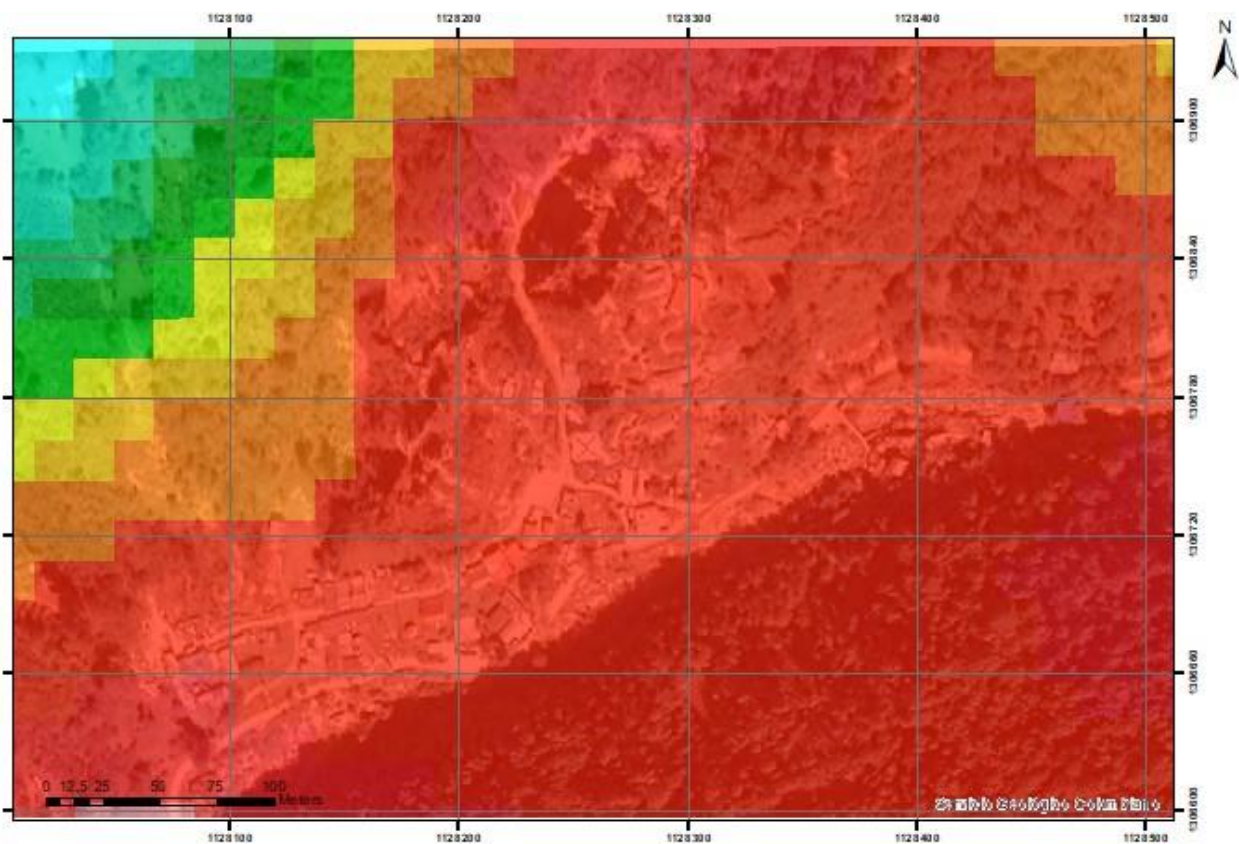
6.1 Anomalía de uranio en La Baja

Conocer las concentraciones de uranio es un paso muy importante cuando se mide el gas radón, ya que, si se presenta una alta concentración de uranio, es bastante probable que existan altos niveles de gas radón. Oficialmente se conoce que en la región La Baja se presentan anomalías positivas de uranio, sin embargo, el mapa que proporciona actualmente el Servicio Geológico Colombiano no presenta una escala detallada en el área de estudio del presente proyecto, como se evidencia en la Figura 8, razón por la cual fue primordial realizar mediciones y obtener un mapa que brindara más información de la anomalía de uranio en La Baja, California.

El área de estudio del presente proyecto presenta 354 metros de latitud por 518 metros de longitud y para realizar un muestreo sistemático se elaboró una rejilla de puntos de 50×50 metros, en un sistema de información geográfica, como se muestra en la Figura 9, en la cual los puntos amarillos indican zonas donde se pudo realizar la medición, mientras que los rojos corresponden a zonas sin acceso, donde no se logró realizar la medición.

Figura 8

Mapa de Gammaespectrometría de Minerales Energéticos (uranio), área de La Baja, California



Nota. Datos descargados del Geoportal - SGC, adaptados a la zona de estudio.

Figura 9

Malla de muestreo inicial para la elaboración del mapa de uranio de la región La Baja



Con base en la malla anterior, se tomaron los datos en campo teniendo en cuenta únicamente aquellos puntos a los que se tenía acceso. Sin embargo, en el trabajo de campo se observó que, hacia la zona norte, las concentraciones de uranio varían drásticamente en tan solo unos metros de distancia, razón por la cual se aumentó el muestreo en esa área, tal como se muestra en la Figura 10. Finalmente, obtuvieron un total de 35 datos, los cuales se observan en la Tabla 3.

El equipo suministrado por la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander para adquirir datos de las concentraciones en partes por millón de uranio fue el Espectrómetro de rayos Gamma, el cual a su vez da información sobre la concentración de torio en ppm y la concentración porcentual del potasio, no obstante, para la elaboración del mapa de la anomalía de uranio en la región La Baja solo se usaron los datos de las concentraciones de uranio.

Figura 10

Mapa de puntos tomados en campo para la elaboración del mapa de uranio de la región La Baja



La medición con el Espectrómetro de rayos Gamma se realizó en el modo *Assay*, en el menú de la pantalla, apuntando el detector hacia el suelo durante dos minutos, este procedimiento puede apreciarse en la Figura 11.

Figura 11

Proceso de medición con el espectrómetro de rayos gamma



Tabla 3*Valores de las mediciones gamma espectrales de U, K y Th tomadas en la zona de estudio*

Medición	U (ppm)	K (%)	Th (ppm)
1	58.1	3.9	24.7
2	634.0	2.5	17.3
3	1324.0	9.4	49.3
4	292.1	4.8	47.7
5	254.9	4.9	25.4
6	26.1	3.8	15.0
7	81.9	4.7	23.8
8	1419.0	12.9	72.0
9	223.1	3.4	18.0
10	174.0	5.7	42.6
11	76.0	5.7	15.6
12	88.3	4.3	17.4
13	28.9	4.9	15.8
14	910.6	7.3	68.8
15	1411.0	13.1	53.3
16	10.0	5.2	11.3
17	9.9	1.2	9.7
18	17.4	2.6	12.7
19	117.0	3.7	25.0
20	14.5	6.3	16.5
21	12.7	3.4	13.9
22	6.4	2.3	9.1
23	6.4	3.0	13.7
24	17.3	3.6	11.0
25	7.9	3.4	8.1
26	16.2	1.9	14.3
27	11.0	3.3	16.4
28	124.6	4.0	22.3
29	17.5	2.5	17.7
30	24.0	2.6	16.0
31	29.7	4.5	12.4
32	7.7	4.6	12.3
33	17.1	2.6	17.3
34	7.7	3.4	9.3
35	48.6	2.0	13.3

Finalmente, para generar el mapa de la anomalía de uranio en La Baja, se realizó una interpolación de los datos obtenidos utilizando el método de *Kriging* simple. Al usar este método se debe tener en cuenta principalmente dos factores estadísticos.

El primer factor es determinar el rango de los valores para establecer si se pueden trabajar de manera normal o si por el contrario se debe realizar una transformación logarítmica. Para esto se utiliza un histograma de frecuencia, en el cual, teóricamente, se debe observar una campana de Gauss, sin embargo, la mayoría de los datos adquiridos en geología no muestran una distribución de este tipo, razón por la cual, se realizan transformaciones logarítmicas con la finalidad de que se observe un comportamiento gaussiano en los datos o en su defecto, que estos no se acúñen hacia el lado izquierdo, y que su desviación estándar sea baja. En el proyecto, las concentraciones de uranio obtenidas en La Baja presentan un rango que va desde 6.7 hasta 1419 ppm. Debido a la extensión de los valores se aplicó una transformación logarítmica y el histograma de datos resultante de dicha transformación se observa en la Figura 12. Es de importancia mencionar que los datos adquiridos no presentan una distribución gaussiana, sin embargo, estos no se aglomeran en una sola barra, por lo cual son estadísticamente válidos para realizar una interpolación. Adicionalmente, en la parte superior derecha de la Figura 12, se observa un recuadro con las medidas de tendencia central y de dispersión del uranio, en este es importante observar que la desviación estándar presenta un valor bajo, lo cual indica una mayor confiabilidad de los datos.

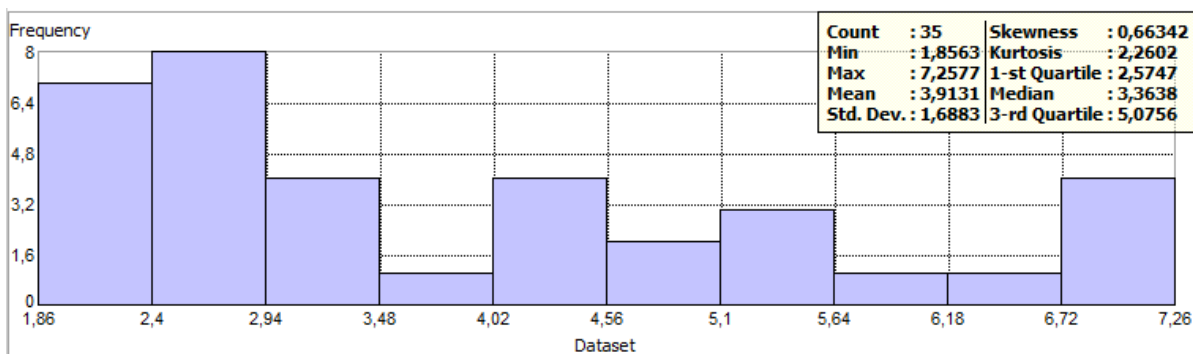
El segundo factor es el *Trend Analysis*, que, como su nombre lo indica, consiste en un análisis de la tendencia de los datos, en el que se genera una línea de tendencia algebraica para los datos, la cual puede ser lineal, es decir de grado uno; o puede ser de tipo parábola, es decir, de grado dos. En la Figura 12 es posible observar la gráfica de análisis de tendencia para los datos de

uranio en ppm tomados en La Baja, los cuales son de grado dos. Según el plano yz de este gráfico, los valores de uranio aumentan en sentido sur-norte.

