



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de las propiedades de rocas graníticas y la relación con
la emanación de gas radón*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Martín de Jesús Díaz

DIRECTORES: Lorena González Gil
Jorge Feijoo Conde

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de las propiedades de rocas graníticas y la relación con
la emanación de gas radón*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

La relación de las propiedades del granito (tanto físicas como de composición) y su correlación con la emanación del gas radón ha sido un campo exento de investigación desde que el radón se ha convertido en objeto de estudio en la Escuela Naval Militar. En el presente trabajo de fin de grado se tratará de elaborar una serie de estudios que nos permitan relacionar las propiedades del granito con su emanación de este gas. En este caso se estudiarán dos tipos de piedra granítica que hemos determinado como GM y GS, las cuales compararemos. Ambas muestras proceden de la falla que separa dos tipos de roca granítica en la ENM

Se estudiarán las propiedades físicas del granito, teniendo en cuenta su densidad, porosidad, porosimetría y dureza. Además, se estudiará de manera paralela la caracterización mineralógica de las rocas graníticas con una posterior degradación de la roca (a través de hidrólisis) en laboratorios para el análisis de las concentraciones de este gas. Para ello, se comparará la radiación que emiten estas rocas antes y después de la hidrólisis.

Posteriormente se discutirán los resultados relacionando las propiedades físicas de cada una de las rocas y su influencia en la concentración de gas.

Finalmente, de los resultados obtenidos se puede extraer como conclusiones principales que la roca granítica GS tiene mayor contribución a la emisión de radionucleidos que GM. Además de que la composición mineralógica de las rocas graníticas tiene más influencia que las propiedades físico-mecánicas de la roca.

PALABRAS CLAVE

Granito, Propiedades minerales, degradación, Radioactividad, Radiación.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción al gas radón	6
1.2 Motivación	6
1.3 Justificación de los análisis	7
1.4 Objetivos	8
2 Estado del arte	10
2.1 El Radón.....	10
2.1.1 Características y aplicaciones	10
2.1.2 Radioactividad	11
2.1.3 Efectos asociados	12
2.1.4 Origen del radón y presencia en diferentes tipos de rocas.....	12
2.1.1 Propiedades mineralógicas del granito	15
2.1.2 Regiones geológicas de España y su relación con el ^{222}Rn	16
2.2 Legislación frente al radón.....	18
2.2.1 Normativa en España	18
2.2.2 Prevención frente a riesgos laborales.....	19
2.3 Vías de entradas del radón en edificios.....	19
2.3.1 Entrada a través de grietas	20
2.3.2 Entrada a través de muros y paredes.....	21
2.3.3 Entrada a través de agua subterránea.....	21
2.3.4 Entrada a través de materiales de construcción	22
3 Desarrollo del TFG	23
3.1 Muestras de rocas	23
3.2 Análisis composicional, mineralógico, elemental y radioactividad.....	23
3.2.1 Difracción de rayos X.....	23
3.2.2 Petrografía.....	24
3.2.3 Fluorescencia de rayos X.....	24
3.2.4 Espectrometría rayos Gamma.....	25
3.3 Análisis de las propiedades físico-mecánicas	25
3.3.1 Porosidad accesible al agua	25

3.3.2	Análisis porosidad accesible al agua	26
3.3.3	Ensayo de porosidad accesible al Hg y porosimetría	27
3.3.4	Análisis de Resistencia al impacto	28
3.3.5	Ensayo de exhalación de radón en campana estanca sin degradación.....	28
3.3.6	Ensayo exhalación de radón en campana de secado con degradación	29
4	Resultados	31
4.1	Análisis mineralógico y de radioactividad.....	31
4.2	Análisis de las propiedades físico-mecánicas	34
4.3	Ensayo de exhalación de radón en campana estanca sin degradación.....	38
4.4	Ensayos de exhalación del radón	39
5	Conclusiones y líneas futuras	45
5.1	Conclusiones	45
5.2	Líneas futuras	46
6	Bibliografía.....	47
	Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	49
	Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Composición suelo ENM- IGME	7
Figura 1-2 Imagen aérea de la disposición aproximada de la falla en la ENM.....	8
Figura 2-1 Tabla periódica de elementos químicos [6].	11
Figura 2-2 Cadena desintegración Radón 226, 224, 223 [8].....	11
Figura 2-3 Gráfico de inhalación del Radón [7].....	12
Figura 2-4 Cadena desintegración del Uranio 238 [5]	13
Figura 2-5 Clasificación de las rocas según porcentaje de silicato [5].....	14
Figura 2-6 Composición mineralógica granito en orden descendente y composición de Uranio en ppm [5].....	14
Figura 2-7 Clasificación de las rocas ígneas [4].....	15
Figura 2-8 Distribución geológica en España [8].....	16
Figura 2-9 Concentración de radón en interiores de edificios en España [3].....	17
Figura 2-10 Entrada radón a Edificios [7]	20
Figura 2-11 Influencia de la construcción en pendiente con la penetración de radón en el interior de viviendas [11].....	21
Figura 2-12 Contribución fuentes de emisión ionizante en el interior de un edificio (elaboración propia).	22
Figura 3-1. Modelo de roca granítica empleado para estudio	23
Figura 3-2 Muestra de ensayo inmersión parcial	26
Figura 3-3 Paño húmedo y peso	26
Figura 3-4 Ensayo porosimetría accesible al Hg.....	27
Figura 3-5 Material utilizado (Durómetro).....	28
Figura 3-6 Medidor de Radón empleado en ensayos	29
Figura 3-7 Medidor de Radón empleado en ensayos	29
Figura 3-8 Montaje Desorción con gel de Sílice (elaboración propia)	30
Figura 4-1 Difractograma de rayos X de los granitos GS y GM.....	31
Figura 4-2 Imágenes de luz polarizada con nicols paralelos (izquierda) y nicols cruzados (derecha) del granito GM.....	32
Figura 4-3 Imágenes de luz polarizada con nicols paralelos (izquierda) y nicols cruzados (derecha) del granito GS.	32
Figura 4-4 Distribución porosimétrica de los granitos del estudio obtenida por inyección de mercurio.	35
Figura 4-5 Contenido de agua por superficie alcanzado durante el ensayo de absorción capilar para el granito GS y GM.....	36

Figura 4-6 Grado de saturación alcanzado durante el ensayo de absorción capilar para el granito GS y GM	36
Figura 4-7 Diámetro de poro GM y GS (Elaboración propia)	37
Figura 4-8 Emisión de Radón dentro de la campana de desecado sin rocas (Elaboración propia) ..	38
Figura 4-9 Exhalación de radón en rocas GS y GM. (Elaboración propia)	39
Figura 4-10 Emisión de radón durante la absorción de HCl en la roca GM	40
Figura 4-11 Emisión de Radón durante desorción de HCl en la roca GM.....	40
Figura 4-12 12 Emisión de radón durante las etapas de absorción y desorción de HCl en la roca GM	41
Figura 4-13 Emisión radón durante absorción GS	41
Figura 4-14 Emisión de radón durante fase desorción roca GS	42
Figura 4-15 Gráfica Absorción y Desorción roca GS	43
Figura 4-16 Gráfica Absorción GS y GM	43
Figura 4-17 Gráficas desorción GM y GS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Análisis elemental de los granitos GS y GM en porcentaje en peso, obtenido a través de fluorescencia de rayos X.....	33
Tabla 2 Actividad radioactiva de algunos de los minerales presentes en GS y GM.....	33
Tabla 3 Actividad radioactiva de algunos de los minerales presentes en los granitos GM y GS. ...	34
Tabla 4 Propiedades de los granitos sobre los que se emplazan las instalaciones del edificio principal del CUD-ENM.	34

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción al gas radón

El gas radón (Rn) es un elemento de la tabla periódica que es de origen natural, procede de la desintegración del ^{226}Ra , y está presente en el aire, en el agua y en el suelo. Pertenece al grupo de gases nobles y de por sí no es un gas que tenga ningún peligro [1].

Sin embargo, el radón se desintegra en elementos sólidos radioactivos emitiendo partículas alfa, como el ^{218}Po , ^{214}Po y ^{214}Pb , adhiriéndose al aire que respiramos a través del polvo y otras partículas, siendo consecuentemente inhalado por los pulmones [1].

Las altas concentraciones de radón en edificios e instalaciones están directamente relacionadas con la aparición de enfermedades respiratorias tales como el cáncer de pulmón. Esta última enfermedad es pues, considerada según la OMS como la primera causa de cáncer de pulmón ajena al consumo de tabaco en el mundo [1].

1.2 Motivación

En la Escuela Naval Militar (ENM), el gas radón ha sido un tema que ha sido tratado e investigado debido a la cantidad de horas que pasan los alumnos, oficiales, personal docente y demás personal laboral en espacios cerrados. El hecho de estar expuesto durante un tiempo prolongado a un aire de mala calidad puede tener efectos a corto plazo tales como irritación en los ojos, dolor de garganta o picor de nariz, y más a largo plazo, originar enfermedades respiratorias tales como asma, insuficiencias respiratorias e incluso en el peor de los casos, cáncer.

Es por ello que el gas radón ha sido objeto de estudio en la ENM durante varios años. Se han realizado investigaciones acerca de cómo mitigar sus efectos a través de hábitos que reduzcan las concentraciones de radón en edificios cerrados e identificar los edificios en los que se concentra más cantidad de este gas nocivo para la salud. Se ha corroborado que, en ciertos espacios de la ENM, las concentraciones de Rn son muy elevadas, llegando a superar los límites establecidos por la normativa vigente. Ejemplo de ello son zonas como la planta baja del CUD [1].

Se ha tratado de investigar con anterioridad la manera de mitigar los efectos de este gas a través de diferentes medidas. Entre las medidas de mitigación más efectivas destacan la despresurización del terreno para favorecer la expulsión de radón al exterior y evitar que penetre por los poros y grietas del suelo y de las paredes de los edificios. Otra medida sería la ventilación de los espacios habitables y por último y no por ello menos importante, sería establecer barreras de radón que funcionasen como una lámina estanca que impidiese la entrada de radón a través del suelo subterráneo. [2]

En estudios previos realizados en ENM se ha conseguido relacionar cómo las condiciones climatológicas afectan a la emanación de este gas de la roca y la manera que las condiciones del terreno que se edifica afectan a estas emisiones [2]. Sin embargo, todavía no se ha relacionado qué propiedades físicas del granito, tales como su composición mineral, dureza, porosidad y distribución porosimétrica determinan la emanación de gas radón al ambiente. Se considera que este es un factor determinante que podría explicar la diferencia de concentraciones de gas radón observada entre despachos contiguos de la planta baja del CUD, en donde el contacto de los materiales de construcción con diferentes rocas graníticas que conforma el suelo sobre el que se ha construido el edificio, provoca que las concentraciones de radón sean más altas en la zona oeste del mismo [2].

1.3 Justificación de los análisis

La zona de Pontevedra se encuentra en una región geológica conocida como la Zona Hercínica, que se formó durante la Era Paleozoica, hace más de 300 millones de años. Esta zona está compuesta principalmente por rocas metamórficas, como esquistos, pizarras y gneises, pero también existen algunos afloramientos de granito [3].

El granito es una roca ígnea plutónica compuesta principalmente por cuarzo, feldespato y mica, que se forma a partir del enfriamiento lento del magma profundo bajo la superficie de la Tierra. En la zona de Pontevedra, el granito se encuentra en forma de masas intrusivas que se introdujeron en la roca metamórfica circundante.

El granito de la zona de Pontevedra es de tipo biotítico y pertenece al grupo de granitos de dos micas. Estos granitos tienen una textura porfídica, lo que significa que tienen cristales grandes de feldespato que se encuentran dispersos en una matriz fina de cuarzo y mica. Los cristales grandes de feldespato pueden alcanzar tamaños de varios centímetros de longitud y se presentan en forma de prismas alargados [3].

En la zona de Pontevedra, el granito se encuentra en afloramientos que forman una serie de cuerpos alargados, conocidos como plutones, que se extienden en dirección noroeste-sureste. Estos plutones tienen una forma alargada y están separados por zonas de roca metamórfica [3].

Para entender los tipos de suelo que tenemos en la ENM debemos acudir a datos del Instituto Geológico y Minero de España, donde acudiendo a la hoja 185 tendremos los distintos suelos de la ENM (véase Figura 1-1), divididos por una falla. La primera, catalogada con el número 18, se trata de depósitos aluvio-coluviales. En segundo lugar, tenemos la número 8, compuesta de granito de feldespato alcalino.