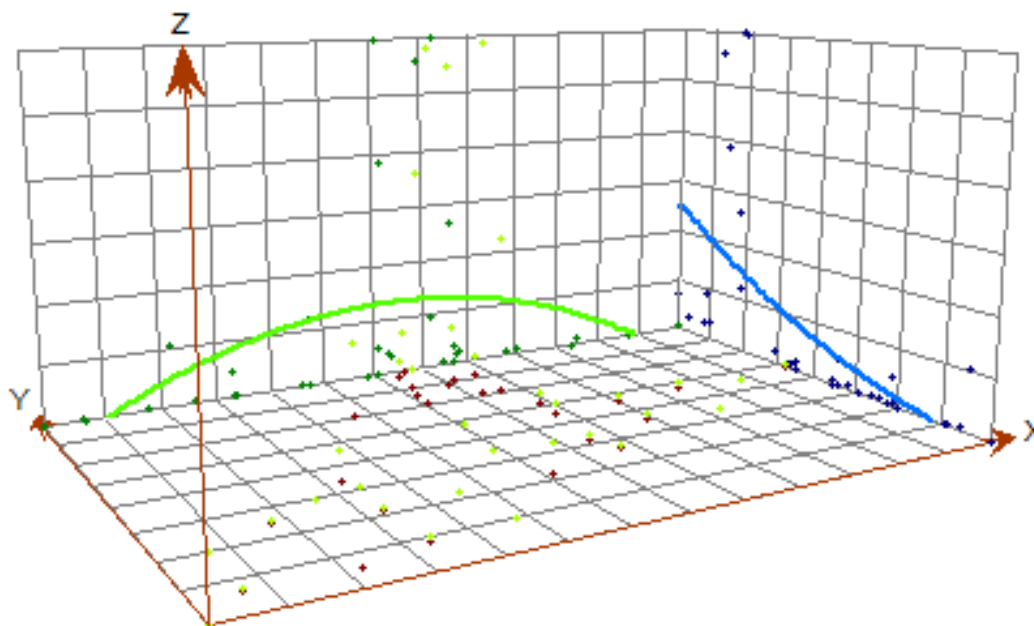
Figura 12

Histograma de frecuencia y Trend Analysis de los datos de uranio en ppm

HISTOGRAMA DE FRECUENCIA



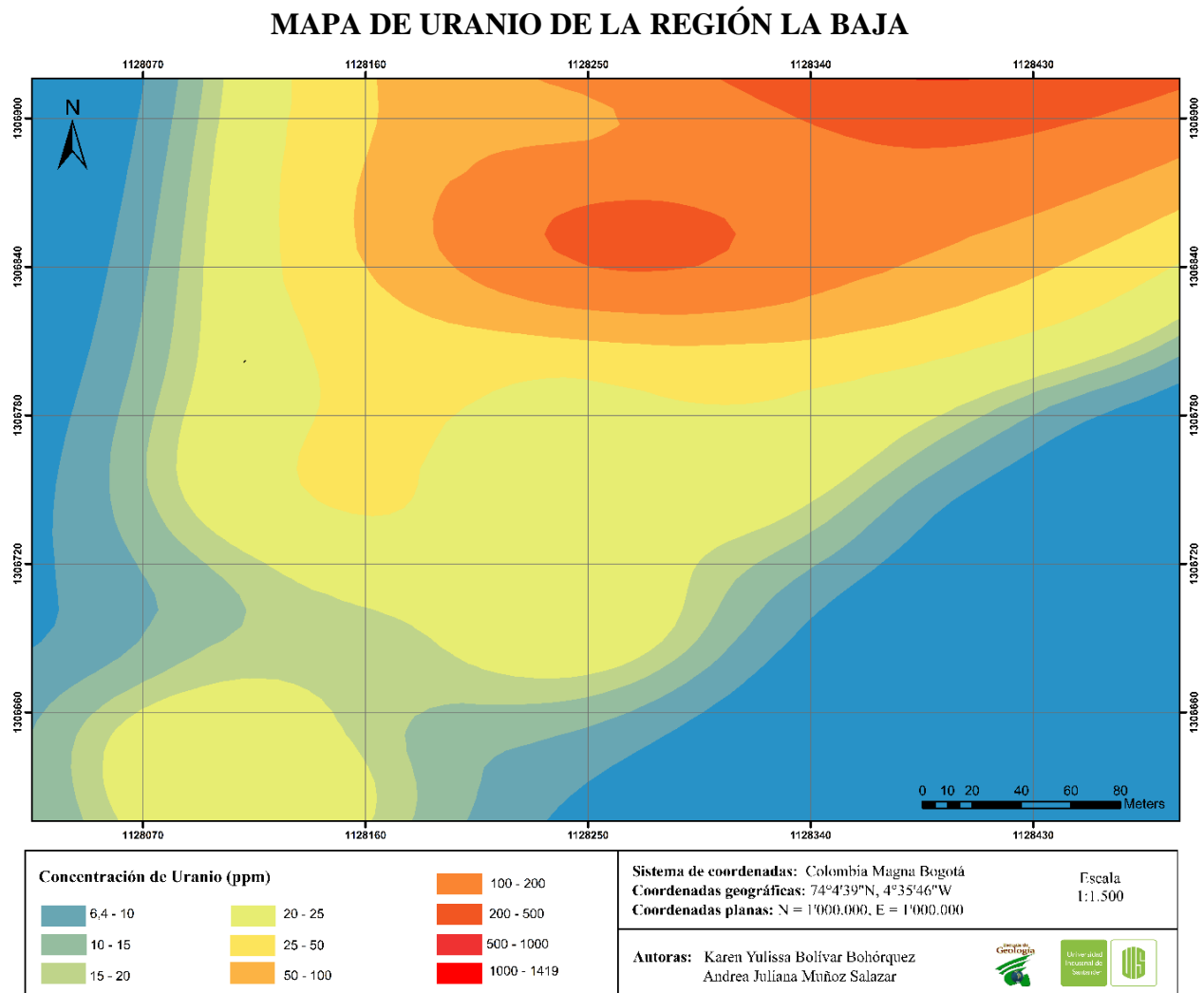
ANÁLISIS DE TENDENCIA



Posterior al análisis estadístico, se procedió a realizar la interpolación utilizando el método de *Kriging* simple, dando como resultado el mapa de la anomalía de uranio que se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Mapa de uranio en partes por millón de la región La Baja, California



El *clarke* de concentración es el valor promedio de un elemento en la corteza terrestre y este se utiliza para comparar que tan empobrecido o enriquecido es un terreno en determinado elemento. Para entender mejor el comportamiento de la radiactividad en la zona de estudio, es

importante mencionar el valor de *clarke* de los elementos medidos gammaespectralmente. Según Smith y Huyck (1999), el uranio presenta un *clarke* de concentración en la corteza de 2.3 ppm, por otra parte, el torio tiene un valor de *clarke* de 8.1 ppm; y finalmente la media porcentual de potasio es de 2.6% (Emsley, 2001). Teniendo en cuenta los datos tomados con el Espectrómetro de rayos Gamma en la región La Baja, es posible afirmar que el 100% de los datos adquiridos superan el *clarke* de uranio; además, el 97% y 80% de los valores obtenidos de torio y potasio, respectivamente, también superan el *clarke* establecido para cada uno de estos elementos. De esta forma es posible afirmar que, aunque el uranio es el elemento principal que genera la radiactividad de La Baja, no es el único, debido a que también se presentan anomalías positivas de torio y potasio. Teniendo en cuenta esta información y aprovechando los datos de las concentraciones de torio y potasio que se muestran en la Tabla 3, se elaboró una interpolación de dichas concentraciones y el mapa resultante se observa en la Figura 14.

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo de las concentraciones de estos tres elementos, para determinar si se comportan de manera similar. En donde, fue posible establecer que no siguen el mismo comportamiento, es decir, el hecho de que haya abundante uranio en un punto no significa que, necesariamente, en ese mismo punto existan grandes cantidades de torio o de potasio, y viceversa; en otras palabras, las concentraciones de estos elementos no presentan una correlación con las concentraciones de uranio. Este hecho fue corroborable mediante la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson, en donde se tuvo un coeficiente de correlación R de 0.065 para el potasio y el uranio; y 0.077 para el torio y el uranio, lo cual corresponden a grados de correlación nulos. Adicionalmente, se obtuvo un coeficiente de correlación entre el potasio y el torio de 0.639, lo cual nos indica una correlación fuerte, según la Tabla 4.

Figura 14

Concentraciones de potasio (%) y torio (ppm) en La Baja

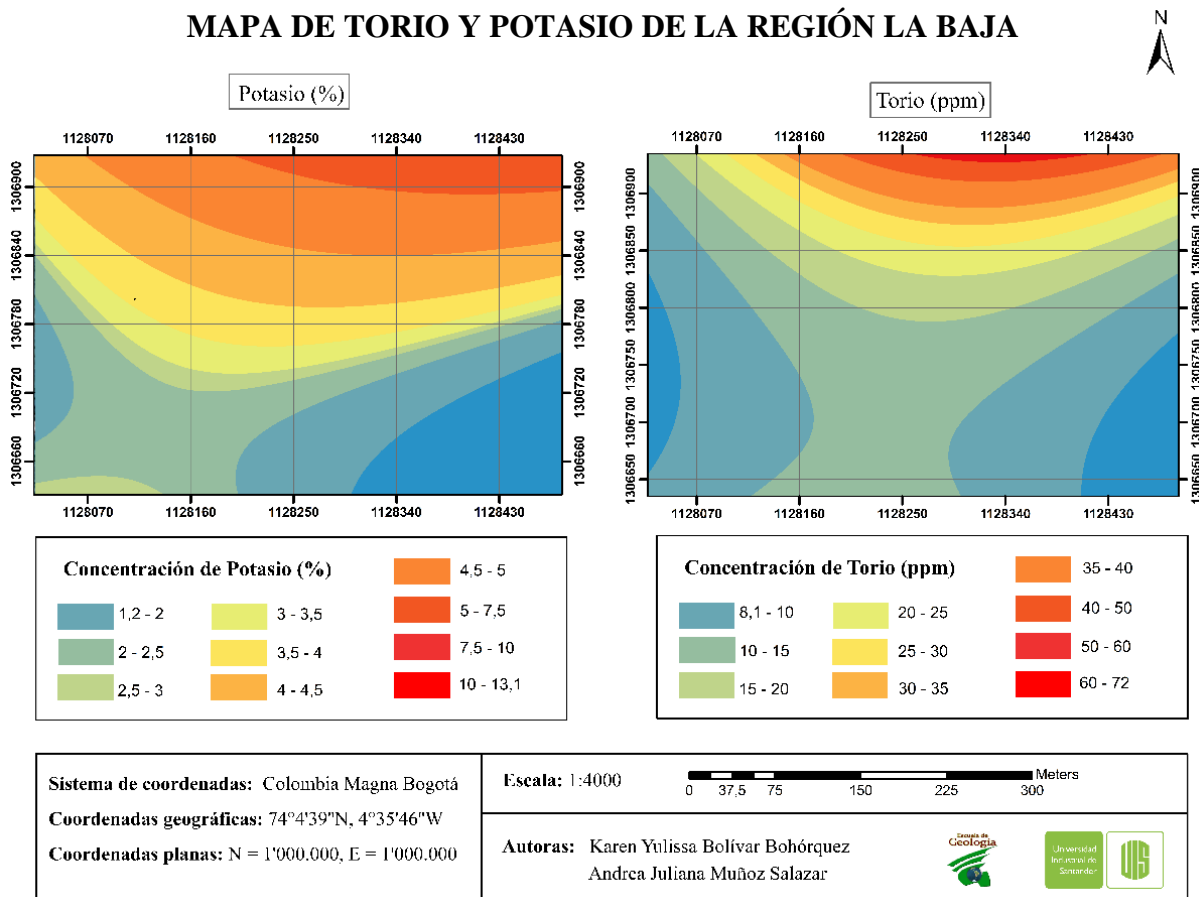


Tabla 4

Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.

Valor	Criterio
$0,50 \leq R < 1,00$	Correlación fuerte
$0,30 \leq R < 0,50$	Correlación moderada
$0,10 \leq R < 0,30$	Correlación débil
$0,00 \leq R < 0,10$	Correlación nula

Nota. Tomado de Hernández et al., 2018

6.2 Niveles de radón intramuros en La Baja, California

Para realizar las mediciones de gas radón intramuros en la zona de estudio, se instaló el equipo *Radon Eye Plus* al que le corresponde un número serial único, el cual es PE22103250048, dentro de cada vivienda, encima de una superficie estable y con acceso a una toma eléctrica. Posteriormente, se realizó una conexión vía *Bluetooth* con el aplicativo móvil *RadonEye*⁺², para establecer los parámetros de medición del detector, los cuales se muestran en la Tabla 5. El equipo de medición permaneció en cada vivienda durante un lapso aproximado de diez días, y finalmente los datos obtenidos fueron procesados y descargados en formato PDF mediante el software *AtmosLight 1.4.0.0*, de la empresa fabricante *Radonova*. La recopilación de los resultados de las diez mediciones se muestra en el Apéndice A.

Tabla 5

Parámetros de medición del equipo

Unidad de medición	Bq/m ³
Intervalos de medición	10 minutos
Temperatura de medición	Celsius (°C)

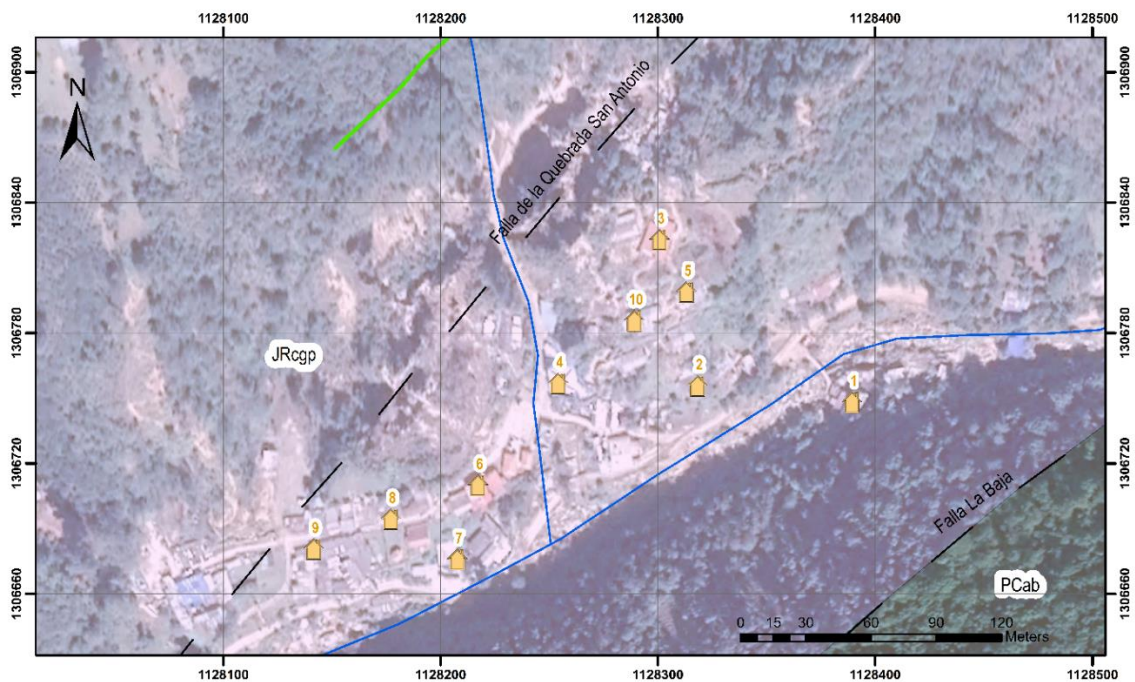
Nota. El equipo realiza mediciones de gas radón cada diez minutos, no obstante, guarda un dato por hora, el cual es el resultado del promedio de los datos obtenidos en ese lapso.

Por otra parte, la selección de viviendas fue realizada por las autoras, con la finalidad de obtener una óptima distribución de mediciones de gas radón en toda la región La Baja. Dicha distribución se muestra en la Figura 15. Es de importancia mencionar que todas las viviendas seleccionadas están construidas con ladrillos y cemento; y solo difieren en los materiales del techo, los cuales varían entre zinc, eternit y placa, sin embargo, para el análisis de radón intramuros basta con conocer el material de construcción de los cimientos y las paredes.

Figura 15

Localización de las viviendas seleccionadas para la medición de gas radón intramural en la región La Baja, California

MAPA DE VIVIENDAS SELECCIONADAS PARA LA MEDICIÓN DE RADÓN



LEYENDA			
Geología	Contactos y fallas	Cartografía base	Vivienda seleccionada
JRcgp Granito de Pescadero	— Contacto definido	— Drenaje sencillo	🏠
PCab Neis de Bucaramanga	- - Lineamiento inferido		
— Filón de Pie de Gallo (?)			
Sistema de coordenadas: Colombia Magna Bogotá Coordenadas geográficas: 74°4'39"N, 4°35'46"W Coordenadas planas: N = 1'000.000, E = 1'000.000		Autoras: Andrea Juliana Muñoz Salazar Karen Yulissa Bolívar Bohórquez	

Nota. La localización aproximada del Filón de Pie de Gallo fue tomada del mapa Área Uranífera de San Antonio, de Bueno, 1955.

Como puede observarse en la Figura 15, todas las viviendas se localizan sobre el Granito de Pescadero, el cual corresponde en la zona de estudio, a alasitas de composición granito – cuarzomonzonita y pórfidos de composición granodiorita, dacita y andesita. Adicionalmente, en

la Tabla 6 se muestran las características de cada vivienda, tales como el contenido aproximado de uranio presente en su subsuelo, el grado de su ventilación y su influencia tectónica.

Tabla 6

Contenido aproximado de uranio, grado de ventilación e influencia tectónica de cada vivienda

Vivienda	Uranio en el subsuelo (ppm)	Ventilación	Distancia a fallas geológicas
1	7	Escasa	75 m (Falla La Baja)
2	38	Moderada	103 m (Falla Q. San Antonio)
3	625	Moderada	47 m (Falla Q. San Antonio)
4	9.9	Escasa	53 m (Falla Q. San Antonio)
5	43	Nula	72 m (Falla Q. San Antonio)
6	8.3	Buena	55 m (Falla Q. San Antonio)
7	60	Escasa	70 m (Falla Q. San Antonio)
8	10	Moderada	34 m (Falla Q. San Antonio)
9	9.8	Moderada	16 m (Falla Q. San Antonio)
10	45	Buena	61 m (Falla Q. San Antonio)

El análisis de los datos se basó principalmente en establecer el grado de amenaza de gas radón intramural y este se realizó con base a los valores que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Grado de amenaza radiactiva según el promedio de radón intramural

Promedio de radón intramural (Bq/m ³)	Grado de amenaza radiactiva
0 – 100	Baja
100 - 148	Moderada
148 - 300	Alta
300 - 400	Muy alta
> 400	Crítica

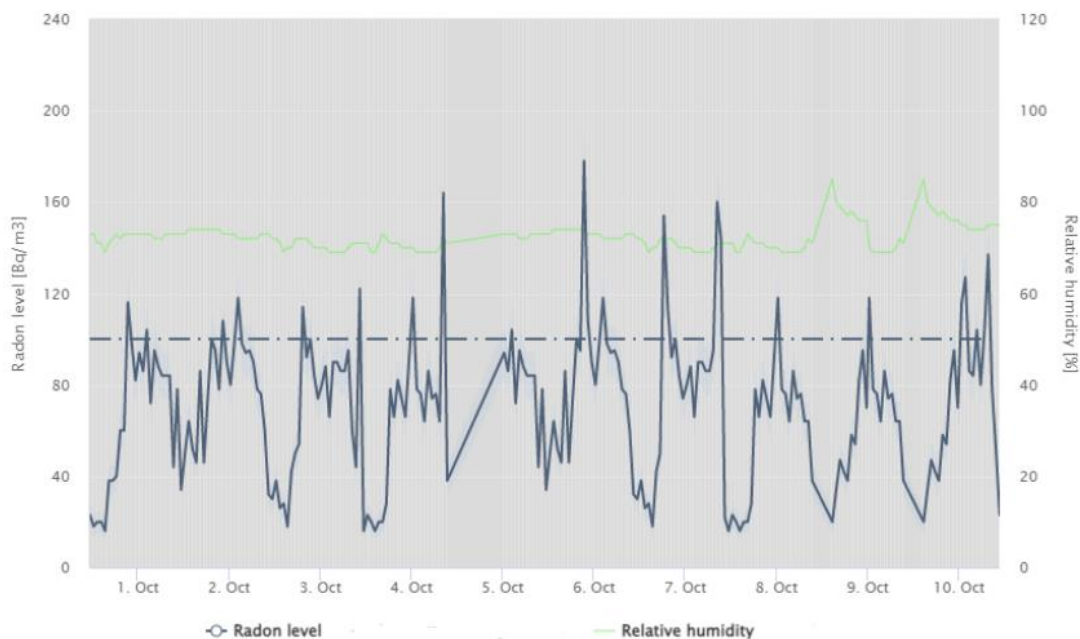
Nota. Los intervalos fueron establecidos por las autoras, con base en el límite permisible establecido por la OMS, la EPA y la EURATOM, mencionados en el inciso 3.3, además, aunque Colombia no cuenta con un nivel límite permisible, según la resolución 18-1434 de 2002, si cuenta con un límite crítico (exposición crónica), el cual es de 400 Bq/m³.

Finalmente, los resultados obtenidos en cada vivienda con su respectivo análisis se muestran a continuación.

La vivienda uno se localiza en la zona con menores niveles de uranio y en esta se obtuvo un promedio de medición de los diez días de aproximadamente $70 \pm 2 \text{ Bq/m}^3$, con un valor máximo de 178 Bq/m^3 y un valor mínimo 16 Bq/m^3 . Además, la temperatura promedio fue de 15°C y la humedad relativa promedio de 72%. La Figura 16 muestra el comportamiento de las concentraciones de gas radón vs. el tiempo que permaneció midiendo el equipo. De manera general para las diez gráficas de las diez viviendas, el trazo de líneas y puntos que se observa de color azul corresponde al valor límite permisible establecido por la OMS para radón en interiores, el cual, como se mencionó en el inciso 3.3, es de 100 Bq/m^3 . En la vivienda uno sólo el 10.55% de las concentraciones superaron dicho límite permisible y debido a que la concentración promedio no superó los 100 Bq/m^3 , se tiene una baja amenaza radiactiva de gas radón en esta vivienda.

Figura 16

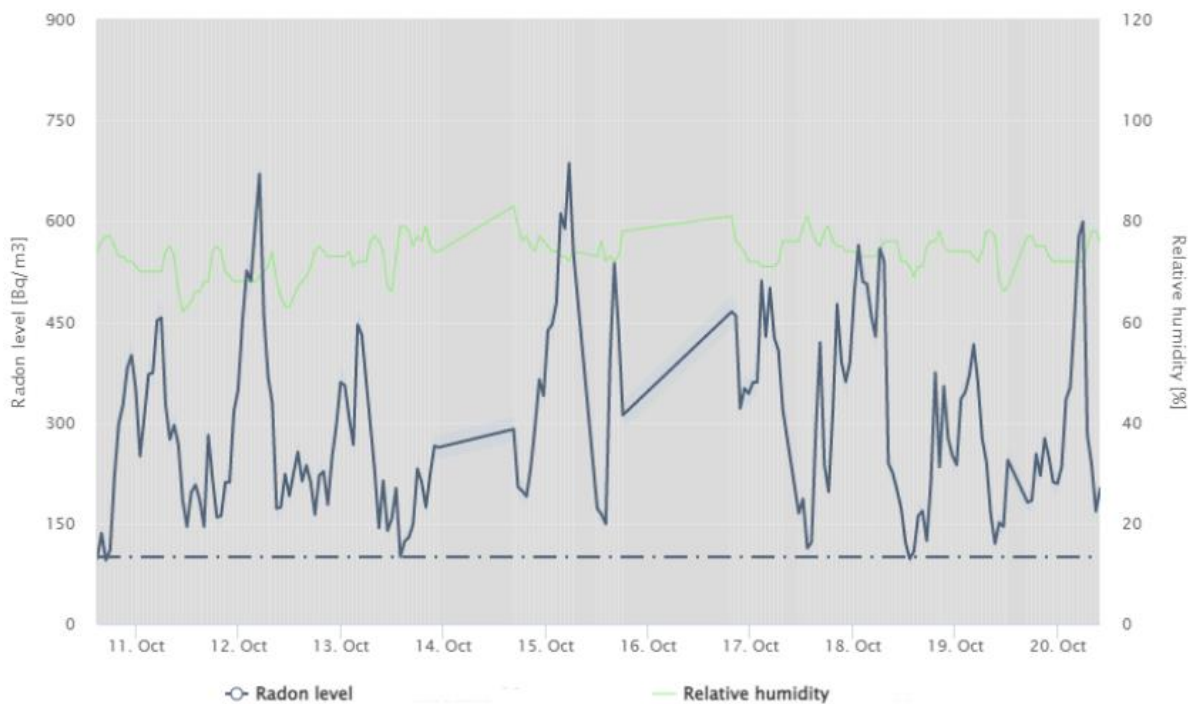
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 1



La vivienda dos se ubica cerca a zonas con niveles moderados de uranio, además cuenta con una fábrica de beneficio minero en el patio externo de la misma y las concentraciones de gas radón intramuros durante el periodo de medición dieron como resultado una media de 297 ± 10 Bq/m³, con un valor máximo y mínimo de 686 Bq/m³ y 95 Bq/m³, respectivamente. Por otra parte, la temperatura promedio fue de 16°C y la humedad relativa promedio fue del 73%. En la Figura 17 se puede observar que casi la totalidad de los datos superaron el valor limite permisible que menciona la OMS y, debido a que el valor promedio superó 148 Bq/m³, se tiene una alta amenaza radiactiva de gas radón.

Figura 17

Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 2

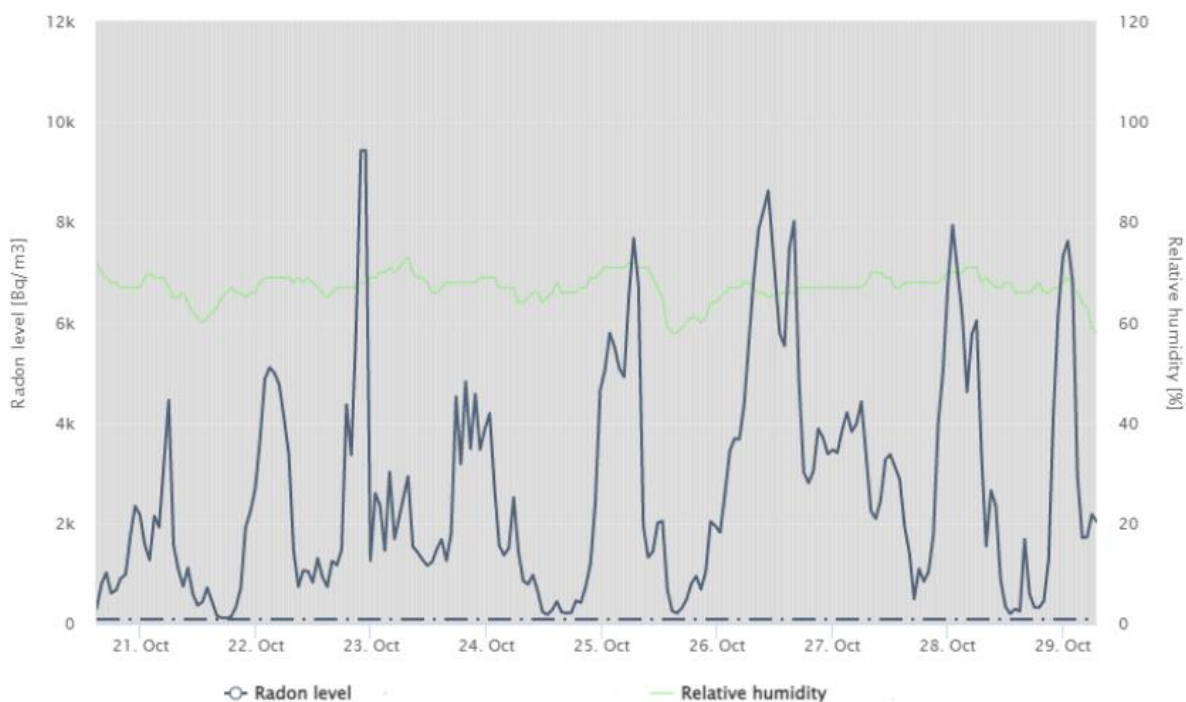


Nota. En el gráfico es posible observar comportamientos bruscos, que se muestran como líneas rectas que unen días de medición diferentes, esto sucede porque en La Baja la electricidad tiene muchas falencias, y suele quedarse algunos días sin energía eléctrica.

La vivienda tres es la más cercana al Filón de Pie de Gallo, y además de esto, según las mediciones gamma espectrales (inciso 6.1), corresponde a una de las mayores concentraciones de uranio de la zona. Es importante mencionar que esta es la vivienda con la radiactividad más extrema y crítica de toda el área de estudio, ya que el promedio de los niveles de gas radón fue de $2662 \pm 153 \text{ Bq/m}^3$, con un valor máximo 9435 Bq/m^3 y uno mínimo de 113 Bq/m^3 . Así mismo, la temperatura promedio fue de 18°C y la humedad relativa promedio fue del 67%. La Figura 18 evidencia el comportamiento de las concentraciones vs. el tiempo de medición, en donde se puede observar que el 100% de los datos superan el límite establecido por la OMS. Además de esto, debido a que el promedio de los datos supera los 400 Bq/m^3 , se tiene una amenaza radiactiva de radón crítica en esta vivienda.