Figura 1-1 Composición suelo ENM- IGME

En la Figura 1-2 se puede observar de manera aproximada la falla que separa dos tipos de roca granítica, uno de nuestros objetos de estudio es determinar qué factores diferencian ambos tipos de roca y relacionarlos con la emanación de gas radón



Figura 1-2 Imagen aérea de la disposición aproximada de la falla en la ENM

Por lo tanto, se justifica la necesidad de analizar al menos los dos tipos de rocas presentes en la ENM. A lo largo de este estudio se va a proceder a obtener algunas propiedades físicas, mecánicas y mineralógicas de las dos rocas que se han extraído de dos tipos de suelo distintos de la ENM. Las propiedades que se consideran más relevantes para entender las diferentes exhalaciones de radón y que se evaluarán en este TFG son:

- Difracción de Rayos X
- Análisis petrográfico
- Análisis de porosidad accesible al agua
- Análisis porosidad accesible al mercurio
- Resistencia al impacto
- Resistencia a compresión
- Fluorescencia de Rayos X
- Microscopía electrónica de barrido
- Dureza
- Determinación de radionucleidos por espectrometría gamma

Posteriormente, una vez hayamos podido determinar las propiedades de la roca, someteremos a los dos ejemplos de estudio a un ensayo de degradación para ver las concentraciones de radón que emite cada roca y una vez obtenidos los datos, poder relacionarlas.

1.4 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es tratar de relacionar las propiedades de cada granito con la emisión del gas radón.

Este objetivo principal se puede subdividir en objetivos secundarios:

- Determinación de las principales propiedades composicionales de cada granito en términos de minerales que puedan emitir radionucleidos
- Determinar las propiedades físico-mecánicas, especialmente las relativas con la estructura porosa ya que influirá en el transporte del gas.
- Determinar la capacidad de exhalación de gas Radón mediante ensayos acelerados de hidrólisis.

Estos análisis se aplicarán a los dos tipos de granito identificados en la ENM, con el fin de poder explicar las diferentes tasas de exhalación encontradas en la planta baja del edificio del CUD.

Con estos dos resultados se tratará de relacionar cómo afecta a la concentración de radón las propiedades físicas de la roca granítica.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es sacar conclusiones acerca de la correlación entre las propiedades físicas y mecánicas de las rocas con la emanación de gas radón tras someterlas a un ensayo controlado de degradación de la roca.

Basándonos en estudios de investigación previos, podemos evaluar diferentes propiedades de las rocas y la emanación de este gas a través de unos análisis según los resultados obtenidos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El Radón

2.1.1 Características y aplicaciones

El radón es un elemento químico que se encuentra en el grupo de los gases nobles de la tabla periódica (véase Figura 2-1). Con el símbolo Rn y el número atómico 86, es un gas incoloro, inodoro e insípido en condiciones normales. Su masa media es de 222, lo que significa que tiene un promedio de 136 neutrones. En estado neutro, tiene el mismo número de electrones y protones, es decir, 86. Es un elemento radiactivo y gaseoso, y es un producto de la descomposición del radio y el actinio. El radón también tiene 22 isótopos artificiales que son producidos por reacciones nucleares en ciclotrones y aceleradores lineales. El isótopo más estable y común es el ^{222}Rn , con una vida media de 3,8 días y se convierte en ^{218}Po al emitir partículas alfa [4].

El radón tiene múltiples aplicaciones en nuestro día a día entre las cuales cabe destacar [5]:

- Medicina Nuclear: El radón se utiliza en medicina nuclear para tratar ciertas enfermedades, como el cáncer de próstata. Se utiliza como fuente de radiación para tratar el cáncer mediante la administración de radón en forma de gas o líquido.
- Detección de grietas: El radón se utiliza en la industria para detectar grietas en el acero y otros materiales. Se inyecta gas radón en una pieza de metal y se usan detectores para medir la cantidad de gas que escapa a través de las grietas.
- Investigación científica: El radón se utiliza en investigaciones científicas para estudiar la estructura y comportamiento de los materiales. También se utiliza para estudiar la atmósfera y el clima.
- Generación de energía: El radón es utilizado para generar energía eléctrica en algunos países, aunque esta tecnología no está ampliamente disponible.
- Detección de fugas: El radón se utiliza para detectar fugas de gas en tuberías y otros equipos. Es un gas pesado y se utiliza para detectar fugas debido a que se mueve hacia arriba y se concentra en las áreas de alta presión.

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

www.edufichas.com

----- Número atómico
----- Símbolo químico
----- Nombre
----- Masa atómica

Figura 2-1 Tabla periódica de elementos químicos [6].

2.1.2 Radioactividad

El radón es un elemento radioactivo con características tóxicas debido a su naturaleza radioactiva. La desintegración o radioactividad es un proceso aleatorio en el cual un átomo inestable emite radiación hasta convertirse en uno estable. Además de la radiación producida por humanos, existe también radiación procedente de la naturaleza. Ambos tipos de radiación interactúan con el cuerpo humano de la misma manera, pero la gran diferencia es que todos los seres humanos están expuestos a radiación natural, de la cual el 34% proviene del radón [1].

Existen tres tipos de isótopos de radón, el 222, 220 y 219, conocidos como radón, torón y actinon, respectivamente. Estos son productos de la desintegración del radio, específicamente del Radio-226, 224 y 223, que provienen de tres series de desintegración radioactiva natural [7].

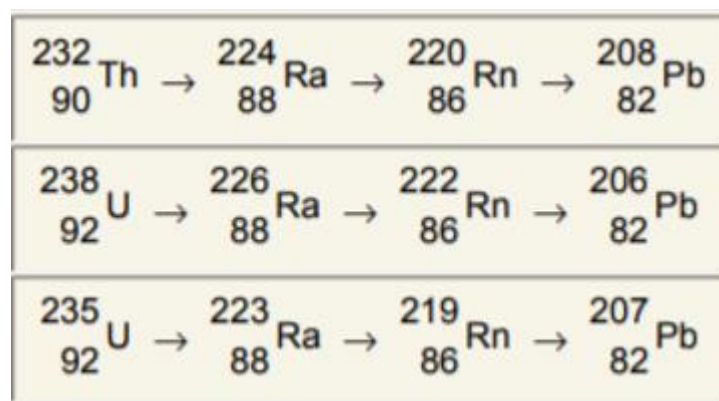


Figura 2-2 Cadena desintegración Radón 226, 224, 223 [8]

La radiación ionizante emitida en el proceso de desintegración tiene suficiente energía para arrancar electrones de los átomos, causando alteraciones en los tejidos orgánicos. Existen tres tipos de radiación ionizante: partículas alfa, partículas beta y radiación gamma.

- **Partículas Alfa:** Las partículas alfa están compuestas de dos neutrones y dos protones. Son las más ionizantes pero las menos penetrantes, pudiendo ser detenidas por una hoja de papel.
- **Partículas Beta:** Las partículas beta tienen una carga similar a los electrones. Aunque son menos ionizantes, son más penetrantes y pueden ser detenidas por una hoja de metal delgado.

- **Partículas Gamma:** La radiación gamma es una onda electromagnética que no tiene masa ni carga eléctrica. Tiene un gran poder de penetración en la materia y se detiene al atravesar una pared de plomo o hormigón.

2.1.3 Efectos asociados

El radón es un gas tóxico que se encuentra naturalmente en el suelo y puede filtrarse en las casas y edificios, donde tiende a acumularse. Se ha comprobado que es una de las principales causas de cáncer de pulmón, con estimaciones que varían entre un 3% y un 14% según la concentración media de radón en el país y la prevalencia del tabaquismo. El riesgo aumenta en un 16% con cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón y es mayor en fumadores, con un riesgo 25 veces superior al de no fumadores. No se ha demostrado que cause otros tipos de cáncer o efectos para la salud [1].

El radón se descompone rápidamente y emite pequeñas partículas radiactivas. Al ser inhaladas, estas partículas radiactivas pueden dañar las células que recubren los pulmones (véase Figura 2-3). La exposición a largo plazo al radón puede resultar en cáncer de pulmón, el único tipo de cáncer que se ha comprobado está asociado con la inhalación de radón. Se ha sugerido que hay un riesgo mayor de leucemia asociada con la exposición al radón en adultos y niños; sin embargo, las pruebas no son conclusivas.



Figura 2-3 Gráfico de inhalación del Radón [9].

2.1.4 Origen del radón y presencia en diferentes tipos de rocas

El origen de este gas radiactivo procede de la desintegración del ^{226}Ra y este forma parte de la cadena desintegración del ^{238}U (véase Figura 2-4). Podemos decir que el ^{222}Rn es el hijo del ^{226}Ra y el ^{238}U es el predecesor de esta cadena.

Todos los elementos de la cadena de radiación del uranio 238 son sólidos y no nos perjudican, sin embargo, cuando se trata del Rn_{222} , se trata de un gas, el cual entra en nuestro cuerpo a través de la respiración. Esa es la razón por la que es nocivo para nosotros, pues lo introducimos en nuestro cuerpo debido a su inhalación.

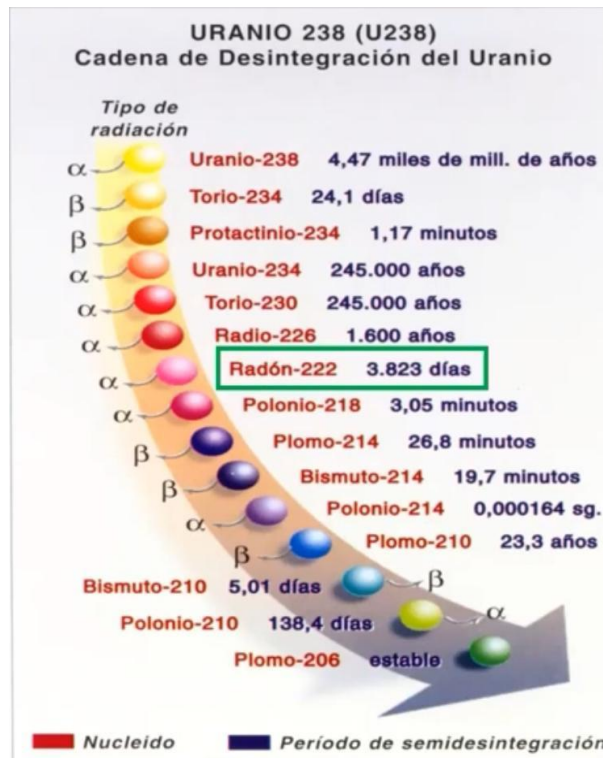


Figura 2-4 Cadena desintegración del Uranio 238 [5]

Atendiendo al origen de las rocas, las rocas presentes en la corteza terrestre pueden clasificarse en tres tipos, rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Siendo estas primeras las rocas ígneas las que concentran más cantidad de sílice, y por ello más cantidad de componentes radioactivos

La presencia de sílice puede afectar la concentración de uranio en las rocas debido a su capacidad para formar minerales de silicato que pueden adsorber o capturar iones de uranio. Los minerales de silicato, como la biotita y el feldespato, pueden actuar como anfitriones para el uranio, lo que resulta en concentraciones más altas de uranio en la roca [10].

Las rocas se pueden clasificar según su contenido de sílice (véase Figura 2-5) en:

- Rocas félsicas o ácidas: Son rocas ígneas ricas en sílice, con más del 65% de su composición formada por minerales silicatados. Estas rocas suelen tener una textura gruesa o granular, y suelen ser de color claro. Ejemplos de rocas félsicas incluyen el granito, la riolita y la dacita.
- Rocas intermedias: Son rocas ígneas con un contenido de sílice entre el 52% y el 65%, y su composición está formada por minerales tanto claros como oscuros. Estas rocas suelen tener una textura intermedia entre las rocas félsicas y máficas, y su color es variable. Ejemplos de rocas intermedias incluyen la diorita y la andesita
- Rocas máficas o básicas: Son rocas ígneas con un contenido de sílice menor al 52%, y su composición está formada principalmente por minerales oscuros, como el olivino y la piroxena. Estas rocas suelen tener una textura fina y su color es oscuro. Ejemplos de rocas máficas incluyen el basalto y la gabro.
- Rocas ígneas ultra básicas: Se trata de rocas ígneas con un contenido de sílice menor al 45% de sílice. Un ejemplo de ello son los basaltos.

ígneas ácidas:	>65% de SiO ₂
ígneas intermedias:	65 - 52% de SiO ₂
ígneas básicas:	52 - 45% de SiO ₂
ígneas ultrabásicas:	<45% de SiO ₂

Figura 2-5 Clasificación de las rocas según porcentaje de silicato [5]

En relación a la clasificación mineralógica, se pueden clasificar los minerales en dos tipos. Minerales félsicos, con más cantidad de sílice y por ello, más cantidad de uranio. El segundo tipo serían los minerales máficos, con menos cantidad de uranio, pero no nulo.