Figura 18

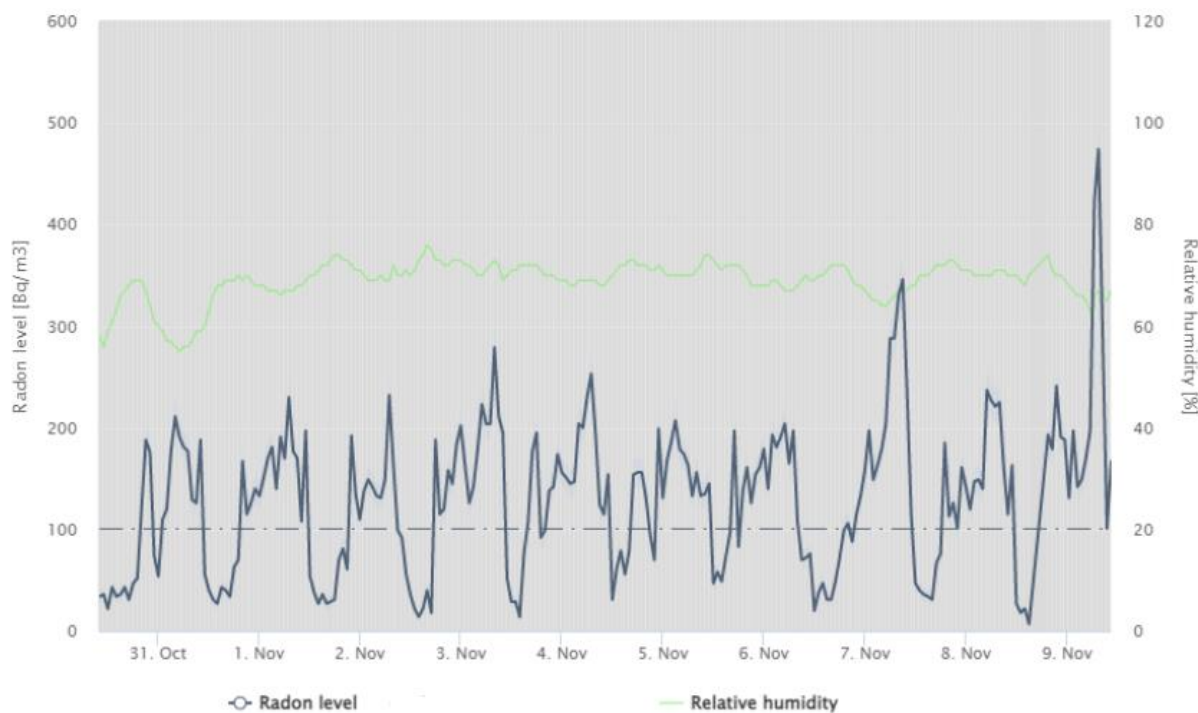
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 3



La vivienda cuatro se localiza cercana a zonas con bajos niveles de uranio, esta cuenta con tres pisos y por comodidad de la dueña, el equipo se instaló en el segundo piso, por ende, es importante resaltar que los niveles de gas radón pueden ser menores a los esperados. Estos niveles tienen un promedio de $130 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$, con un valor máximo y mínimo de 474 Bq/m^3 y 7 Bq/m^3 , respectivamente. Además, el promedio de la temperatura fue de 16°C y el promedio de la humedad relativa fue del 69%. En la Figura 19 se muestra el comportamiento del tiempo vs. el nivel de radón intramural promedio, y en esta es posible apreciar que aproximadamente el 34.75% de los datos estuvieron por encima del límite establecido por la OMS. El nivel promedio de radón indica una amenaza radiactiva de gas radón moderada para esta vivienda. Adicionalmente, se observó un comportamiento cíclico, en el cual, la mayoría de los niveles de radón por encima de los 100 Bq/m^3 , ocurrían entre las 8 de la noche y las 7 de la mañana.

Figura 19

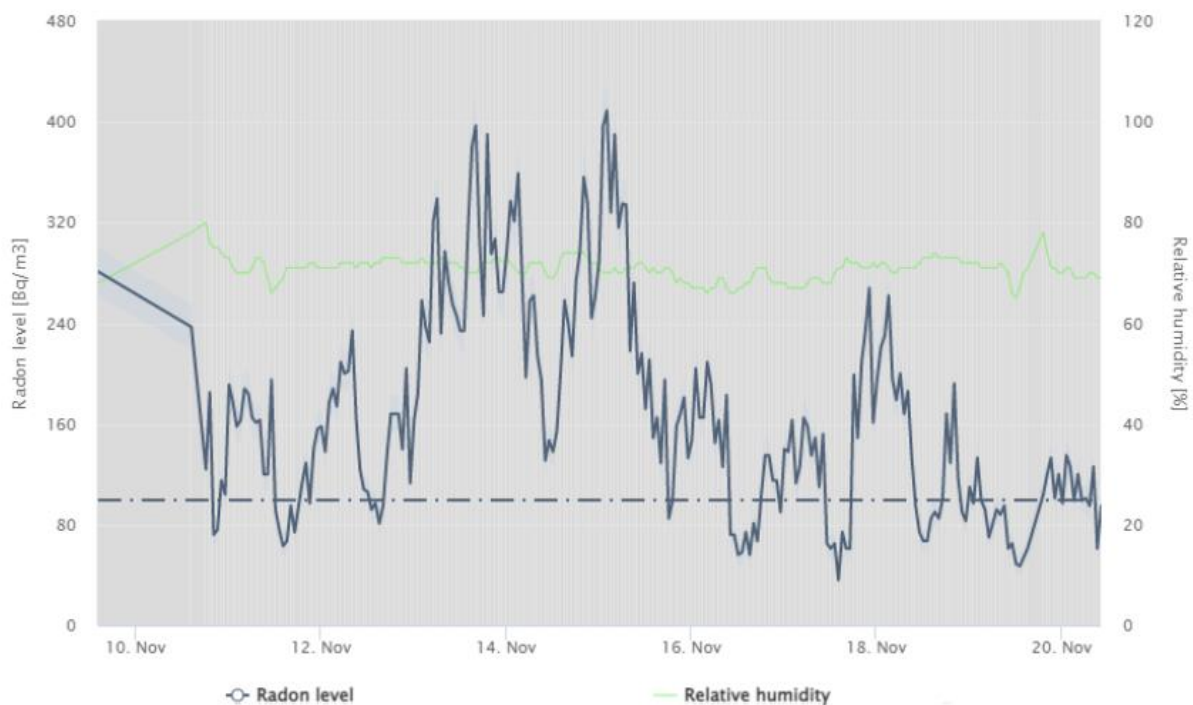
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 4



La vivienda cinco es la segunda vivienda más cercana al Filón Pie de Gallo. En esta el promedio de las mediciones tiene un valor de $167 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$, además, su valor máximo y mínimo es de 409 Bq/m^3 y 36 Bq/m^3 , respectivamente. La temperatura promedio fue de 16°C y la humedad relativa promedio fue del 71%. Como se puede apreciar en la Figura 20, gran cantidad de los datos estuvieron por encima del límite establecido por la OMS, más exactamente el 73.91% de estos. Según el nivel promedio de gas radón, la vivienda presenta una amenaza radiactiva alta; sin embargo, debido a la cercanía con la vivienda tres, se esperaba que los niveles en esta vivienda fueran más altos de los obtenidos, por ende, se sospecha que esto se debió a la nula ventilación presente, ya que, uno de los principales mecanismos para que el radón se movilice hacia el interior de las viviendas sin grietas, es el de advección, el cual necesita pequeñas diferencias de presión, que son proporcionadas en la mayoría de los casos por la ventilación esporádica de las mismas.

Figura 20

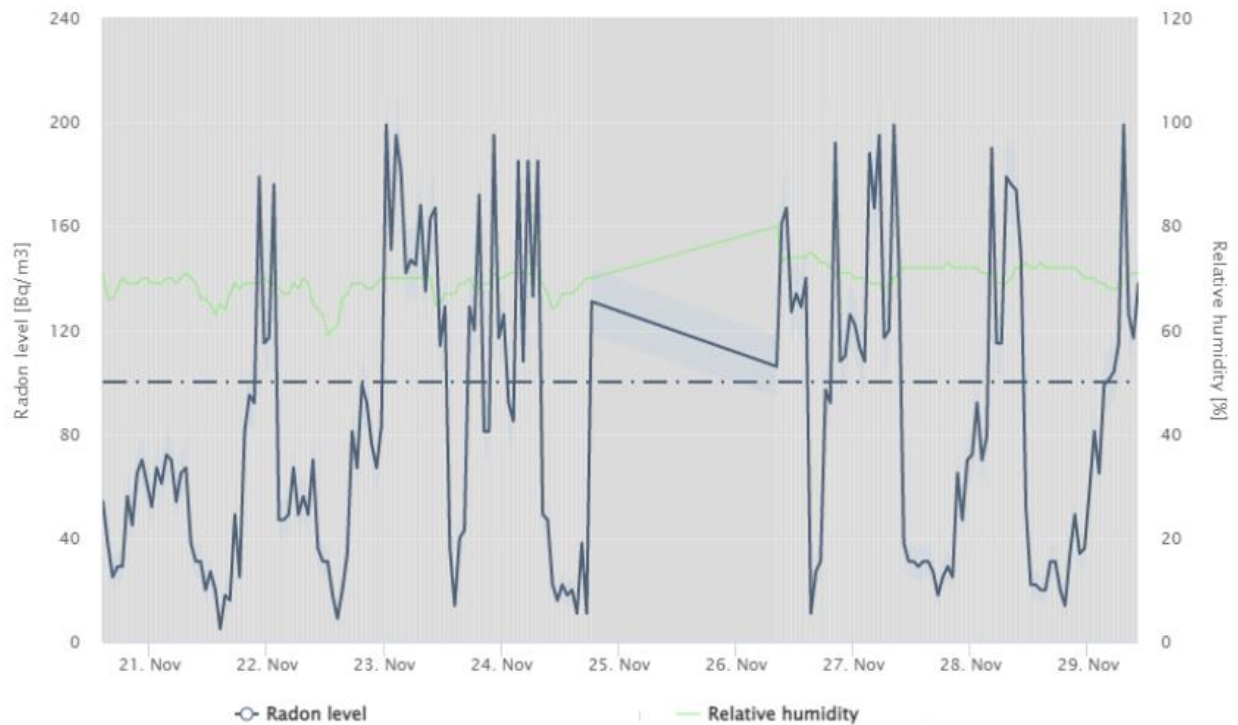
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 5



La vivienda seis se localiza cerca a zonas con niveles bajos de uranio, además se caracteriza por ser la vivienda seleccionada con mejor ventilación, ya que esta es constante durante el día, lo cual favorece a que los niveles de radón disminuyan. El promedio de la medición de las concentraciones de gas radón fue $83 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$, y su pico máximo tuvo un valor de 199 Bq/m^3 , mientras que el valor mínimo fue 5 Bq/m^3 . La temperatura y humedad relativa tienen una media de aproximadamente 16°C y 70% , respectivamente. En la Figura 21 se pueden observar las concentraciones medidas durante los diez días, en donde el 36.36% de los datos estuvieron por encima del límite establecido por la OMS, no obstante, debido a que el promedio de estos datos no supera el umbral establecido, la vivienda presenta una baja amenaza radiactiva de radón.

Figura 21

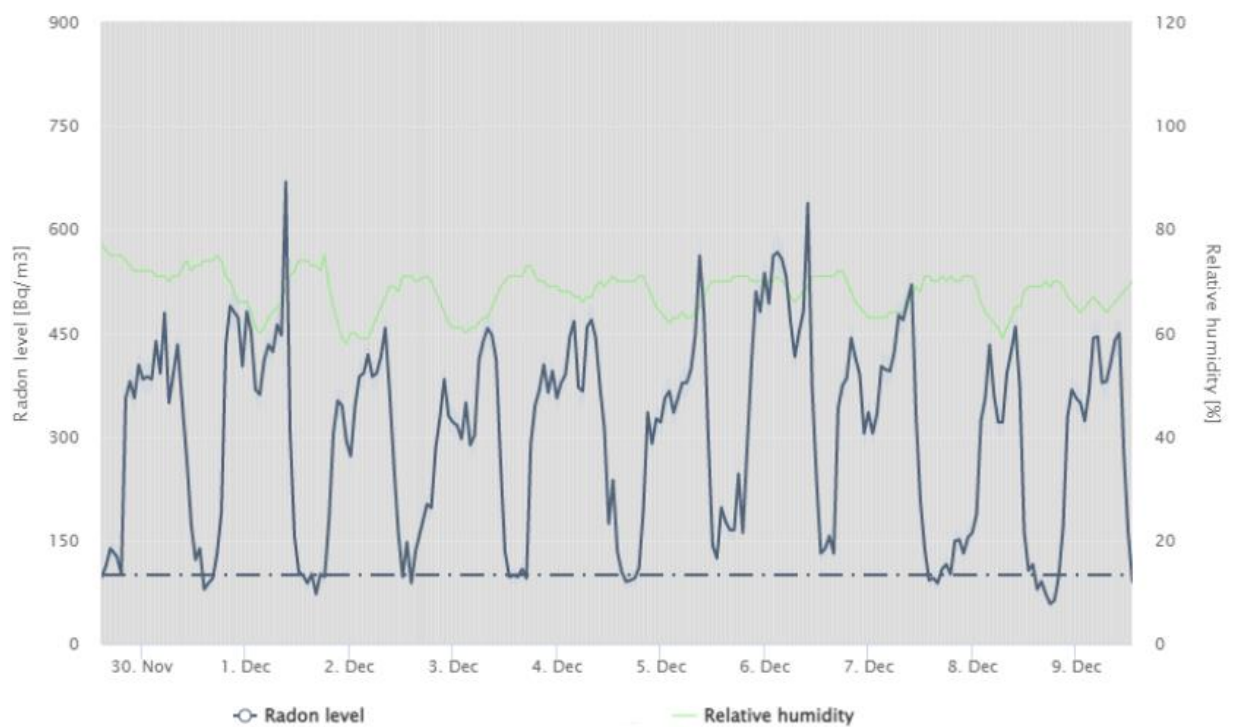
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 6



En las mediciones realizadas en la vivienda siete, la cual se localiza cercana a una anomalía de uranio significativa, de aproximadamente 125 ppm, se obtuvo un valor máximo de 669 Bq/m^3 y un valor mínimo de 58 Bq/m^3 ; además el promedio de los datos fue $301 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$. Los parámetros de temperatura y humedad relativa dieron promedios de aproximadamente 15°C y 68%, respectivamente. En la Figura 22 es posible observar el comportamiento del tiempo vs. el nivel de radón intramural promedio, en donde alrededor del 90% de las mediciones obtenidas superó el límite establecido por la OMS y es posible observar un comportamiento cíclico, en el cual, los niveles más bajos de radón ocurrieron entre las 11 de la mañana y las 5 de la tarde. Adicionalmente, debido al valor promedio de gas radón, la vivienda se caracteriza por tener una amenaza radiactiva muy alta.

Figura 22

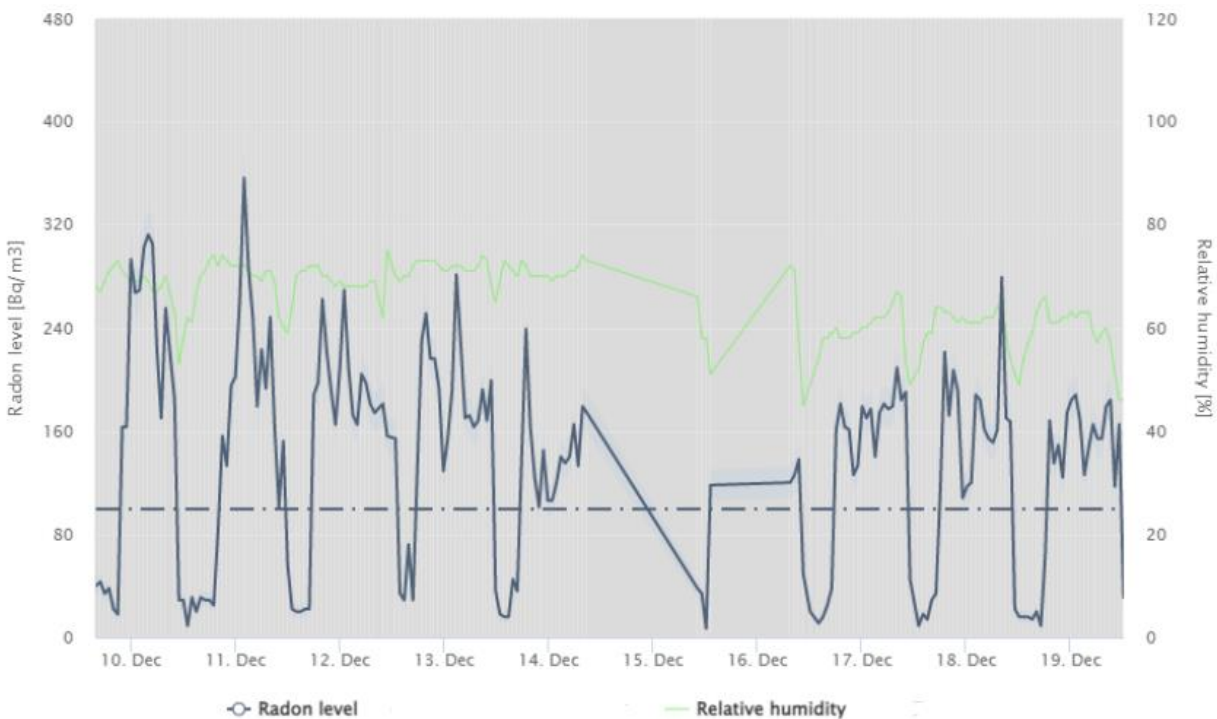
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 7



La vivienda ocho se localiza próxima a niveles bajos de uranio, y es la segunda vivienda más cercana a la Falla de la Quebrada San Antonio. En esta, las mediciones obtenidas dieron una media de 136 ± 6 Bq/m³, con un valor máximo y mínimo de 356 Bq/m³ y 7 Bq/m³, respectivamente. Además, la temperatura promedio fue de 16°C y la humedad relativa promedio fue del 65%. En la Figura 23 es posible observar un comportamiento cíclico en las mediciones tomadas, en el cual, nuevamente la mayoría de los niveles por debajo de los 100 Bq/m³, ocurrían entre las 11 de la mañana y las 5 de la tarde. De manera general, el 70.53% de los datos estuvieron por encima del límite establecido por la OMS y debido a que el valor promedio de las concentraciones de gas radón no superó los 148 Bq/m³, la vivienda tiene una amenaza radiactiva de gas radón moderada.

Figura 23

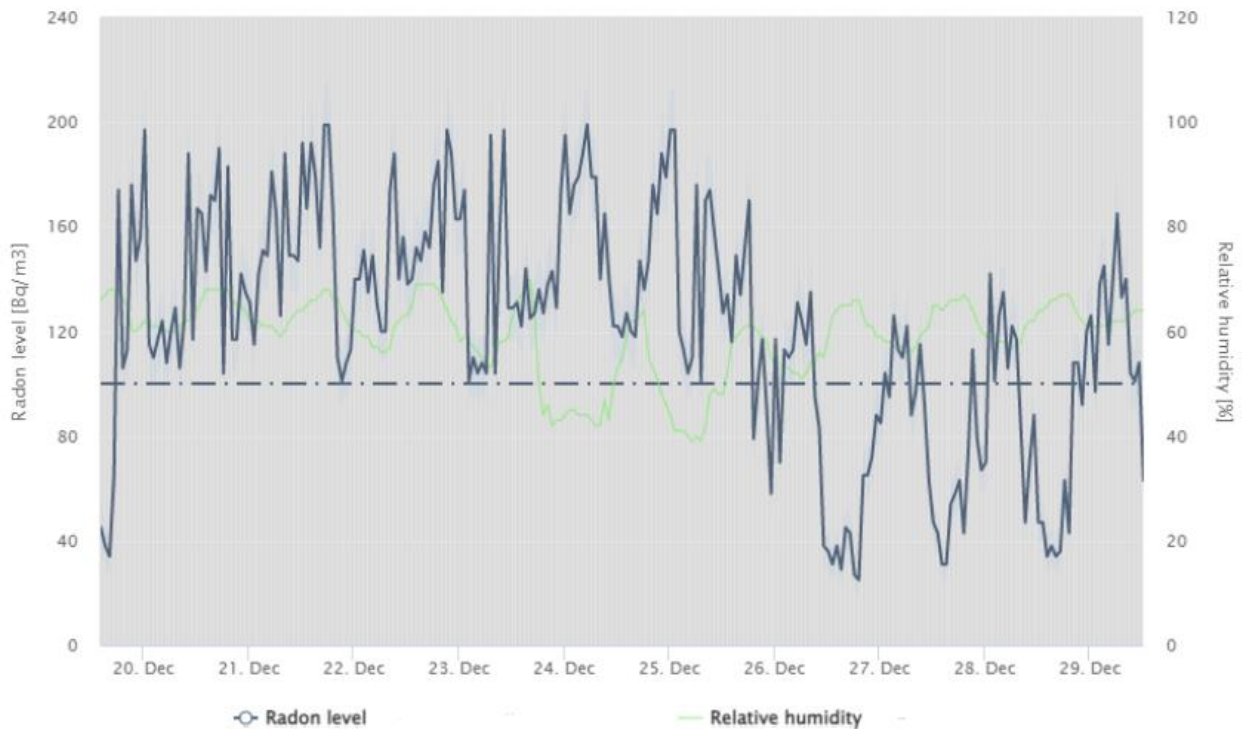
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 8



La vivienda nueve presenta cercanía a concentraciones bajas de uranio y se caracteriza por ser la vivienda más cercana a la Falla de la Quebrada San Antonio. En esta, las mediciones obtenidas tuvieron una media de $122 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$, con un valor máximo y mínimo de 199 Bq/m^3 y 25 Bq/m^3 , respectivamente. Por otro lado, la temperatura promedio fue de 16°C y la humedad relativa promedio fue del 59%. En la Figura 24 se muestran las concentraciones obtenidas durante el periodo de medición, es de importancia resaltar que el 76.57% de los datos estuvieron por encima del límite establecido por la OMS. Esta vivienda se cataloga con una amenaza radiactiva de gas radón moderada ya que el promedio de las concentraciones estuvo por debajo de los 148 Bq/m^3 .

Figura 24

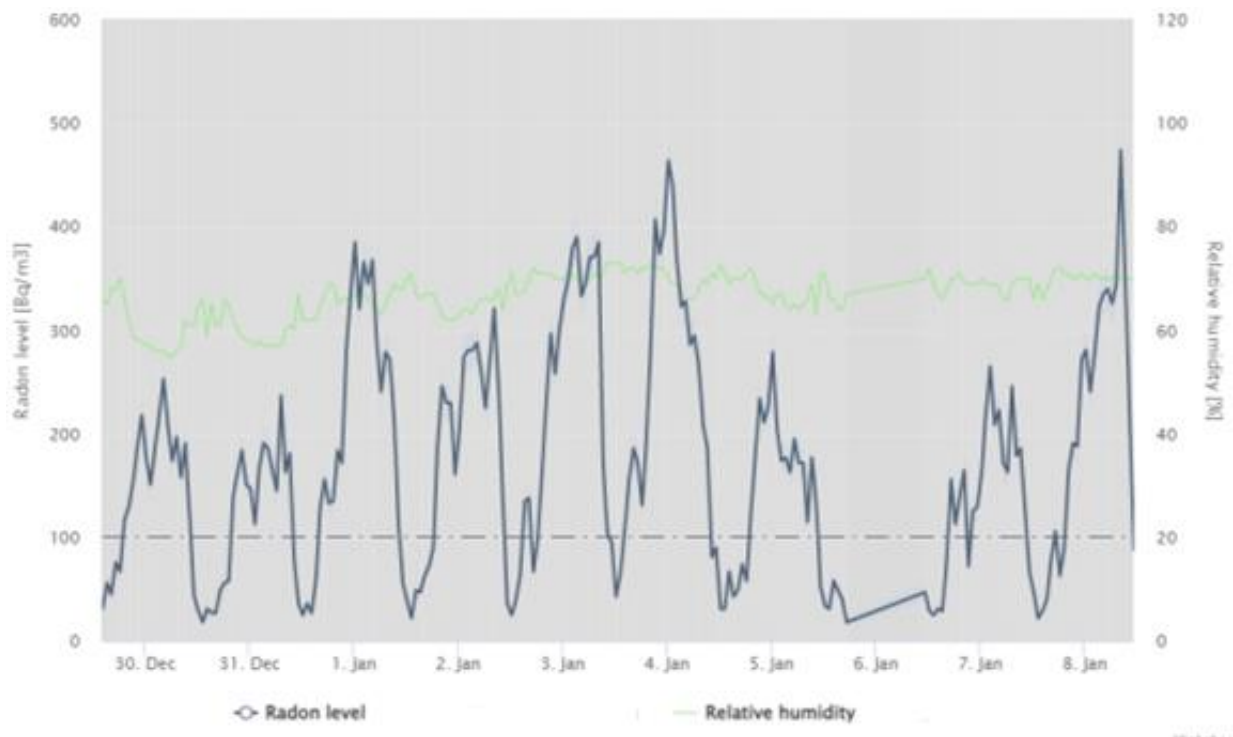
Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 9



La vivienda diez se encuentra ubicada en una zona que cuenta con concentraciones de uranio medias, es decir, de aproximadamente 50 ppm, y además se caracteriza por presentar una ventilación constante durante todo el día, pues la vivienda cuenta con una ventanilla sin vidrio. El valor mínimo de las mediciones realizadas es de 18 Bq/m^3 , mientras que el valor máximo es de 474 Bq/m^3 , con un promedio de $173 \pm 7 \text{ Bq/m}^3$. La temperatura promedio durante el periodo de medición fue de 15°C , y la humedad relativa tuvo una media de 65%. En la figura 25 se observa el comportamiento de los datos tomados, de los cuales el 69.2% superan el límite establecido por la OMS. La vivienda presenta una amenaza radiactiva alta, ya que su promedio estuvo por encima de los 148 Bq/m^3 .

Figura 25

Gráfico de tiempo vs. nivel de radón intramural en la vivienda 10



El valor promedio de concentración de gas radón intramuros de cada vivienda se muestra en la Tabla 8, en la cual también se encuentra el nivel de amenaza radiactiva.