La Figura 2-6 presenta los principales minerales que componen las rocas ígneas y su composición mineralógica en orden descendente y su composición de Uranio 238.

Mineral	ppm
Cuarzo	1,7
Feldespatos y plagioclasas	2,7
Biotita	8,1
Moscovita	11,8
Piroxenos	7,9
Hornblenda	3,6
Olivino	0,005
Alanita	200
Apatito	65
Epidota	43
Monacita	3000
Esfena	280
Zircón	1330

Figura 2-6 Composición mineralógica granito en orden descendente y composición de Uranio en ppm [5]

El granito es una roca ígnea plutónica, que representa casi el 90% del volumen de la corteza terrestre. Compuesta principalmente de minerales félsicos (ricos en Si, Al, Ca, Na y K) y minerales máficos (ricos en Fe y Mg). El granito se forma cuando el magma se enfría lentamente en profundidad y cristaliza. Debido a su composición, el granito puede contener niveles relativamente altos de uranio, radio y otros elementos radiactivos. Estos elementos se descomponen y emiten partículas alfa, que pueden causar la formación de radón. En cuanto al contenido de uranio, es más significativo clasificar las rocas en función de la abundancia de óxido de sílice (SiO₂). Esta clasificación distingue entre rocas ácidas (>65% de SiO₂), rocas intermedias (65-52%), rocas básicas (52-45%) y rocas ultrabásicas (<45%).

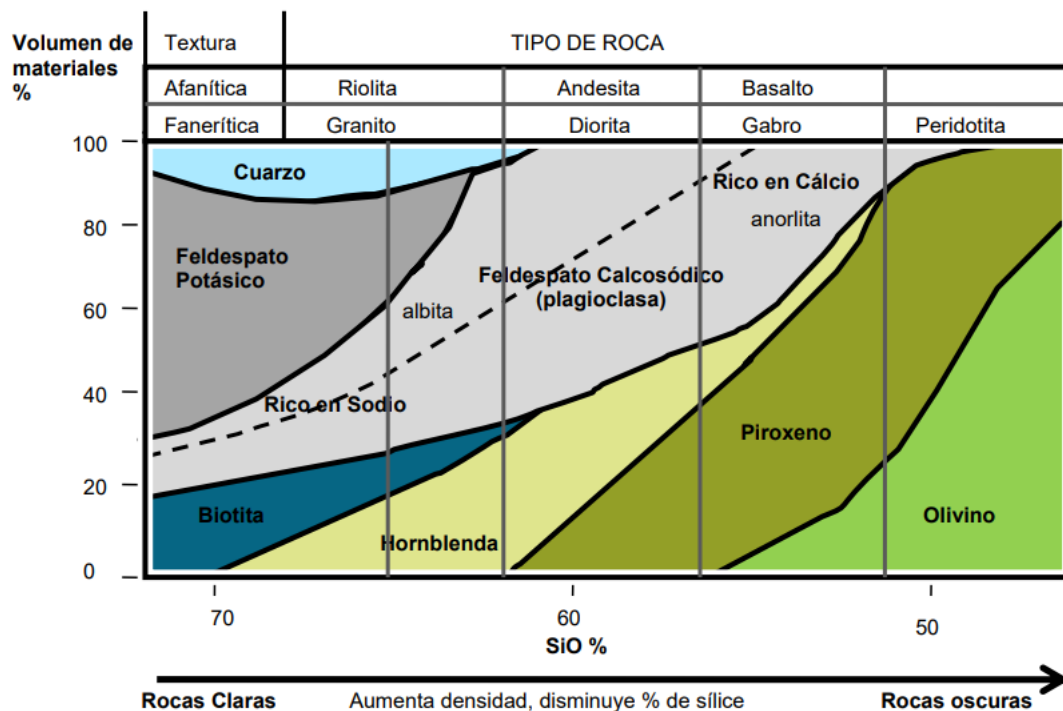


Figura 2-7 Clasificación de las rocas ígneas [4]

La emisión de radón en el granito depende de varios factores geológicos, como la concentración de uranio y radio, la permeabilidad de la roca y la estructura de las grietas y las fallas en la roca. En general, los granitos que contienen mayores concentraciones de uranio y radio son más propensos a emitir radón.

Además, la permeabilidad de la roca puede influir en la concentración de radón. El granito con una estructura de porosidad más fina y cerrada, más hermética puede retener el radón en mayor medida que el granito con una estructura de porosidad más abierta.

Las diferentes estructuras de las grietas y las fallas en el granito pueden proporcionar un camino para que el radón escape de la roca y entre en el suelo y el aire circundantes. La actividad sísmica o la actividad humana, como la excavación de canteras o la construcción de carreteras, pueden aumentar la permeabilidad de la roca y aumentar la liberación de radón.

En resumen, el granito puede contener niveles significativos de uranio y radio, lo que puede resultar en la emisión de radón. La emisión de radón puede depender de la concentración de uranio y radio, la permeabilidad de la roca y la estructura de las grietas y fallas en la roca. Es importante tener en cuenta la presencia de granito en la construcción de edificios y en la realización de pruebas de radón en interiores [2].

2.1.1 Propiedades mineralógicas del granito

Los minerales que conforman las rocas experimentan un ciclo constante de transformación y reciclaje a través de procesos magmáticos, sedimentarios y metamórficos. En función de su origen, las rocas se clasifican en tres grupos principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las Rocas Plutónicas (intrusivas) se forman a partir del enfriamiento lento y en profundidad del magma, lo que resulta en rocas poco porosas con textura granulada y grandes cristales (textura fanerítica). Estas rocas se pueden clasificar en función de su contenido en sílice en cuatro tipos: Dunitas

(rocas ultrabásicas), Gabros (rocas básicas), Dioritas (rocas intermedias), granodioritas y sienitas (50-60% de sílice), y Granitos (rocas ácidas, 65-75% de sílice). El contenido de uranio varía entre 0.001-1 ppm para las Dunitas, 1 ppm para los Gabros, 1.5-2 ppm para las Dioritas, granodioritas y sienitas, y 3 a 4 ppm para los Granitos.

Como puede observarse, el contenido de uranio es notablemente superior para el caso del granito, que será la piedra angular de nuestro estudio en este proyecto.

2.1.2 Regiones geológicas de España y su relación con el ^{222}Rn

La distribución geológica de España es muy variada, con presencia de rocas y minerales de distintas edades y características. Esto tiene una relación directa con la concentración de gas radón, ya que este gas se origina en la desintegración del uranio presente en algunas rocas y suelos.

En general, las zonas con mayor concentración de gas radón en España son aquellas en las que predominan las rocas graníticas y volcánicas, como en Galicia, Castilla y León, y zonas de la Sierra de Guadarrama en Madrid. Estas zonas presentan mayor riesgo de exposición al gas radón en interiores, especialmente en viviendas construidas sobre suelos con altas concentraciones de uranio.

Por otro lado, en zonas donde predominan las rocas sedimentarias, como en la costa mediterránea, la presencia de gas radón es menor, aunque pueden existir zonas puntuales con concentraciones más elevadas debido a la presencia de fallas o fisuras que permiten la acumulación del gas.

A continuación, se presenta un mapa geológico nacional de España a escala 1:2.000.000 en el cual se presenta la distribución geológica de los diferentes tipos de roca en la península (véase Figura 2-8).

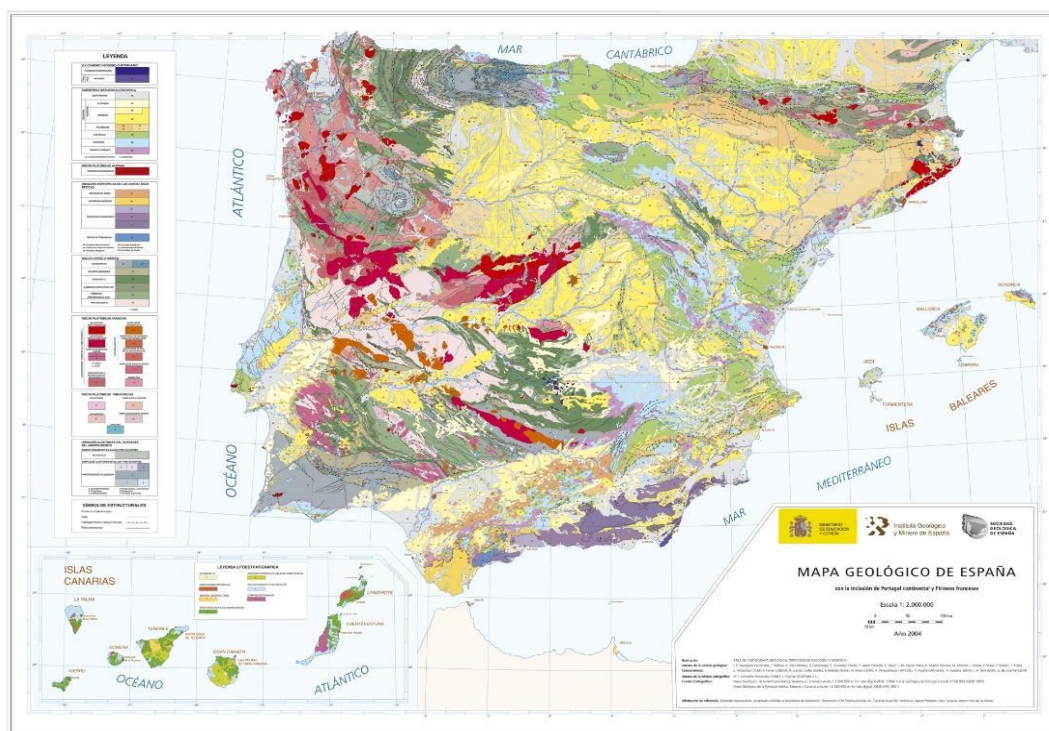


Figura 2-8 Distribución geológica en España [10]

Como se puede observar en la ilustración, hay una gran predominancia de rocas ígneas plutónicas (color rosado/rojizo) con gran contenido en Uranio en la zona noroeste peninsular.

Si comparamos el presente mapa con el mapa elaborado por el CSN (Figura 2-9 Concentración de radón en interiores de edificios en España.) que representa la concentración estimada de radón en el interior de las viviendas. Podemos observar que hay una mayor concentración de radón en aquellos lugares donde hay una mayor predominancia de rocas ígneas plutónicas.

Si comparamos el presente mapa con el mapa elaborado por el CSN que representa la concentración estimada de radón en el interior de las viviendas. Podemos observar que hay una mayor concentración de radón en aquellos lugares donde hay una mayor predominancia de rocas ígneas plutónicas.

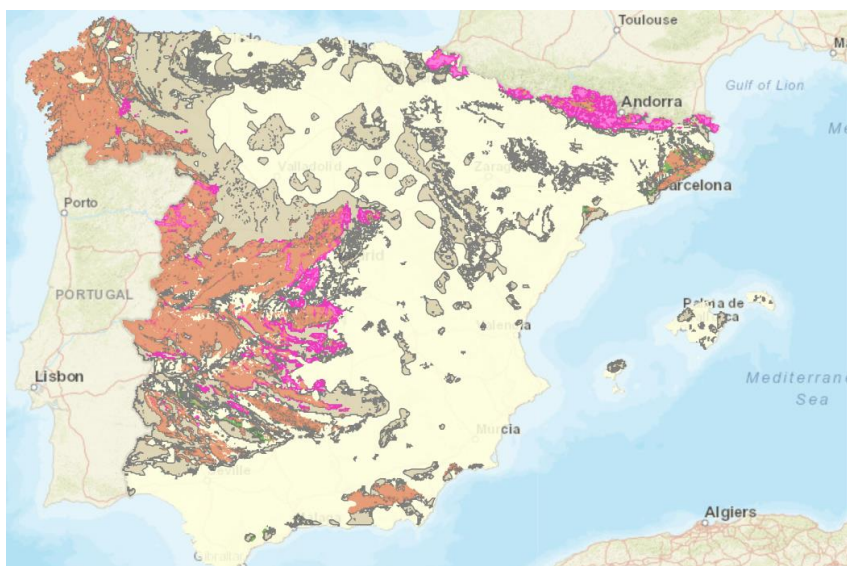


Figura 2-9 Concentración de radón en interiores de edificios en España [3].

Como se puede observar en la imagen, existe una alta correlación entre la emisión de gas radón en el interior de viviendas y la composición de las rocas sobre las que se sustentan. En la zona geográfica que nos concierne, estaríamos hablando de una concentración de 400 Bq/m³.