Tabla 8

Nivel de amenaza radiactiva de las viviendas en las que se realizó la medición

Vivienda	Concentración promedio de gas radón intramuros (Bq/m ³)	Nivel de amenaza radiactiva
1	70	Baja
2	297	Alta
3	2662	Crítica
4	130	Moderada
5	167	Alta
6	83	Baja
7	301	Muy alta
8	136	Moderada
9	122	Moderada
10	173	Alta

De esta forma es posible establecer que el 80% de las mediciones realizadas, superó el límite permisible establecido por la OMS. Los porcentajes de cada nivel de amenaza radiactiva se pueden observar en el gráfico de la Figura 26.

Figura 26

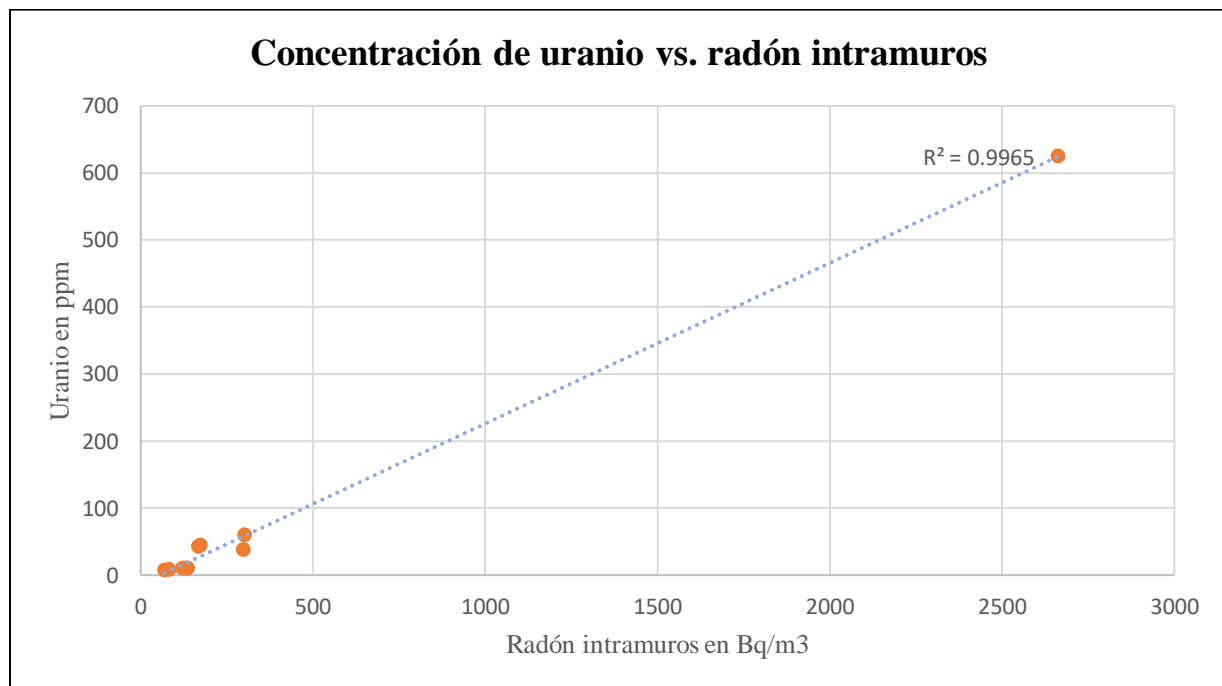
Resultados porcentuales de los niveles de amenaza radiactiva en La Baja



Como se ha mencionado anteriormente, para que se generen altos niveles de radón intramuros se necesita principalmente una fuente de uranio, dicha fuente puede provenir de los materiales de construcción o de las rocas subsuelo. En el presente caso de estudio se descartó la primera opción debido a que las casas están construidas de ladrillo y cemento, materiales que no representan una fuente significativa de uranio. Por el contrario, las rocas del subsuelo de la región La Baja, si cuentan con valores significativos de uranio, razón por la cual se realizó una correlación entre las concentraciones aproximadas de uranio del subsuelo de cada vivienda y el valor promedio de radón intramuros hallado en esta.

Figura 27

Correlación entre las concentraciones de uranio y radón intramuros.



Nota. R^2 : coeficiente de correlación de Pearson

La Figura 27 muestra la gráfica de la correlación lineal y el coeficiente de correlación de Pearson, para las dos variables mencionadas anteriormente. Se obtiene como resultado que dicho coeficiente dio un valor de 0.9925, lo cual indica una correlación fuerte entre ambas variables, según los valores establecidos en la Tabla 4.

Sin embargo, la presencia de altas concentraciones de uranio no es el único factor que se debe tener en cuenta cuando se mide el radón de forma intramural, también se deben analizar variables como la cercanía a estructuras falladas y la ventilación de la vivienda, debido a que estas facilitan la emanación de este gas desde el subsuelo y su ingreso a la vivienda, respectivamente.

Para la zona de estudio se encontró que la ventilación es una variable que no tiene mucha incidencia, debido a que en viviendas tanto ventiladas, como con poca ventilación, se obtuvieron valores de amenaza radiactiva por encima de los establecidos por la OMS. No obstante, en la vivienda cinco, esta variable pudo repercutir debido a que el equipo se instaló en un cuarto con ventilación nula y en la vivienda se esperaban valores más altos de radón, debido a que se sitúa en un área que cuenta con una alta concentración de uranio; entonces, es posible que los valores hayan sido bajos, porque al no haber ventilación, no se generan diferencias de presión que permitan el ingreso del gas radón dentro de la vivienda, haciendo que el principal mecanismo de ingreso llamado advección, explicado en el inciso 3.1.8, no se efectúe.

Por otra parte, respecto a la influencia tectónica; en las viviendas cuatro, ocho y nueve, se esperaban valores de radón menores a los obtenidos, debido a que las concentraciones de uranio en la zona donde se sitúan dichas viviendas son bajas; estas viviendas tienen una cercanía a la Falla de la Quebrada San Antonio, y existe la posibilidad de que los valores hayan sido más altos de los esperados, debido a la influencia de esta estructura.

Por último, se analizó la correlación de las concentraciones de radón con la temperatura y se determinó que, aunque esta no varía considerablemente, se obtuvo una correlación negativa moderada, es decir, los niveles de radón aumentaban cuando la temperatura disminuía.

6.3 Análisis de las encuestas realizadas

Con el propósito de conocer si los niveles de gas radón intramuros afectan o no la salud de los habitantes de La Baja, se realizaron encuestas a veinte familias del lugar, para esto primero se realizó una extensa búsqueda bibliográfica sobre las enfermedades relacionadas con el gas radón y sobre los factores que hacen que este se concentre en los hogares. Posteriormente, se generaron las preguntas, las cuales fueron revisadas por un profesional de trabajo social, para confirmar que tipo de interrogantes se podían aplicar y de qué forma hacer que tuvieran una mejor comprensión para los habitantes. Las preguntas se enfocaron en conocer el estado de su vivienda (ventilación, materiales de construcción, existencia de grietas, etc.), además de indagar si algún miembro del hogar padecía o no las enfermedades que se asocian principalmente al gas radón (enfermedades respiratorias, cáncer de pulmón, cáncer de estómago, etc.), y finalmente, preguntas acerca de su vida cotidiana (tipo de profesión, lugar de trabajo, existencia de fumadores de tabaco en la vivienda, etc.).

Las encuestas se aplicaron a las familias de las diez viviendas en las que se instaló el equipo *Radon Eye Plus* y además de esto se seleccionaron aleatoriamente, de las 25 viviendas restantes, a diez familias. Debido a la situación social actual de la región La Baja por el tema de la minería, se realizó la encuesta de forma anónima e informando a los encuestados que el fin de esta era netamente académico e investigativo, ya que, de esta forma, las personas respondían las preguntas con mayor honestidad. Las respuestas a las encuestas se encuentran en el Apéndice B y los resultados sintetizados se muestran en la Tabla 9.

Es importante mencionar que las respuestas que fueron brindadas por los habitantes no tienen ningún respaldo médico, a excepción de los casos positivos confirmados de cáncer de pulmón, en los cuales las personas afectadas si han tenido o tuvieron observación médica.

Tabla 9

Resultados sintetizados de las encuestas realizadas

Edad (años)	Años viviendo en La Baja	Materiales de la vivienda	Grietas	Ventilación en vivienda	Enfermedades respiratorias familiares	Cáncer de pulmón familiar *	Cáncer de estómago familiar**
62	34	Ladrillo y placa	No	No	Si, asma	No	No
39	20	Ladrillo y teja eternit	No	Si	No	No	No
39	21	Ladrillo y placa	No	Si	No	Si, tío	No
56	50	Ladrillo y teja eternit	No	Si	No	Si, esposa	No
42	42	Ladrillo y teja eternit	No	No	No	No	Si, abuela
68	68	Bloque de madera y techo en zinc	No	Si	No	No	No
41	41	Ladrillo y teja eternit	Si	Si	No	Si, hermano	No
28	5	Ladrillo y techo en zinc	Si	No	No	No	No
64	64	Bloque de madera y techo en zinc	No	Si	No	No	No
54	54	Ladrillo y techo en zinc	No	No	No	Sí, padre	No
60	30	Ladrillo y teja eternit	No	Si	No	No	No
48	1	Ladrillo y teja eternit	No	Si	No	No	No
60	7	Ladrillo y teja eternit	No	No	No	Si, tío	No
29	9	Ladrillo y placa	No	Si	No	No	No
25	25	Ladrillo y teja eternit	No	Si	No	No	No
26	7	Madera con cemento y teja eternit	No	Si	No	No	No
32	10	Ladrillo y techo en zinc	No	No	No	Si, padre	No
35	35	Ladrillo y placa	No	Si	No	Si, madre	No
46	20	Ladrillo y teja eternit	No	Si	No	No	No
40	15	Ladrillo y teja eternit	Si	No	No	No	No

Nota. * Todos los familiares positivos en cáncer de pulmón viven o vivieron en La Baja. **La persona con cáncer de estómago vivió toda su vida en La Baja.

Al realizar la comparación entre la edad de las personas encuestadas y el tiempo que estas llevan viviendo en La Baja, es posible establecer que el 35% de estas ha vivido toda su vida en la zona, mientras que el 40% ha vivido la mitad de su edad actual y el 25% restante lleva menos de diez años residiendo allí.

Como se mencionó en el apartado anterior, los materiales de construcción de las viviendas son un factor importante cuando se habla de radón intramural, debido a que, pueden actuar como fuente de radón, además, si dichos materiales presentan porosidades significativas, favorecen el ingreso de radón a la vivienda. En el caso de estudio, un 90% de las viviendas está construida con ladrillo y cemento; y un 10% con bloques de madera y cemento. El ladrillo presenta una porosidad media, pero al estar revestido de cemento, hace que tenga una porosidad casi nula; por el lado de la madera, esta cuenta con una porosidad mayor.

Así como los materiales tienen un rol significativo en el ingreso de radón a las viviendas, la presencia de grietas también, debido a que, si una pared o suelo presenta una grieta, esta actúa como un ducto por el cual se puede transportar el gas radón desde las rocas del subsuelo que lo contienen, hasta el interior de las viviendas. En el caso de estudio, el 15% de las viviendas en las cuales se aplicó la encuesta tiene grietas significativas.

Por otra parte, de las veinte personas que respondieron la encuesta, se encontró que el 95% presenta un estado de salud óptimo, sin embargo, el 35% de estas tiene o ha tenido en su vivienda familiares cercanos que han padecido cáncer de pulmón. Como se mencionó en el apartado 3.1.9, el gas radón es la segunda causa mundial por la cual se produce este tipo de cáncer, en personas fumadoras, y la causa primera en las que no, por ende, se profundizó la encuesta a estas personas, preguntando acerca de sus familiares con casos positivos confirmados de cáncer de pulmón y los resultados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Datos de las personas que han padecido cáncer de pulmón en La Baja, según encuestas realizadas

Edad (años)	Tiempo viviendo en La Baja (años)	¿Siguió con vida la persona?, si no, ¿a qué edad murió?	Actividad comercial	¿La vivienda de esta persona estaba ubicada arriba o abajo del parqueadero? *
54	32	Sigue con vida, reside actualmente en Bogotá para recibir el tratamiento a la enfermedad	Ama de casa	Abajo
89	89	Fallecido	Minero	Arriba
72	60	Fallecido	Mineo	Arriba
68	40	Fallecido	Pintor y constructor, también minero	Abajo
46	42	Sigue con vida, hace cuatro años se descubrió su cáncer y se fue a vivir al departamento del Cesar	Minero	Arriba
77	55	Fallecido	Minero	Arriba
61	61	Fallecido	Minera (no en mina, sino procesando)	Arriba

Nota. * Se realiza esta pregunta debido a que en el inciso 6.1 se identificó que los valores más altos de uranio se encuentran de la zona del parqueadero hacia arriba y los valores más moderados, hacia abajo, razón por la cual las viviendas ubicadas en la zona de arriba tienen mayor exposición a la radiación. También se consultó si las personas detectadas con cáncer de pulmón habían sido fumadores de tabaco y en todos los casos, se obtuvieron respuestas negativas.

Con la finalidad de determinar si existió una posible relación entre las enfermedades y el gas radón en el caso de estudio, se realizó un breve análisis de los datos. En donde el 28.57% de las personas enfermas o fallecidas vivió toda su vida en La Baja y el 71.43% restante vivió o ha

vivido más de la mitad de su vida allí y, por lo tanto, muy seguramente estas personas padecieron la enfermedad mientras vivían en el lugar. Por otra parte, el 71.43% de estas personas vivía hacia la parte superior de La Baja, en donde se ha determinado que los niveles de uranio y gas radón aumentan. Además, el 85.71% de estas personas se dedicaba a la minería, es decir, pasaba gran parte de su día cerca de las minas en donde hay mayores niveles de uranio y, por ende, mayor radiactividad.