A mayores, en el proyecto MARNA (Mapa de Radiación gamma natural en España) realizado por el CSN y el ENUSA que evalúa los niveles de radiación gamma naturales en España. Este proyecto se hizo a través de un mapeo a partir de medidas in situ en superficie de radiaciones gamma. Vemos que vuelven a aflorar ese tipo de zonas. Verificando la relación entre la geología y la emisión de radón es inequívoca.

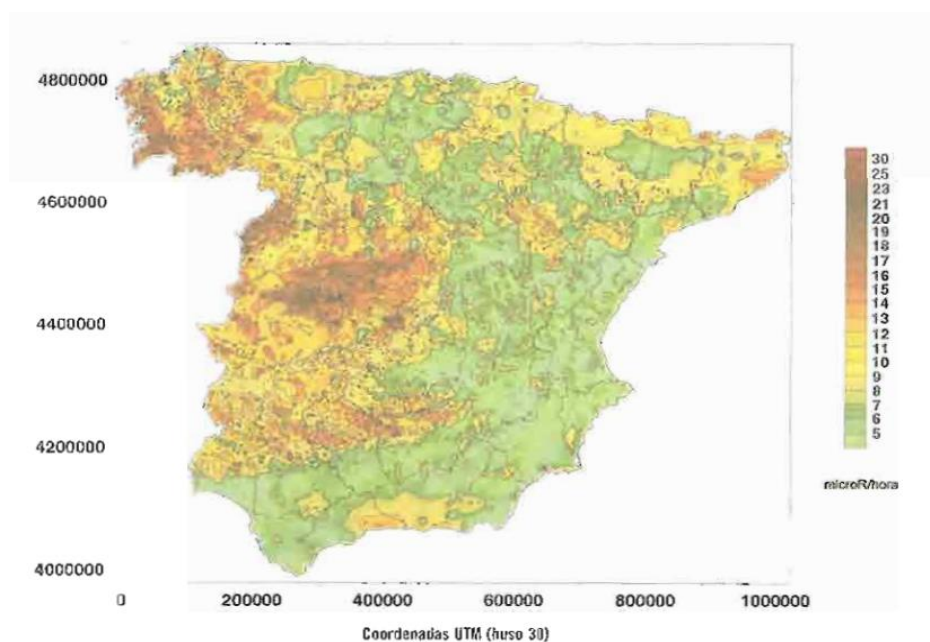


Figura 2-10 Niveles de radiación natural de España

Como se puede observar en la Figura 2-10 Entrada radón a Edificios, la ENM está situada en una de las zonas con más influencia radiactiva de España, con tasas de radiación de 30 $\mu\text{R/s}$. Estas tasas tan elevadas pueden comprometer la salud de las personas en el largo plazo si no se toman las precauciones y medidas de mitigación adecuadas para reducir su efecto a la exposición de radiación ionizante.

Según el mapa de radiación natural del CSN Figura 2-9 Concentración de radón en interiores de edificios en España., los niveles de radiación gamma natural en Pontevedra oscilan entre 11 y 95 nSv/h, con una media de 45 nSv/h. Estos valores están dentro del rango normal para la radiación gamma natural en España, aunque ligeramente por encima de la media. Destacar que los límites de concentración de radón en el interior de los edificios es 300Bq/m^3

2.2 Legislación frente al radón

La regulación de la exposición al radón varía dependiendo del país o región, pero en general, se establecen límites para la concentración de radón en el aire interior de edificios, tanto en el hogar como en el lugar de trabajo. Estas regulaciones pueden ser actualizadas regularmente para reflejar los últimos avances en la investigación sobre los riesgos del radón.

Debido a que los riesgos asociados a la exposición a niveles elevados de radón han sido reconocidos y estudiados por los científicos y reguladores en diferentes partes del mundo y en momentos diferentes, la primera legislación sobre el radón no está determinada. Sin embargo, se estima que la primera legislación la publicó EEUU en 1986, donde emitió una guía acerca de la regulación de radón en interiores.

Sin embargo, uno de los primeros países en establecer límites para la exposición al radón en el aire interior de edificios fue Suecia, en los años 80. Desde entonces, muchos otros países, incluyendo los Estados Unidos y el Reino Unido, han establecido normativas y programas para regular la exposición al radón y garantizar la seguridad de la población [1].

2.2.1 Normativa en España

España comenzó a prestar atención al gas radón a partir de la década de 1980, cuando se comenzaron a realizar estudios sobre la presencia de este gas en edificios y su impacto en la salud de la población.

A partir de entonces, se han realizado diversas iniciativas para sensibilizar sobre el tema y fomentar la realización de mediciones y la adopción de medidas para prevenir y controlar la entrada de gas radón en los edificios. En 2002, se aprobó la Ley 41/2002, de 14 de noviembre, Normativa Básica reguladora de la protección de la salud pública, que establece los límites máximos admisibles de radón en interiores de edificios.

El Real Decreto 9/2011, de 10 de marzo, complementa esta normativa y establece las obligaciones de los responsables de los edificios en materia de protección y seguridad contra la exposición al radón. Desde entonces, la atención al gas radón ha sido una prioridad para las autoridades sanitarias y se han implementado diversas medidas para garantizar la protección de la salud de la población frente a sus efectos.

En 2013, la Unión Europea publicó la Directiva 2013/59/Euratom para establecer normas de seguridad para proteger contra los peligros de la exposición a radiación ionizante [11].

En la directiva 2013/59/Euratom los Estados miembros deben tomar medidas para proteger la salud de los trabajadores en lugares de trabajo con una exposición a radiación superior a 1 mSv por año o 15 mSv para el cristalino o 50 mSv para la piel y extremidades. Estos requisitos son específicos para diferentes niveles de exposición y lugares de trabajo. En lugares con una exposición superior a 6 mSv, deben ser gestionados como una situación de exposición planificada, y la autoridad competente debe

revisar las exposiciones en lugares con una exposición inferior a 6 mSv. Para empresas que explotan aeronaves con una dosis efectiva superior a 6 mSv para la tripulación, los Estados miembros deben aplicar los requisitos adecuados y exigir que la empresa evalúe la exposición, tome medidas para reducirla y informe a la tripulación sobre los riesgos. La empresa es responsable de cumplir estas obligaciones bajo el asesoramiento de un experto en protección radiológica.

En 2005, nació el Proyecto Internacional del Radón, en el que más de 30 países participaron con el objetivo de identificar estrategias para reducir la exposición al radón y concienciar al público sobre este desconocido peligro para la salud. Como resultado, en 2009 se publicó el Manual sobre el radón en Interiores, que enfatiza la importancia de los efectos del radón en la salud y propone que los países tomen como referencia un nivel máximo de concentración de 300 Bq/m³.

Además, el artículo 103 de la mencionada directiva insta a los Estados miembros de la UE a crear un plan de acción nacional para lidiar con el radón, entre los cuales se incluye a España. En 2019, España cumplió con lo establecido en la Directiva al aprobar la modificación del Código Técnico de la Edificación, que incluyó la sección HS6 "Protección contra la exposición al radón" en el *documento básico de salubridad* [7].

La concentración de gas radón en una vivienda puede estar influenciada por varios factores meteorológicos. La presión atmosférica, la temperatura, la humedad y los vientos pueden afectar la entrada y dispersión del gas radón dentro de una vivienda. Por ejemplo, los cambios en la presión atmosférica pueden provocar una mayor entrada de radón en la vivienda, mientras que la ventilación adecuada puede ayudar a reducir la concentración de radón. Sin embargo, estos factores no son los únicos determinantes de la concentración de radón en una vivienda, y otros factores como la geología local (nuestro caso) y la construcción de la vivienda también pueden tener un impacto significativo [4].

2.2.2 Prevención frente a riesgos laborales

La mejora de las condiciones trabajo, de la salud y de la seguridad en el trabajo es uno de los objetivos permanentes de la Ley de Prevención de riesgos laborales.

En 2006, el radón fue reconocido como un agente causante de enfermedades profesionales, incluyendo el cáncer de pulmón, en el cuadro de enfermedades profesionales. El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo ha publicado diferentes Notas Técnicas de Prevención (NTP) en relación al radón, que proporcionan buenas prácticas y concienciar a la población acerca de sus riesgos. Estas incluyen la NTP 440, que describe las propiedades del radón y las medidas para reducir su nivel en interiores, la NTP 533, que explica los efectos del radón en la salud, y la NTP 728, que introduce las fuentes naturales de radiación y las medidas de prevención fundamentales para la exposición laboral a la radiación natural. Es importante tener en cuenta que las indicaciones de las NTP no son obligatorias.

2.3 Vías de entradas del radón en edificios

El radón es un gas radioactivo que se produce de forma natural a partir del decaimiento del uranio presente en la corteza terrestre. Este gas puede filtrarse a través del suelo y penetrar en edificios y viviendas, donde puede acumularse y representar un riesgo para la salud de las personas.

En ocasiones, la tipología de la construcción, la antigüedad y los materiales utilizados en la vivienda son los factores que determinan la concentración de radón en su interior. Estas características de la construcción también influyen en las vías de entrada que el radón utiliza para penetrar en la edificación, como las grietas, sumideros o desagües.

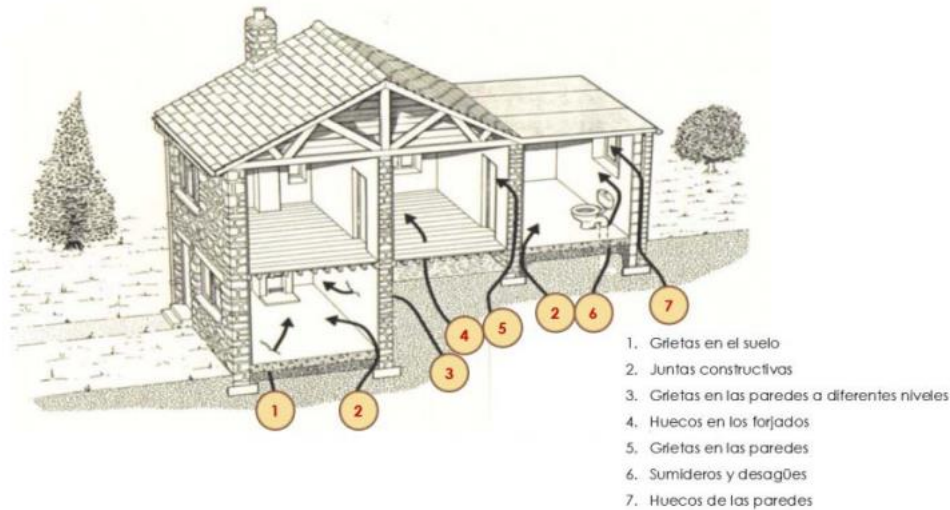


Figura 2-10 Entrada radón a Edificios [9]

La ecuación que determina la concentración de radón en una habitación se conoce como la ecuación de balance de masa del radón en el aire interior y se puede expresar de la siguiente manera [12]

$$C = \frac{\theta \times R + R \times D}{Q + \frac{V}{\tau}} - \Phi D$$

Ecuación 2-1: Concentración de radón

En donde

C es la concentración de radón en la habitación (Bq/m³).

ΦR es la tasa de producción de radón en el suelo debajo de la habitación (Bq/m²s).

ΦD es la tasa de eliminación de radón en la habitación debido a la desintegración (Bq/m³s).

Q es la tasa de ventilación de aire fresco en la habitación (m³/s).

V es el volumen de la habitación (m³).

τ es el tiempo de residencia del aire en la habitación (s).

2.3.1 Entrada a través de grietas

El radón puede penetrar en los edificios a través de grietas y fisuras en el suelo y las paredes. La presión negativa dentro de los edificios en relación con el suelo circundante puede succionar el gas radón del suelo hacia el interior a través de las grietas. Las grietas y fisuras también pueden proporcionar un medio para la difusión del radón del suelo al aire interior del edificio.

Es importante tener en cuenta que la penetración del radón a través de las grietas puede ser influenciada por diversos factores, como la permeabilidad del suelo, la presión atmosférica y la ventilación del edificio. La concentración de radón en el interior de un edificio también puede variar dependiendo de la ubicación de las grietas y fisuras en relación con las fuentes de radón en el suelo. Por lo tanto, la evaluación de la concentración de radón en el interior de un edificio debe realizarse de manera exhaustiva y considerando diversos factores [9].

2.3.2 Entrada a través de muros y paredes

Las características de los materiales de construcción y la edad del edificio pueden afectar la entrada de radón a través de tabiques y muros. Por ejemplo, las construcciones más antiguas pueden tener materiales de construcción más porosos y menos sellados, lo que puede permitir una mayor entrada de radón. Además, los edificios más modernos suelen ser más herméticos, lo que puede aumentar también la concentración de radón en el interior [2].

Para reducir la entrada de radón a través de edificios y muros, se pueden tomar medidas como sellar las grietas y fisuras en las paredes y pisos, mejorar la ventilación en el edificio, y utilizar materiales de construcción resistentes al radón. También es importante realizar pruebas de detección de radón en el interior del edificio para determinar si se necesita una acción adicional para reducir la concentración de radón [2].

En este aspecto es muy importante destacar que la forma en la que se ha construido el edificio es un factor determinante para la entrada de gas radón. En los edificios donde se haya construido en pendiente, una pared va a quedar en contacto con la pendiente, por lo que la concentración de radón en ese lugar cerrado será mucho mayor (véase Figura 2-11).



Figura 2-11 Influencia de la construcción en pendiente con la penetración de radón en el interior de viviendas [8]

2.3.3 Entrada a través de agua subterránea

El agua subterránea es otra fuente potencial de radón en edificios. Cuando el agua subterránea se filtra a través de las rocas y el suelo, puede disolver y transportar el radón presente en estos materiales. Si el agua subterránea se utiliza como fuente de agua potable en un edificio, el radón disuelto en el agua puede ser liberado en el aire interior durante el uso del agua [13].

La concentración de radón en el agua subterránea depende de la geología y la actividad de uranio en la zona donde se encuentra el pozo de agua subterránea. La exposición al radón disuelto en el agua es particularmente importante en áreas donde el agua subterránea es una fuente principal de agua potable, como en zonas rurales.

La entrada de radón disuelto en el agua en el aire interior de un edificio puede ocurrir a través de actividades como ducharse, cocinar y lavar platos y ropa. Cuando el agua con radón disuelto se agita o se utiliza en estas actividades, el radón se libera del agua y se mezcla con el aire interior del edificio. Esto puede aumentar la concentración de radón en el aire interior del edificio y aumentar la exposición a este gas radiactivo.

Para reducir la exposición al radón disuelto en el agua potable, se pueden tomar medidas como la instalación de sistemas de tratamiento de agua que reduzcan la concentración de radón en el agua

potable. También es importante asegurarse de que los pozos de agua subterránea se prueben regularmente para detectar la presencia de radón disuelto y otras sustancias peligrosas en el agua [13].

2.3.4 Entrada a través de materiales de construcción

En la naturaleza existen dos tipos de fuentes de radiactividad: los materiales radiactivos naturalmente presentes (NORM) y los materiales radiactivos naturalmente presentes mejorados tecnológicamente (TENORM), los cuales consisten en materiales generalmente residuos industriales o subproductos enriquecidos con elementos radiactivos como U, Th, K y sus productos de decaimiento Ra y Rn. Todos los productos naturales de origen terrestre, como las piedras de granito, la arena y los minerales, incluyen pequeñas cantidades de algunos elementos radiactivos NORM que pueden producir cantidades medibles de radiación y, a veces, de Rn-222. Esto incluye productos de hormigón, ladrillos de arcilla, la mayoría de los platos y tazas no plásticos, el carbón y la ceniza volante producida en centrales eléctricas de carbón, el gas natural (contiene Rn), los fertilizantes fosfatados utilizados en terrenos de cultivo (todos contienen K y pequeñas cantidades de U y Th) y las verduras cultivadas con esos fertilizantes. Todos los vidrios hechos con sílice (incluso copas de vino, gafas, ventanas, espejos, etc.) y las piedras de granito también. La figura 2 muestra el porcentaje de fuente de radón en lugares residenciales. Como se puede ver en la figura, solo el 2,5% del gas radón se libera de los materiales de construcción, mientras que el material de construcción de granito tiene la mayor contribución a la tasa de exhalación de radón entre otros materiales [12].

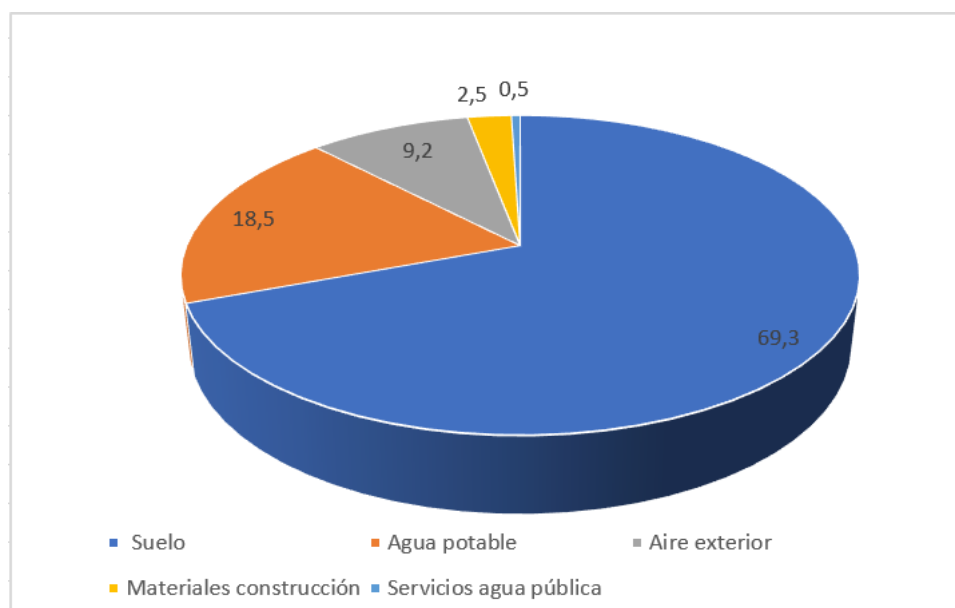


Figura 2-12 Contribución fuentes de emisión ionizante en el interior de un edificio (elaboración propia).

Como se puede apreciar en la Figura 2-12, tan solo el 2,5% de la contribución a la emisión de radiación corresponde a los materiales de la construcción, mientras que el 69,3% de la radiación registrada dentro de un edificio corresponde a la emitida por el suelo.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Muestras de rocas

En este estudio se analizarán dos tipos de rocas extraídas durante las obras del patio de aulas (2020) de la Escuela Naval Militar. Aunque fueron extraídas en la misma obra, cabe decir que su procedencia no es la misma.

En el caso de las rocas GS, esta se extrajo de la zona más próxima al Túnel del Viento, mientras que la roca GM se extrajo de la parte más central de la explanada. En ambos casos a una distancia aproximada de 1-2 m del edificio de CUD.

Las rocas graníticas sometidas a análisis tienen una estructura cúbica de 3,8 cm de lado en cada una. Están divididas en dos categorías, roca GM y rocas GS. Las rocas GS son las que a primera vista más componente de moscovita tienen por su apariencia más oscura. Hay un total de nueve ejemplares, siendo la roca GS1 la escogida para el análisis principal. Por otra parte, tenemos las rocas GM, con un total de cuatro ejemplares.

Como se dijo anteriormente, la zona del túnel del viento tiene especial particularidad porque en esta zona es donde confluye una falla que separa dos tipos de roca granítica. La razón por la que se extrajeron dos muestras diferentes de roca granítica fue porque los operarios de la obra comentaron al personal docente de la ENM la gran diferencia a primera vista del aspecto de los dos tipos de roca y la diferencia en la dureza a la hora de picar en el suelo. Además, en base a estudios previos, se sabía que en ambas zonas las concentraciones de radón en el edificio del CUD eran significativamente diferentes. Es por ello que se extrajeron dos muestras de estas dos partes del suelo y son el objeto de análisis del presente TFG.

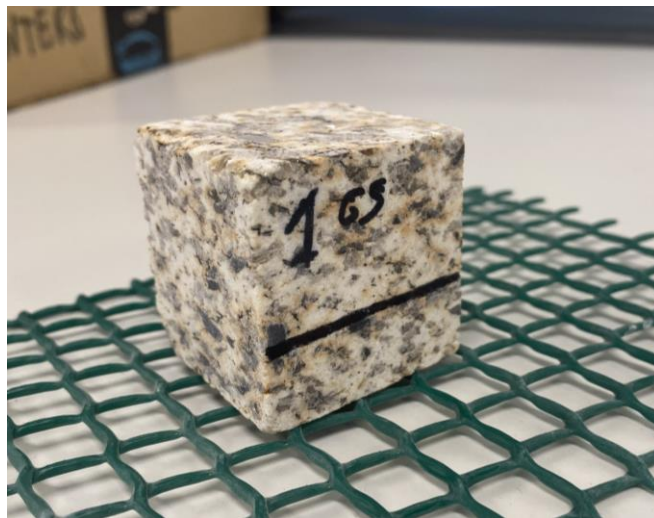


Figura 3-1. Modelo de roca granítica empleado para estudio

3.2 Análisis composicional, mineralógico, elemental y radioactividad

3.2.1 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DR-X) permite identificar las fases cristalinas de la muestra de roca tras incidir un haz de Rayos-X sobre un sólido. Los rayos difundidos dan lugar a fenómenos de interferencia de ondas de rayos X, las cuales pueden ser destructivas donde los fotones son dispersados en todas direcciones y se anulan entre sí (campo del haz difractado de muy baja intensidad), o interferencias constructivas en determinadas direcciones del espacio cuando los fotones se encuentran en fase, es decir, cuando existe una disposición ordenada de átomos y se cumplen las condiciones que vienen regidas por la Ley de Bragg, la cual relaciona la longitud de onda de los rayos-X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado [14].

Cada especie cristalina presenta un conjunto de planos reticulares característicos, que permite su identificación de las estructuras cristalográficas presentes y su composición química. Pudiéndose obtener información acerca de:

- Resolución de estructuras cristalinas
- Análisis de polimorfismo
- Determinaciones estructurales
- Caracterización de capas epitaxiales
- Análisis de textura
- Dimensionamiento de partículas y de microdeformaciones
- Análisis de fases cristalinas tanto cualitativamente como cuantitativamente

En nuestro caso, para la difracción de rayos X el equipo utilizado para la identificación de fases minerales mediante difracción de rayos X es el modelo X Philips XPERT-PRO, XCelerator con detector RTMS, operando en modo continuo, en un rango de 2θ de 4° a 80° . Con un tamaño de paso de $0,0334^\circ$ y un tiempo de recuento de 50,165 s por paso, y radiación alfa Cu-K

3.2.2 Petrografía

La petrografía es una herramienta importante para el análisis de rocas graníticas. El granito es una roca ígnea plutónica compuesta principalmente de cuarzo, feldespato y mica, y su composición mineralógica puede variar ampliamente. La petrografía se utiliza para identificar y caracterizar los minerales presentes en una muestra de granito, así como para determinar su textura y estructura.

La petrografía de una muestra de granito comienza con la observación macroscópica de la roca, incluyendo su color, textura y estructura. Luego, se realizan cortes delgados de la muestra, que se observan bajo un microscopio polarizado para identificar los minerales presentes y su distribución en la roca.

Los principales minerales presentes en el granito son el cuarzo, el feldespato y la mica. La proporción de estos minerales varía ampliamente en diferentes tipos de granito, lo que da lugar a diferentes texturas y colores. Por ejemplo, el granito con una alta proporción de cuarzo y feldespato se conoce como granito leucocrático, mientras que el granito con una alta proporción de mica se conoce como granito micáceo.

Además de identificar los minerales presentes, la petrografía también puede revelar la textura de la roca, que se refiere a la disposición y tamaño de los cristales en la roca. Los cristales de gran tamaño sugieren un enfriamiento lento y profundo del magma, mientras que los cristales de pequeño tamaño sugieren un enfriamiento más rápido en la superficie. [15]

3.2.3 Fluorescencia de rayos X

La técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) se basa en la emisión de fluorescencia generada por la excitación de una muestra sometida a rayos X. Esta técnica permite realizar análisis químicos elementales, cualitativos y cuantitativos, de elementos desde el fluor (F) hasta el uranio (U), tanto en muestras sólidas como líquidas [14].

La excitación de los átomos del material con un haz de rayos X de alta energía provoca la expulsión de electrones de las capas internas de los átomos, y la ocupación de los electrones de las capas externas en los espacios vacíos creados. La transición de electrones resulta en la emisión de radiación X fluorescente, que se representa por una longitud de onda característica que depende de la diferencia energética de los orbitales electrónicos [14].

La FRX es una técnica no destructiva que permite determinar la composición elemental de un material. Los fotones emitidos durante la transición electrónica pueden ser detectados y su energía medida para determinar la composición elemental del material. La intensidad de los fotones emitidos es proporcional a la concentración de cada elemento en el material.