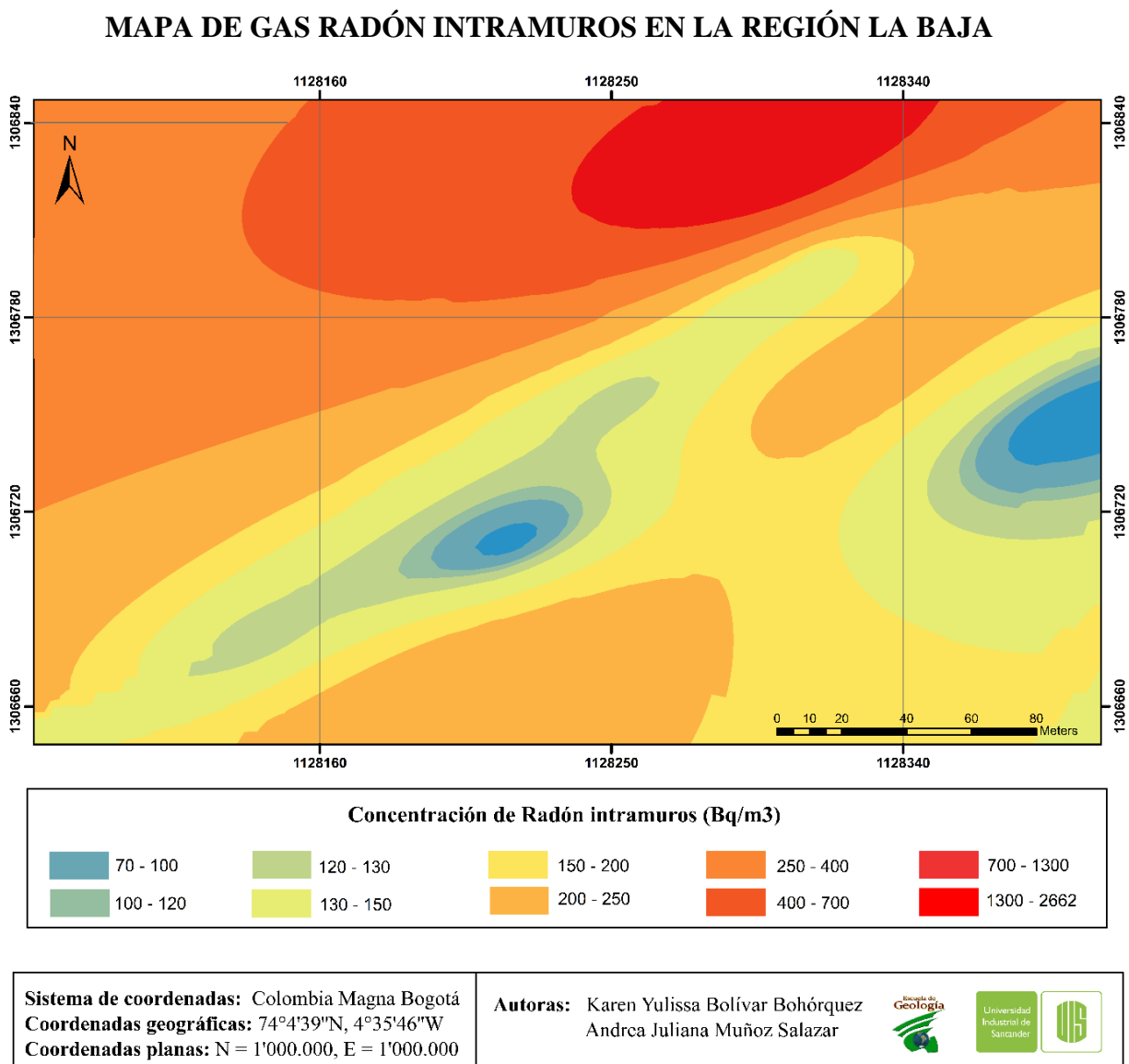
Aunque se necesitan estudios que indaguen más en la salud de los habitantes, la presente investigación establece que el gas radón pudo jugar un papel fundamental en el desarrollo del cáncer de pulmón en las personas mencionadas, debido al largo tiempo que residieron en La Baja, la ubicación de sus viviendas y su actividad comercial. Asimismo, debido a las anomalías de uranio reportadas en la zona y a los datos obtenidos de las encuestas como el bajo grado de ventilación y presencia de grietas que presentan algunas viviendas, es recomendable que se empiecen a tomar medidas de mitigación al respecto, al igual que chequeos médicos principalmente en aquellas personas que llevan toda su vida o más de la mitad viviendo en La Baja y/o trabajan en las minas.

6.4 Mapa de amenaza radiactiva de radón en La Baja

Con base en los resultados de las concentraciones promedio de las diez viviendas, los cuales se encuentran en la Tabla 8, se hizo una interpolación utilizando el método de *Kriging*, el resultado de este se muestra en la Figura 28. Adicionalmente, se realizó una comparación de este con el mapa de uranio, en donde es posible observar un grado de similitud entre ambos mapas, ya que en ambos las concentraciones aumentan de sur a norte, conforme presentan cercanía al Filón de Pie de Gallo.

Figura 28

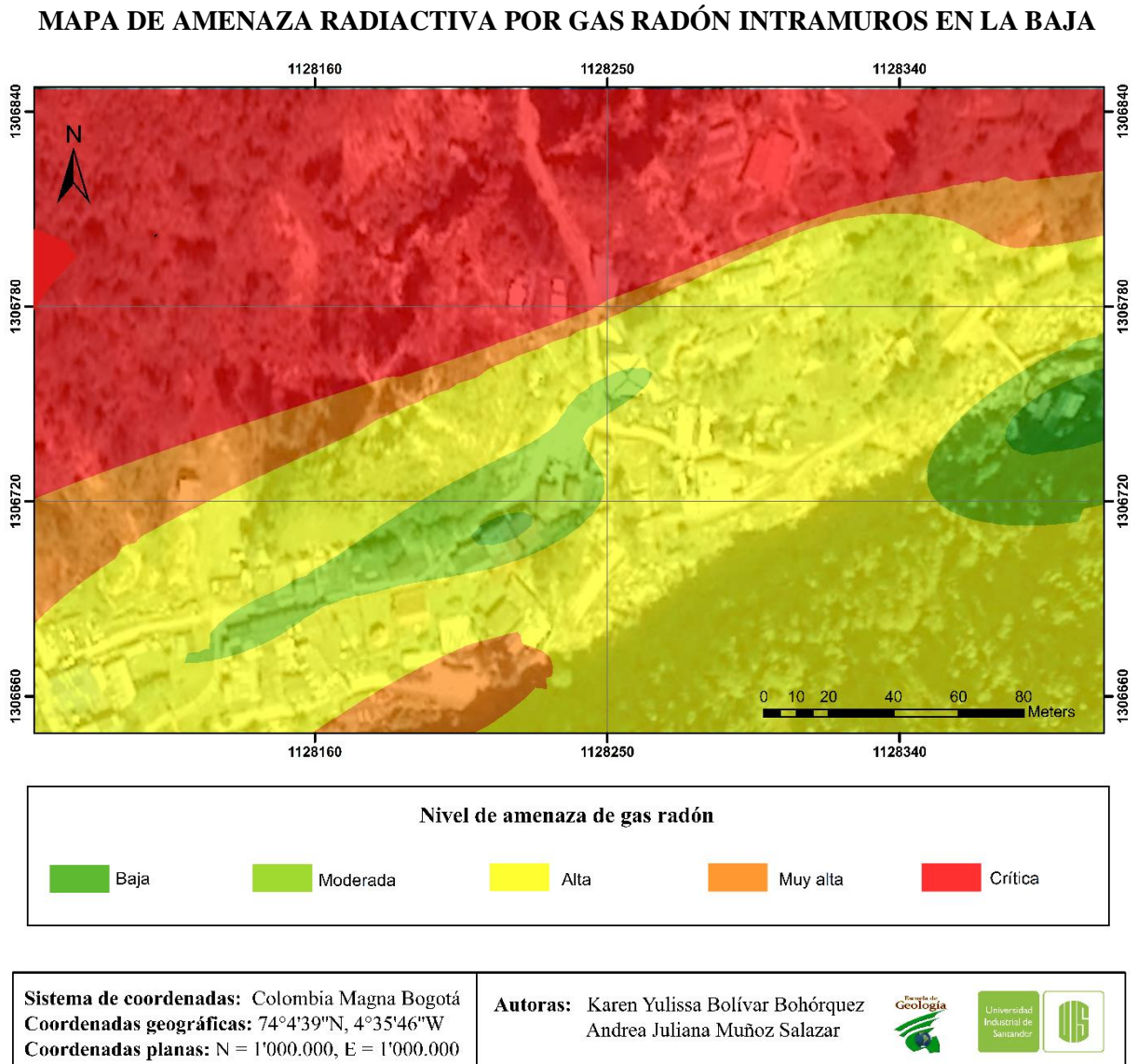
Mapa de gas radón intramuros en Bq/m³ de la zona de estudio



Además, se realizó un mapa de amenaza radiactiva con base en los parámetros establecidos en la Tabla 7 y el resultado se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Mapa de amenaza radiactiva por gas radón intramuros de la zona de estudio



7. Conclusiones

Las mediciones gamma espectrales tomadas en el presente estudio indican que toda la zona presenta anomalías positivas de uranio, debido a que la totalidad de los valores adquiridos supera la media mundial de este elemento; sin embargo, para ser un área tan reducida, tiene un rango de concentraciones muy grade, que van desde 6.4 hasta 1419 ppm, por ende, se realizó la sectorización de la anomalía por medio de una interpolación, que permitió identificar que el aumento en la concentración de uranio crece en sentido SW a NE, hacia donde se localiza el Filón Pie de Gallo.

Los resultados de radón intramuros obtenidos en el 80% de las viviendas muestreadas superan los 100 Bq/m³, límite permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud. Aunque Colombia no cuenta con una norma en la que se establezca un valor límite de referencia, si cuenta con un valor crítico, que sugiere una intervención inmediata, el cual es de 400 Bq/m³; el 10% de las viviendas analizadas supera dicho valor.

Se estableció que los altos niveles de gas radón intramuros son causados por las elevadas concentraciones de uranio, ya que se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.9925 entre estas dos concentraciones; asimismo, otros factores que influyen, en menor medida, son el grado de ventilación y la distancia a fallas y/o lineamientos locales.

Los altos niveles de radón encontrados hacen que se establezca una preocupación en torno a la salud de los habitantes de la región La Baja, debido a que se ha demostrado científicamente que este gas es la segunda causa que genera cáncer de pulmón en el mundo, en personas fumadoras, y la primera causa en las que no; en las veinte encuestas realizadas se obtuvo que, actualmente, ninguna persona en La Baja ha recibido un criterio médico que determine si padece cáncer de

pulmón, sin embargo, algunas personas encuestadas tienen familiares habitantes de La Baja, que han padecido esta enfermedad. En total, se reportaron siete personas con casos cáncer de pulmón confirmados y las condiciones en las cuales se encontraban estas personas mientras se desarrolló la enfermedad, permiten concluir que existe una probabilidad muy alta de que el radón haya sido el responsable de dicha enfermedad.

En el análisis de la amenaza radiactiva se obtuvo que el 30% de las viviendas presenta una amenaza moderada, el 30% una amenaza alta, el 10% una amenaza muy alta y el 10% una amenaza crítica; el 20% restante presenta amenaza radiactiva baja.

8. Recomendaciones

El presente trabajo de grado recomienda realizar mediciones gammaespectrales más exhaustivas en las zonas que no se tomaron en este proyecto debido a la dificultad en cuanto al acceso, para un mayor muestreo y, por ende, una interpolación con mayor grado de detalle de uranio, debido al gran variabilidad que presenta este elemento hacia la parte NE de la zona de estudio y en menor medida hacia la parte SW.

Además, es necesario realizar mediciones de gas radón en el aire mediante estaciones con detectores pasivos, aptos para altas humedades, que midan durante un largo periodo de tiempo los niveles de este gas, con la finalidad de obtener niveles de gas radón más representativos. Lo anterior, con la finalidad de generar un mapa de correlación muy cercano a la realidad y poder predecir con mayor certeza el nivel de radiactividad de la zona.

Es importante medir y evaluar la radioactividad y la presencia de radón en el recurso agua, , ya que al ser un gas soluble en esta, puede estar generando enfermedades como cáncer de estómago en la población de La Baja, o sectores aledaños.

Por otra parte, con base en las encuestas realizadas en la salud pública, y a los resultados obtenidos en este proyecto, se hace un llamado de atención a las entidades de control y salud, y especialmente a la alcaldía del municipio de California, para que consideren esta geoamenaza en el desarrollo del Esquema de Ordenamiento Territorial de la región La Baja. Además de esto, garantizar a todos los habitantes de La Baja chequeos médicos para detectar posibles enfermedades, relacionadas con el gas radón, a tiempo. Asimismo, se recomienda a los entes ambientales encargados, establecer lineamientos para prevenir y mitigar los niveles altos de gas radón, y, sobre todo, establecer un valor de límite permisible, ya que ni la región ni el país tienen uno hasta ahora.

Se propone el área de la región La Baja, como un sitio piloto en el estudio e implementación de las normas referentes a la seguridad radiológica asociada al gas radón en el país. Además, se recomienda implementar las metodologías usadas en Europa para tal fin, adaptándolas a las condiciones locales.

Referencias Bibliográficas

- Arvela, H., Holmgren, O., y Hänninen, P. (2015). Effect of soil moisture on seasonal variation in indoor radon concentration: modelling and measurements in 326 Finnish houses. *Radiation protection dosimetry*, 168. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv182>
- Auvinen, A., Salonen, L., Pekkanen, J., Pukkala, E., Ilus, T., y Kurttio, P. (2005). Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: A case-cohort study in Finland. *International journal of cancer*, 114, 109-13. <http://doi.org/10.1002/ijc.20680>
- BEIR VI (1999). *Health Effects of Exposure to Radon*. National Academies.
- Bueno, J. (1955). Yacimientos de uranio y otros metales en la región de La Baja, municipio de California, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 3 (3), 1–116. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol3.3.1955.144>
- Burbano, V., Garzón, G., y Meza, L. (2018). Niveles radiactivos respirables en la cueva del nitro, Villanueva, Santander, Colombia. *I Congreso Colombiano de Espeleología y VIII Congreso Espeleológico de América Latina y el Caribe*.
- Canadian Nuclear Safety Commission. (2014). *Radon in Canada's Uranium Industry*. Canadian Nuclear Safety Commission. [Nuclear Safety Commission. Nuclearsafety.gc.ca. https://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/radon-fact-sheet.cfm](https://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/radon-fact-sheet.cfm)
- Canoba, A., Bomben, A., y López, F. (1998). Determinación de radón en agua: comparación de diferentes métodos de medición. *IV Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, La Habana, Cuba*.
- Canoba A., Arnaud, M., López, F., y Olivera, A. (2002). Mediciones de gas radón en el interior de viviendas de la República Argentina. *Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina*, 16.

Clark, S. *Handbook of physical constants*. Geological Society of America.

Consejo de Seguridad Nuclear (2009). *Detección y dosimetría de la radiación*.

https://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/537701088_2411200913237.pdf

Consejo de Seguridad Nuclear (2016). *Estudio de la instrumentación de vigilancia radiológica*

ambiental y de medida de radón en condiciones ambientales extremas.

[https://www.csn.es/documents/10182/103228/DID22.16+Estudio+de+la+instrumentaci%](https://www.csn.es/documents/10182/103228/DID22.16+Estudio+de+la+instrumentaci%C3%B3n+de+vigilancia+radiol%C3%B3gica+ambiental+y+de+medida+de+rad%C3%B3n+en+condiciones+ambientales+extremas)

[C3%B3n+de+vigilancia+radiol%C3%B3gica+ambiental+y+de+medida+de+rad%C3%B](https://www.csn.es/documents/10182/103228/DID22.16+Estudio+de+la+instrumentaci%C3%B3n+de+vigilancia+radiol%C3%B3gica+ambiental+y+de+medida+de+rad%C3%B3n+en+condiciones+ambientales+extremas)

[3n+en+condiciones+ambientales+extremas](https://www.csn.es/documents/10182/103228/DID22.16+Estudio+de+la+instrumentaci%C3%B3n+de+vigilancia+radiol%C3%B3gica+ambiental+y+de+medida+de+rad%C3%B3n+en+condiciones+ambientales+extremas)

Cuadrado, C. y Carrasco, J. (2016). Medición de la Concentración de ^{222}Rn en Residencias

y Lugares de Trabajo en la Ciudad de Riobamba. *ISSSD 2016, Chiapas, México*.

Cuney, M., y Kyser, K. (2008). *Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and*

implications for exploration. Series editorial.

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*, 330 (7485), 223.

<https://www.bmj.com/content/330/7485/223>

Denman, A., Crockett, R., Groves, C., Phillips, P., y Gillmore G. Exploring the relationship

between social deprivation and domestic radon levels in the East Midlands, UK. *Journal*

of Environmental Radioactivity, 199-200, 84-98.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X18306660>

Díaz, M., Sajo-Bohus, L., Sandoval, M., Vergara, I., y Martínez-Ovalle, S. (2019). Radon

concentration in hydrogeothermal deposit and spas of Boyacá, Colombia. *Applied*

Radiation and Isotopes, 145, 131-136. <https://www.sciencedirect.com/>

- Domínguez, M. (2021). *Estudio exploratorio de radón residencial en Bogotá, Colombia y municipios aledaños* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Emsley, J. (2001). *An A-Z Guide to the elements nature's building blocks*. Oxford University Press.
- Espinoza, G., y Ángeles, A. (2018). Radon intramuros y Salud Pública. https://www.fisica.unam.mx/personales/espinoza/files/2018/20180307_LIBRO_Radon_intramuros_y_salud_publica-Espinoza_y_Angeles_16p.pdf
- Field, R., Steck, D., Smith, B., Brus, C., Fisher, E., Neuberger, J., Platz, C., Robinson, R., Woolson R., y Lynch, C. (2000). Residential Radon Gas Exposure and Lung Cancer: The Iowa Radon Lung Cancer Study. *American Journal of Epidemiology*, 151 (11), 1091-1102. <https://academic.oup.com/aje/article/151/11/1091/87328>
- Field, R. (2015). Radon: An overview of health effects. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 4, 745-753. <http://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.000957>
- Garzón, G., Hincapié, W., Salazar, S. (2002). Aire interno: Amenaza radiológica natural en el sureste de Manizales, Caldas. *IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Publica, Bogotá, Colombia*.
- Gil, D., y Pacheco, C. (2022). *Estudio petrográfico de la ocurrencia de minerales de uranio en el sistema de alta sulfuración en la zona de la Baja, California (Santander)* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.
- Giraldo, A., Ruano, A., Varela, L., Barros, J. M., y Pérez, M. (2020). Residential radon in central and south America: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (12). <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/12/4550>

- Goldsmith, R., Marvin, R., y Mehnert, H. (1971). Radiometric Ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. En W. Radlinski (Ed), *Geological Survey* (pp. 44-50). United States Government printing office.
- Guevara, V. (2018). *Medición de Radón 222 en lugares de trabajo ubicados en sótanos* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
- Gundersen, L., Schumann, R., y W., W. (1993). The usgs/epa state radon potential assessments: An introduction. *Geological Radon Potential of EPA Region 9*, 1–15.
- Hernández, J., Espinosa, J., Peñaloza, M., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., y Bermúdez, V. Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Revista AVFT*, 37 (5). https://www.revistaavft.com/images/revistas/2018/avft_5_2018/25sobre_uso_adecuado_coeficiente.pdf
- International Commission on Radiological Protection (ICRP) (1993). Protection Against Radon-222 at Home and at Work. *Annals of the ICRP*, 23 (2), 7-30.
- Jaramillo, L., y Mendoza, H. (1975). Geología y geoquímica del área de California, Santander. *Boletín Geológico*, 22 (2), 4–57. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/392/341>
- Julivert, M., y Téllez, I. (1963). Sobre la Presencia de Fallas de Edad Pre-cretácica y Post-Girón (Jura-Triásico) en el Flanco Oeste del Macizo de Santander (Cord. Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 4 (12), 5-17. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/download/5651/5820/27131>

- Kusky, T. (2015). *Encyclopedia Of Earth Science*.
https://archive.org/details/encyclopediaofea0000kusk_p3w4
- L'Annunziata, M. (2007). *Radioactivity. Introduction and history*. Elsevier Science & Technology
- Lehrer, S., Rheinstein, P., y Rosenzweig, K. (2017). Association of radon background and total background ionizing radiation with Alzheimer's disease deaths in U.S. States. *Journal of Alzheimer's Disease*, 59, 1-5. <http://doi.org/10.3233/JAD-170308>
- López, B., e Iturbe, J. (2004). Radiactividad natural y artificial en nuestro entorno. *Revista Ciencia*.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_2/radiactividad_nuclear.pdf
- Mantilla, L., Valencia, V., Barra, F., Pinto, J., y Colegial, J. (2009). Geocronología U-Pb de los cuerpos porfiriticos del distrito aurífero de Vetas- California (dpto. de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 31 (1).
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/164>
- Mantilla, L., Mendoza, H., Bissing, T., y Craig, H. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33 (1).
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/2471>
- Mantilla, L, Bissing, T., Valencia, V., y Craig, H (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 235-249.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981113000436>
- Mendoza, H., y Jaramillo, L. (1979). Geología y geoquímica del área de California, Santander. *Boletín Geológico*, 22 (2), 4-57. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol22.2.1979.392>

- Miles, J. (2004). Methods of radon measurement and devices: Proceedings of the 4th European conference on protection against radon at home and at work conference programme and session presentations. *International Nuclear Information System*, 36 (3).
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/010/36010924.pdf?r=1
- Ministerio de Minas y Energía. (2002). *Resolución 18-1434. (Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica)*. Sistema único de información normativa. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=4032693>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2011). *33 mil personas al año mueren de Cáncer en Colombia*. GOV.CO <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/33-milpersonasala%20muerende%20cancerenColombia.aspx#:~:text=En%20Colombia%20por%20cancer%20de%20pulm%C3%B3n%20mueren%20cada%20a%C3%B1o%203.875%20personas>
- Mullerova, M., Holy, K., Blahusiak, P., y Bulko, M. (2017). Study of radon exhalation from the soil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 35 (2).
<http://doi.org/10.1007/s10967-017-5657-4>
- Organización Mundial de la Salud (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública*.
https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf;jsessionid=27D4E389E3AA41B22AE9E617B6B4F464?sequence=1
- Parra, P. (2007). *Análisis estructural detallado con fines exploratorios en el sector de la bodega, municipio de California departamento de Santander* (tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

- Ramírez, P., Morón, C., García, A., y Correa, E. (2011). Estudio de las concentraciones y mecanismos de desplazamiento de radón y descendientes en recintos cerrados. *Congreso de Innovación Tecnológica en la Edificación CITE, Madrid, España*.
- Redondo, R. (2008). Fundamentos teóricos y técnicos de los isótopos estables. *Universidad Autónoma de Madrid*. https://www.researchgate.net/publication/255645621_Fundamentos_teoricos_y_tecnicos_de_los_isotopos_estables
- Rodríguez, A., Bissig, T., Hart, C., y Mantilla, L. (2014). *Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes* (tesis de maestría). Universidad de Columbia Británica (The University of British Columbia), Vancouver, Canadá.
- Rodríguez, A., Pozas, A., García, A., Sánchez, R., y Peña, A. (2015). *Física y química*. McGraw-Hill
- Ruano, A., Aragonés, N., Kelsey, K., Pérez, M., Piñeiro, M., López, G., y Barros, J. (2017). Residential radon exposure and brain cancer: An ecological study in a radon prone area (Galicia, Spain). *Scientific Reports*, 7. <http://doi.org/10.1038/s41598-017-03938-9>
- Ruano, A., Quindós, L., Sainz, C., y Barros, J. (2014). Radón interior y salud pública en España. Tiempo para la acción. *Gaceta Sanitaria*, 28 (6), 439-441. <https://www.gacetasanitaria.org/>
- Sánchez, M. (2022). *Influencia de la humedad relativa en las medidas de haces de radiación realizadas mediante cámaras de ionización abiertas al aire* (tesis de maestría). Universidad de Granada, España.
- Salazar, S. P., Hincapié, W. A., y Garzón, G. (2004). El gas Radón: Una amenaza radiactiva natural. *Boletín de Geología*, 26 (42), 87-92.

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/download/8252/8241/>

Servicio Geológico Colombiano (2016). Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el área Simacota – Lebrija y área de California, departamento de Santander. https://recordcenter.sgc.gov.co/B21/456_17%20Exp_Gama_K_U_Th/Documento/PDF/Inf_Exp_GamaEspec_K_U_Th_Sim_Leb_Cal.pdf

Schubert, M., Musolff, A., y Weiss, H. (2018). Influences of meteorological parameters on indoor radon concentrations (^{222}Rn) excluding the effects of forced ventilation and radon exhalation from soil and building materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 81-85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X18302844>

Smith, K., y Huyck, H. (1999). An overview of the abundance, relative mobility, bioavailability, and human toxicity of metals. *Reviews in Economic Geology*, 6A and 6B. https://clui.in.org/conf/tio/r10hardrock3_030513/Ch2Smith&Huyck_SEG1999.pdf

Turner, M. C., Krewski, D., Chen, Y., Pope, C. A., Gapstur, S. M., y Thun, M. J. (2012). Radon and copd mortality in the american cancer society cohort. *European Respiratory Journal*, 39 (5), 1113–1119. <https://erj.ersjournals.com/content/39/5/1113>

Urueña, C., y Zuluaga, C. (2011). Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetás – Santander. *Geología Colombiana*, 36 (1), 37-56. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/22441>

Vargas, H., Arias, T., Jaramillo, C., y Téllez, I. (1981). Geología del Cuadrángulo I-13, Málaga. *Boletín Geológico*, 24 (3), 2–84. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol24.3.1981.71>

- Velandia, F., Cetina, M., Castellanos, E., y Gómez, Z. (2016). Análisis de fracturas y cinemática de fallas geológicas como primer aporte al modelo conceptual de aguas subterráneas en la zona de Charta, Macizo de Santander Colombia. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 31 (2), 37-56. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/view/16063
- Viloria, T., Palacios, D., Sajo, L., Núñez, R., y Fernández, G. (2004). Concentraciones de Radón en la Zona Urbana de la Parroquia Cristo de Aranza, Estado Zulia, Venezuela. Nota Técnica. *Ciencia*, 12 (4), 283 – 289. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/view/9228>
- Vive sin Radón (s.f). *En Europa*. Vive sin Radón. <https://vivesinradon.org/en-europa/>
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz B., y Restrepo A. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21 (1-3), 1–134. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>
- White, W. (2015). *Isotope geochemistry*. John Wiley & Sons, Incorporated