Además de su aplicación en la determinación de la composición elemental de materiales sólidos, la FRX también ha sido utilizada para la detección de impurezas en eluidos de uranio y para la detección del uranio en soluciones de baja actividad [14].

3.2.4 Espectrometría rayos Gamma

La espectrometría de rayos gamma es una técnica utilizada para analizar la composición química y la estructura de los materiales a través de la medición de los rayos gamma emitidos por una muestra. Los rayos gamma son una forma de radiación electromagnética de alta energía que se emiten naturalmente por los núcleos atómicos y son producidos por procesos nucleares como la desintegración radiactiva [14].

La espectrometría de rayos gamma se utiliza ampliamente en la exploración geofísica para identificar y mapear depósitos minerales y petróleo. Cuando los rayos gamma interactúan con la materia, pueden perder energía y cambiar de dirección, lo que se conoce como dispersión. La cantidad y la energía de los rayos gamma dispersados dependen de la composición química de la muestra [14].

La espectrometría de rayos gamma se realiza mediante un detector de rayos gamma, que puede ser un cristal de scintilador o un detector de semiconductor. Cuando los rayos gamma entran en el detector, liberan electrones que generan una señal eléctrica que se amplifica y se registra en un espectrómetro de rayos gamma. El espectrómetro mide la energía y la cantidad de rayos gamma que se emiten por la muestra y los compara con una biblioteca de espectros de referencia para identificar los elementos presentes en la muestra [14].

3.3 Análisis de las propiedades físico-mecánicas

3.3.1 Porosidad accesible al agua

Este estudio se centró básicamente en analizar las propiedades capilares de las rocas graníticas, en nuestro caso, de las rocas que nosotros hemos designado como GM y GS.

Para estudiar la capilaridad de las rocas, se ha procedido a realizar dos ensayos. En ambos ensayos se ha medido de manera progresiva en el tiempo, la capacidad que tienen las rocas de absorber agua.

Lo primero que se hizo fue pesar las doce rocas sin humedad para luego poder comparar los resultados posteriormente.

El primer ensayo realizado consiste en sumergir las rocas (véase Figura 3-2) hasta un tercio de su altura para evaluar sus propiedades capilares. Posteriormente medir de manera progresiva en los tiempos de 2', 4', 8', 15', 30', 60', 1h, 2h, 4h, 8h, 16h, 24h, 24h, 48h esa absorción de agua a través de un peso. El objetivo de este ensayo es ser capaces de relacionar las propiedades capilares de la roca con su estructura capilar interior.

Una vez hemos obtenido todos los resultados procedentes de sumergir las rocas, graficamos los resultados para observar la pendiente que relaciona los gramos de agua que absorbe la roca con el tiempo que ha transcurrido. Los resultados que podemos interpretar de este ensayo es que cuanto más capacidad de absorción tiene la roca, más capilaridad tiene en su interior.

La capilaridad de la roca puede ser un factor determinante a la hora de considerarlo como un parámetro que puede influir en la emisión de radón.



Figura 3-2 Muestra de ensayo inmersión parcial

Para realizar este tipo de ensayos es importante reseñar que hay que eliminar el agua que se queda adherida en la capa externa de la roca. Para eliminar esta agua superficial utilizamos un paño húmedo en el cual, vamos secando las rocas. A medida que se secan las rocas, este paño va adquiriendo más humedad, por lo que al final la capacidad de absorción del paño va disminuyendo (véase Figura 3-3). Por ello establecimos un peso total del paño de 85 gramos, por lo que el paño tenía que ser escurrido para disminuir su humedad después de cada proceso de secado.



Figura 3-3 Paño húmedo y peso

3.3.2 Análisis porosidad accesible al agua

El segundo ensayo realizado consiste en sumergir las rocas en su totalidad para evaluar la cantidad de agua que son capaces de absorber y medirlas según el mismo patrón de tiempo que establecimos en el anterior ensayo (véase Figura 3-4). El objeto de este ensayo es determinar la capacidad que tienen estas rocas de absorber agua y con ello, poder relacionarlo con su porosidad y su emanación de gas radón.



Figura 3-4 Ensayo porosimetría accesible al Hg

3.3.3 Ensayo de porosidad accesible al Hg y porosimetría

Se ha procedido a aplicar un ensayo de porosidad accesible al Hg y la distribución porosimétrica. Este ensayo de la porosidad accesible al mercurio se refiere a la fracción de poros que en un material pueden ser penetrados por mercurio. Esta propiedad es medida mediante la técnica de porosimetría de mercurio, que consiste en forzar la penetración de mercurio en los poros del material y medir la cantidad de mercurio que se introduce en función de la presión aplicada.

La porosidad accesible al mercurio y la distribución del tamaño de los poros se determinaron, por duplicado, utilizando un porosímetro Micromeritics Autopore IV9500 y fragmentos de 1 cm³. Este porosímetro trabaja con dos rangos de presión de trabajo: uno de baja presión entre 14 y 200 kPa y otro de alta presión entre 0,20 y 225 MPa, permitiendo así la medición de poros con un diámetro de acceso entre 360 micras y 3,8 nm.

La distribución porosimétrica es el resultado de la medición de la porosidad accesible al mercurio en función del tamaño de los poros. En otras palabras, muestra cómo se distribuyen los poros de diferentes tamaños en el material y cuál es su volumen relativo. Esta información es importante para entender cómo un material puede interactuar con fluidos y gases, ya que la accesibilidad de los poros a estos fluidos puede depender del tamaño de los mismos [14].

La distribución porosimétrica se puede expresar en términos de curvas de retención de mercurio, que muestran la cantidad de mercurio retenido en el material en función de la presión aplicada. Estas curvas pueden interpretarse para obtener información sobre la distribución de poros del material, como el tamaño de poro promedio, el tamaño de poro máximo y la fracción de poros de diferentes tamaños [14].

Con este estudio de la porosidad se puede extraer la tortuosidad o sinuosidad de la red de poros. Este parámetro se hace de manera indirecta a partir del volumen de mercurio que queda retenido en el interior de la muestra de roca durante el proceso de extrusión de Hg inyectado en un primer instante. Una mayor tortuosidad indica que un ion debe recorrer una mayor distancia para ir desde un punto de la roca a otro.

La emanación de gas radón desde la roca depende de varios factores, incluyendo la permeabilidad y porosidad efectiva de la roca. Si la roca es altamente permeable y porosa, el gas radón puede escapar más fácilmente a través de ella. Sin embargo, si la roca es muy tortuosa, el gas radón puede quedar atrapado en los poros y fisuras de la roca, lo que puede aumentar la concentración del gas en el ambiente circundante [12].

3.3.4 Análisis de Resistencia al impacto

Una de las propiedades que tratamos de analizar en el desarrollo de este proyecto es la dureza para una futura comparación entre las durezas de las rocas GM y GS y su relación con la emanación de gas radón. Para ello, hicimos uso de un durómetro (véase Figura 3-5) y hemos realizado 10 pruebas de dureza de todas las rocas, descartando aquellos valores que hemos considerado como atípicos.

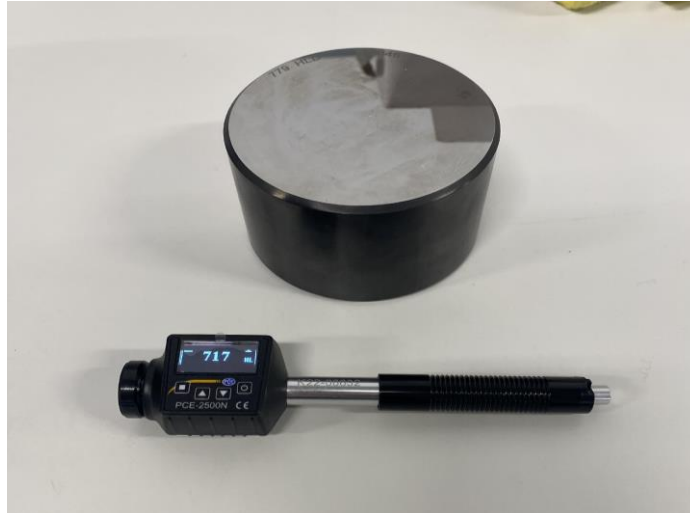


Figura 3-5 Material utilizado (Durómetro)

3.3.5 Ensayo de exhalación de radón en campana estanca sin degradación

El ensayo de exhalación de radón en la campana estanca ha sido uno de los ensayos más importantes realizados durante la investigación de este trabajo. El ensayo ha consistido en tres mediciones que han tenido una duración aproximada de 46 horas. En estas mediciones se ha procedido a medir la concentración de radón (Bq/m^3) acumulada dentro de una campana de vacío estanca, con un volumen interior de 6 L y fabricada en vidrio, usada habitualmente como desecador de laboratorio.

Este ensayo se ha llevado a cabo con el medidor de Radón Bertin Alpha E (Figura 3-6 Medidor de Radón empleado en ensayos), que es un detector de radón de tipo pasivo, lo que significa que no necesita una fuente de energía externa para funcionar. Consiste en un pequeño recipiente que contiene un elemento sensible al radón, en este caso a través de la difusión de diodo de silicio. La lámina se coloca en el lugar de medición durante un período de tiempo específico, generalmente entre varios días o varios meses, según el ensayo y luego se analiza en un laboratorio para determinar la concentración de radón. Los datos se almacenan internamente cada minuto y son fácilmente interpretables en un ordenador a través de una hoja de cálculo Excel.

El dispositivo montado consiste en una campana de secado a la cual hemos rodeado con una cubierta opaca de un polímero para evitar la entrada de radiación procedente de la habitación donde se montó el dispositivo. (Véase Figura 3-8 Montaje Desorción con gel de Sílice (elaboración propia))

Este ensayo (llevado a cabo con las herramientas presentes en la Figura 3-6 y Figura 3-7) se ha dividido en tres fases:

- Primera fase: Se ha procedido a medir durante 12 horas la cantidad de radón que hay en el interior de la campana en ausencia de una roca emisora, y que pudiera deberse a una entrada desde el exterior o a la posible emisión de los materiales que conforman la campana.
- Segunda fase: Se ha procedido a medir durante 46 horas la cantidad de radón que emite la piedra GS1 con el medidor de Radón Bertin Alpha E.
- Tercera fase: Se ha procedido a medir durante 46 horas la cantidad de radón que emite la roca granítica GM10 con el medidor de Radón Bertin Alpha E.



Figura 3-6 Medidor de Radón empleado en ensayos



Figura 3-7 Medidor de Radón empleado en ensayos

3.3.6 Ensayo exhalación de radón en campana de secado con degradación

La utilización de ácido clorhídrico (HCl) para medir los niveles de radiación de un mineral es una técnica comúnmente empleada en la prospección de minerales radiactivos. La razón detrás de esto es que ciertos minerales radiactivos, como la uraninita, la torianita y la monacita, contienen elementos como el uranio, torio y otros elementos radiactivos que se descomponen y emiten radiación alfa, beta y gamma.

Para medir los niveles de radiación de un mineral, se puede tomar una muestra del mismo y ponerla en contacto con una solución de HCl. Los elementos radiactivos presentes en el mineral se disolverán en el ácido y se liberarán como iones en la solución. La cantidad de radiación que emiten estos iones puede ser medida mediante un contador Geiger o un espectrómetro de radiación.

Es importante tener en cuenta que esta técnica de medición de radiación solo es efectiva para minerales que contienen elementos radiactivos.

Entre los materiales que componen el granito destacan el cuarzo, la mica y el feldespato. Como se ha expuesto anteriormente, estos minerales tienen un bajo compuesto de Uranio. Por lo que se ha procedido a la degradación a través de HCl de este mineral para extraer las muestras de Radón que emanan de esta roca, al verse sometida a un proceso de degradación.

De la misma manera en la que se montó el primer dispositivo, se procedió a verter una disolución de HCl (pH=2) hasta cubrir un tercio de las rocas a medir. Como se ha explicado anteriormente, el HCl actúa sobre la roca granítica degradando sus componentes, entre ellos los que se encuentran en la cadena radiactiva del ^{222}Rn . Tras dejar actuar esta disolución de HCl durante un total de 72 horas se procedió a hacer vacío en el interior de la campana conectando una bomba de vacío durante 30 min para que la roca absorbiera todo el líquido en sus cavidades porosas y contribuir a que la degradación fuera mayor. Al aumentar la degradación podremos obtener unos resultados más precisos. Se dejó la campana al vacío durante 210 min. Durante los 240 min que duró el vacío, el medidor de Rn se sacó del interior, para evitar un posible daño del equipo.

Pasado el tiempo de espera al vacío, se procedió a abrir la campana, vaciar la disolución líquida de HCl e introducir gel de sílice para favorecer la absorción de humedad que pudiera quedar en la roca de muestra. Después de ello, se volvió a montar la campana de desecado con el medidor de radón en su interior para ver cómo la degradación de los minerales ha afectado a la emisión de gas radón (durante 48 horas), tal y como se refleja en la Figura 3-8.



Figura 3-8 Montaje Desorción con gel de Sílice (elaboración propia)

4 RESULTADOS

4.1 Análisis mineralógico y de radioactividad

El análisis mineralógico (ver Figura 4-1 Difractograma de rayos X de los granitos GS y GM.) muestra que ambos granitos están compuestos principalmente por cuarzo, feldespatos tanto sódicos como potásicos, y micas. Ambos difractogramas muestran también la presencia de titanita y circón.

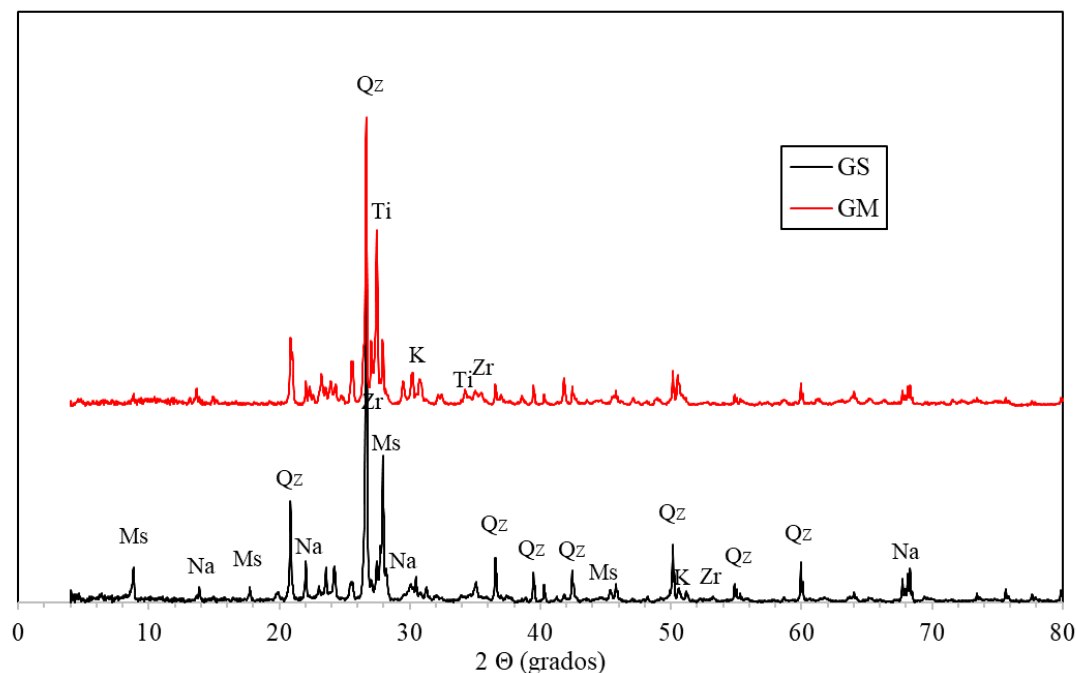


Figura 4-1 Difractograma de rayos X de los granitos GS y GM.

En la Figura 4-1 se muestran los picos identificados de las siguientes fases cristalinas: cuarzo (Qz), albita (Na), microclina (K), moscovita (Ms), titanita (Ti) y circón (Zr).

Petrográficamente, el granito GM está constituido principalmente por cuarzo con bordes corroídos, feldespato potásico parcialmente caolinizado de tipo ortoclasa (KAlSi_3O_8) y plagioclasa sódica de tipo albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), formando maclas polisintéticas (Figura 4-2 Imágenes de luz polarizada con nicoles paralelos (izquierda) y nicoles cruzados (derecha) del granito GM. En algunos de los feldespatos sódicos y potásicos se aprecia localmente fracturamiento. La proporción feldespato potásico es ligeramente superior a la de feldespato sódico (proporción 1:0,9). Como minerales accesorios presenta un alto contenido de micas formando láminas grandes, de tipo moscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, de $1,4 \times 1,7$ mm) y biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$, de 160×700 μm aproximadamente). Presenta una baja proporción de cristales diminutos de circón ($18\text{-}57\mu\text{m}$), dispuestos como inclusiones en las micas. Igualmente aparecen silicatos de titanio y calcio de tipo titanita ($\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$), que ocupan el espacio intergranular.

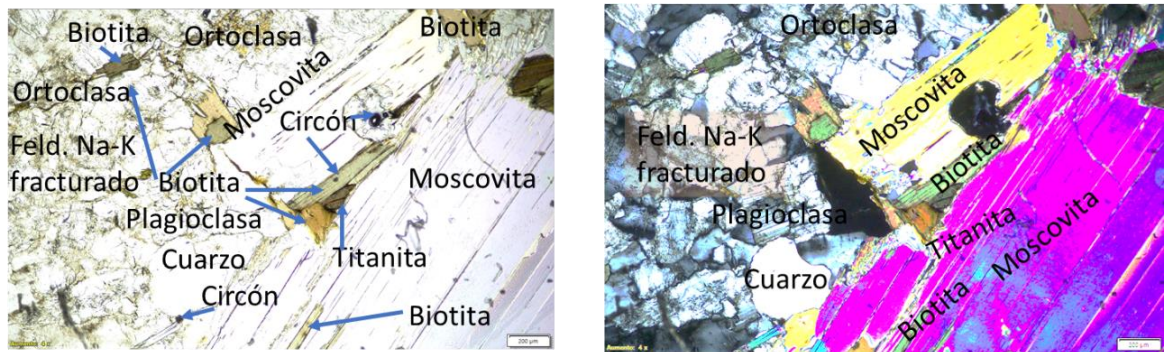


Figura 4-2 Imágenes de luz polarizada con nicols paralelos (izquierda) y nicols cruzados (derecha) del granito GM.

Con respecto al granito GS (Figura 4-2), petrográficamente las imágenes de luz polarizada indican que se trata de un granito de apariencia brechoide constituido por cuarzo, feldespato alcalino de tipo sódico y potásico y minerales micáceos. Los feldespatos desarrollan una textura peritítica debido al intercrecimiento de ortoclasa caolinizada y plagioclasa sódica de tipo albita, los cuales presentan un alto grado de fracturamiento. El cuarzo se presenta en dos tamaños, formando cristales, de aproximadamente 1,3x1,7 mm, con bordes corroídos e internamente microfisurados, y cristales tipo mosaico de menor tamaño (25x25 μm). Alrededor de los bordes de cuarzo y fisuras aparecen láminas de minerales micáceos con espesores entre 16 y 26 μm . Localmente hay zonas donde el cuarzo de menor tamaño se dispone entre las láminas de mica. Se identifican acumulaciones de circón y cristales piramidales fracturados de titanita.

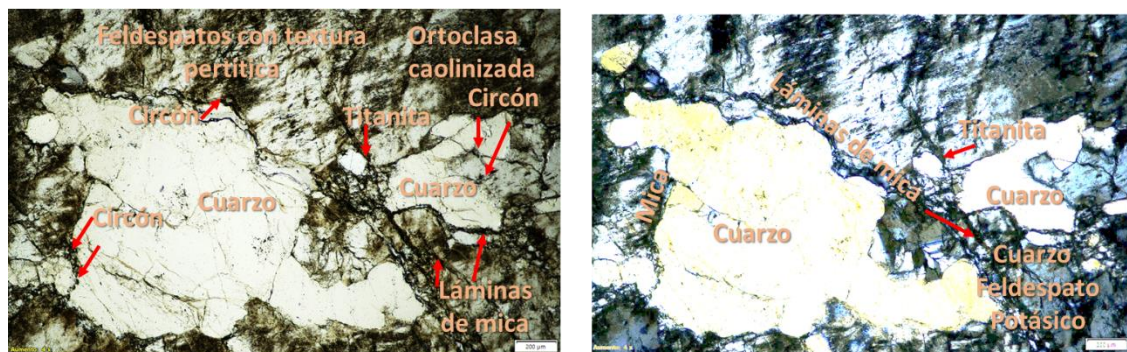


Figura 4-3 Imágenes de luz polarizada con nicols paralelos (izquierda) y nicols cruzados (derecha) del granito GS.

Comparativamente entre granitos se aprecia que el granito GS presenta un mayor contenido de circón que el GM. Además, aparece titanita fracturada. Ambos minerales típicamente contienen elementos radioactivos. El granito GS presenta un alto grado de fisuramiento, lo cual favorece la migración y acumulación del circonio e incrementa la acumulación de elementos radioactivos en determinadas zonas de la roca. Además, existen evidencias de triturado del material por efecto local de tipo cataclástico con la formación de cuarzo en mosaicos de tamaño pequeño. Este análisis muestra evidencias de que el granito el GS se encuentra en una región de alto diaclasamiento.

El análisis elemental realizado por fluorescencia de rayos X indica que el granito GS presenta un mayor contenido de hierro, seguramente por un mayor contenido en biotita, un mayor contenido de titanio y calcio, indicativo de la presencia de titanita, y mayor contenido de circón. Estos resultados ratifican lo observado en el análisis mineralógico y petrográfico. Además, en ambos casos, pero especialmente en el granito GS, se aprecia un cierto contenido de bario, posiblemente asociado a la presencia de barita en la roca. Este mineral suele estar asociado a yacimientos de uranio.

Tabla 1 Análisis elemental de los granitos GS y GM en porcentaje en peso, obtenido a través de fluorescencia de rayos X

Elementos	Unidades wt%	
	GS	GM
Si	29.923	32.345
Al	6.244	6.206
K	4.162	7.520
Fe	0.895	0.019
Ca	0.402	0.098
Ti	0.124	L.D.
Ba	0.030	0.012
S	0.022	0.017
Cr	0.007	0.006
Sn	0.005	L.D.
Zn	0.005	L.D.
Zr	0.004	L.D.
Pb	0.003	0.007
Sr	0.003	0.002
Rb	0.015	0.027

Teniendo en cuenta la actividad radioactiva asociada a los minerales detectados para ambos granitos (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se puede intuir que el granito GS debe emitir una mayor radiación que el granito GM. Esto se debe al mayor contenido de biotita, pero sobre todo al mayor contenido de minerales accesorios como la titanita (esfena) y el zircón ya que tal y como se aprecia en la tabla el contenido de uranio es mayor en los minerales accesorios.

Tabla 2 Actividad radioactiva de algunos de los minerales presentes en GS y GM

MINERALES PRINCIPALES	Valores medios de Uranio		Rango ppm
	Bq/kg	ppm	
Cuarzo	20,9	1,7	0,1-10
Feldespatos	33,2	2,7	0,1-10
Biotita	99,6	89,1	1-60
Moscovita	145,1	11,8	2-8
MINERALES ACCESORIOS	Valores medios de Uranio		Rango ppm
	Bq/kg	ppm	
Esfena		280	10-700
Zircón		1330	100-6000

Los resultados obtenidos a partir de la determinación de radionucleidos por espectrometría gamma (ver Tabla 2 Actividad radioactiva de algunos de los minerales presentes en GS y GM), indica que el contenido de radionucleidos emisores alfa, también denominado índice de actividad alfa, asociados al

contenido de ^{238}U y su descendencia ^{226}Ra y ^{222}Rn , es superior en el granito GS (hecho que concuerda con todo lo comentado anteriormente). Mientras que el contenido de radionucleidos emisores beta relacionados con el contenido de ^{232}Th y al ^{40}K no muestra la misma tendencia. Mientras que el contenido de ^{232}Th es superior en GS, el ^{40}K es superior en GM, este último seguramente guarda relación con el mayor contenido de microclina en este granito (Tabla 3 Actividad radioactiva de algunos de los minerales presentes en los granitos GM y GS.)

Isotopo radioactivo	Concentración Bq/kg	
	GS	GM
$^{238}\text{U}(^{234}\text{Th})$	223±40	108±25
$^{226}\text{Ra}(^{214}\text{Pb})$	149±13	75±6.9
$^{232}\text{Th}(^{228}\text{Ac})$	35.8±9	< L.D.
^{40}K	2070±190	2960±270

Tabla 3 Actividad radioactiva de algunos de los minerales presentes en los granitos GM y GS.

4.2 Análisis de las propiedades físico-mecánicas

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** recoge las principales propiedades físicas a sociadas a los granitos estudiados en este trabajo.

Atendiendo a estos datos, y en lo que se refiere a la porosidad, se aprecia que ambos granitos presentan una porosidad accesible al agua similar. Sin embargo, el granito GS presenta una mayor porosidad accesible al mercurio (12,52% frente al 8,01% del granito GM). Esta mayor porosidad al mercurio se debe especialmente al mayor contenido de poros que hay en GS con un tamaño de acceso superior a 20 μm .

Tabla 4 Propiedades de los granitos sobre los que se emplazan las instalaciones del edificio principal del CUD-ENM.

Parámetros	GS	GM
Porosidad accesible al agua (% v/v)	3,24	3,21
Porosidad accesible al mercurio (% v/v)	12,52	8,01
Porosidad Capilar (% v/v)	1,23	1,48
Coeficiente de Capilaridad ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$)	0,008	0,013
Contenido de agua absorbido a vacío (%)	1,26	1,26
Contenido de agua absorbido por capilaridad (%)	0,65	0,71
Densidad aparente (kg/m^3)	2563	2552
Densidad real (kg/m^3)	2648	2636
Dureza Leeb (HLD)	684,97	689,61
Resistencia a compresión (MPa)	91,63	92,41
DDE (μm^{-1})	0,021	0,057

EMDc (m/kg)

0,002

0,006

Con respecto a la estructura porosimétrica del granito GS, se aprecia que presenta una distribución trimodal, con una familia de poros entre 0.1-7 μm , otra entre 12-60 μm (con un pico muy marcado en 33 μm) y finalmente una familia de poros con tamaño de acceso entre 120-290 μm . En este granito el 32% aproximadamente de los poros se encuentran del rango de poros con tamaño de acceso capilar entre 0,1-100 μm , un 67% corresponde a poros con tamaño de acceso superior a 100 μm y apenas un 0,9 % de los poros presentan un tamaño de acceso inferior a 0,1 μm (correspondientes a poros que no son accesibles al agua). De los poros con tamaño de acceso capilar prácticamente la mitad, en concreto el 13% de los poros, se encuentran entre 10-100 μm .

En el caso del granito GM, la distribución porosimétrica es bimodal con una familia de poros entre 0,1-90 μm y otra con un tamaño de acceso superior a 220 μm . En este granito, el 77% de los poros caen dentro del rango capilar. Dentro de este rango la mayor parte, un 66% del volumen poroso se corresponde con poros con tamaño comprendido 0,1-10 μm .

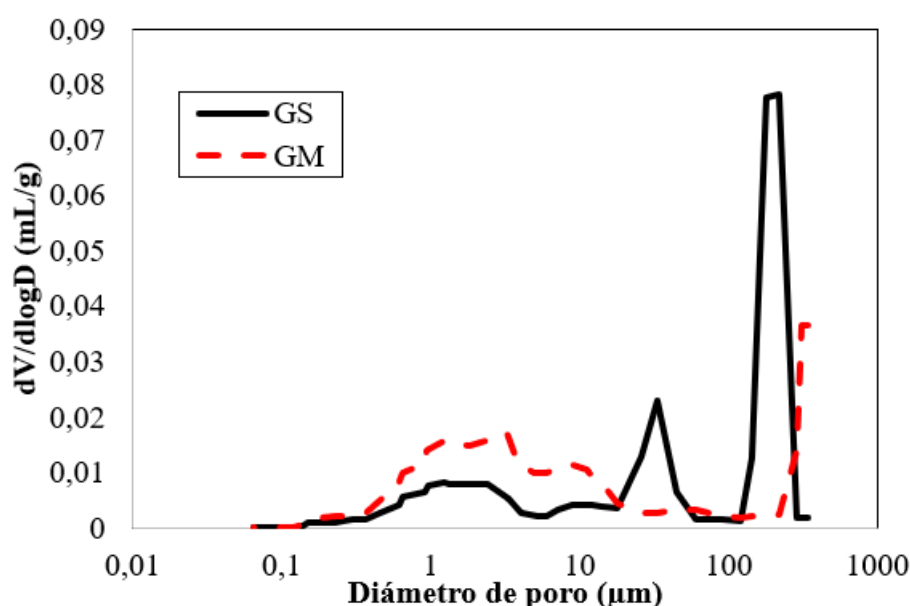


Figura 4-4 Distribución porosimétrica de los granitos del estudio obtenida por inyección de mercurio.

Si se analiza la cinética de absorción capilar (véase Figura 4-5 y Figura 4-6), se aprecia que:

- 1) El granito GM absorbe una mayor cantidad de agua mediante este mecanismo, alcanzando porcentajes de saturación del 56%, mientras que el grado de saturación alcanzado por GS apenas supera el 51%.
- 2) La velocidad de absorción en GM es más alta, obteniéndose un coeficiente de absorción capilar de $0,013 \text{ kg/m}^2 \text{ s } 0.5$ frente al $0,008 \text{ kg/m}^2 \text{ s } 0.5$ del granito GS. Esta mayor pendiente del tramo inicial de la cinética de absorción está directamente relacionada con lo comentado anteriormente en la distribución porosimétrica (mayor volumen de poro con tamaño de acceso capilar y dentro de este volumen mayor proporción de poros con tamaño de acceso más pequeño).

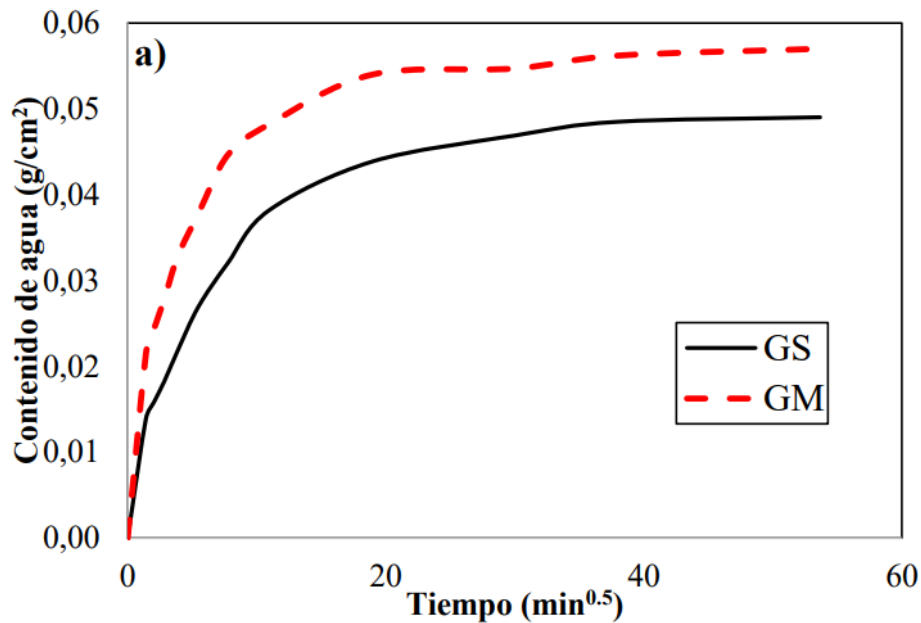


Figura 4-5 Contenido de agua por superficie alcanzado durante el ensayo de absorción capilar para el granito GS y GM

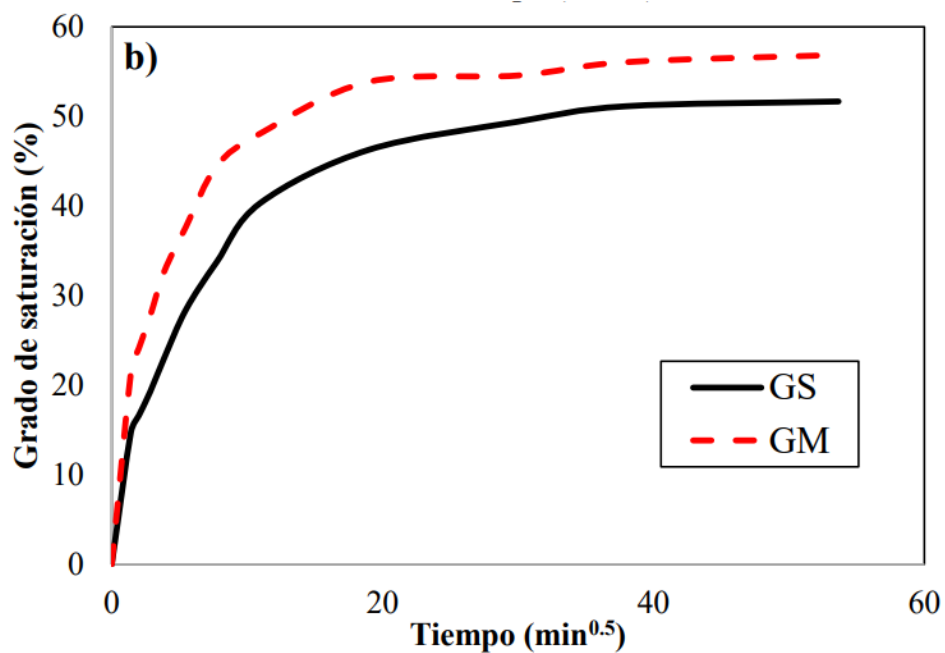


Figura 4-6 Grado de saturación alcanzado durante el ensayo de absorción capilar para el granito GS y GM

Comparando la cantidad de mercurio, en mL/g, que entra en cada rango de poros, se aprecia que GS tiene un mayor volumen poroso en el rango de poros con tamaño de acceso superior a las 10 μm , concretamente a las 18 μm , mientras que GM presenta un mayor volumen poroso en el resto de los rangos, especialmente entre 0,1-1 μm y 1-10 μm .

Si se analiza la cinética de absorción capilar (Figura 9), se aprecia que: 1) el granito GM absorbe una mayor cantidad de agua mediante este mecanismo, alcanzando porcentajes de saturación del 56%, mientras que el grado de saturación alcanzado por GS apenas supera el 51%. 2) la velocidad de absorción en GM es más alta, obteniéndose un coeficiente de absorción capilar de 0,013 $\text{kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ frente al 0,008 $\text{kg/m}^2 \text{ s}^{0.5}$ del granito GS. Esta mayor pendiente del tramo inicial de la cinética de absorción está directamente relacionada con lo comentado anteriormente en la distribución porosimétrica (mayor

volumen de poso con tamaño de acceso capilar y dentro de este volumen mayor proporción de poros con tamaño de acceso más pequeño).

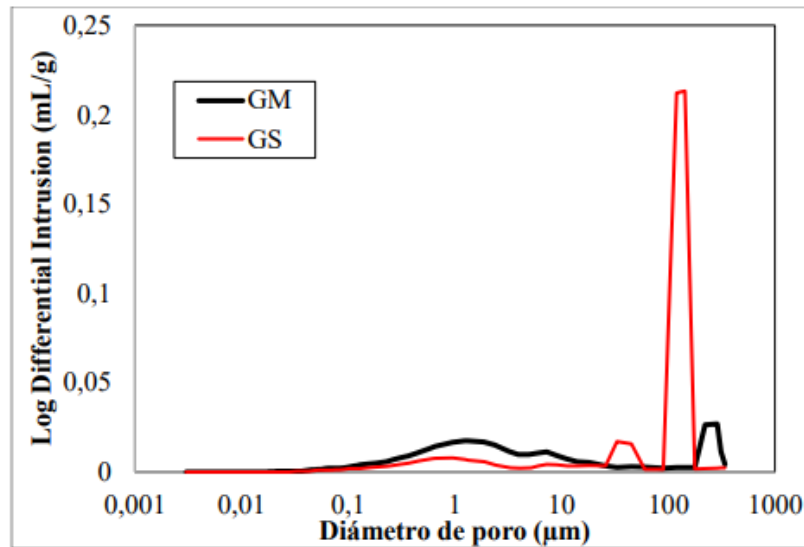


Figura 4-7 Diámetro de poro GM y GS (Elaboración propia)

Como se aprecia en el gráfico (véase Figura 4-7), es la distribución porosimétrica de las dos muestras de granito. En esta figura se representa el volumen de mercurio intruido para diferentes intervalos de diámetro de poro de acceso. En la figura se aprecia que la roca GM presenta dos familias de poros, una muy marcada en el intervalo de poros con diámetro de acceso entre 0,1-10 μm aproximadamente y otra familia con poros con diámetro de acceso superior a 200 μm, no presentando poros con tamaño de acceso nanométrico.

Se puede apreciar en la misma figura, que la roca GS presenta claramente tres familias de poros. La primera marcada en el intervalo de poros con diámetro de acceso entre 0,1-1 μm aproximadamente. La segunda familia de poros entre 25-60 μm aproximadamente y la tercera, con mucha más densidad, de entre 90-220 μm aproximadamente. Tampoco presenta poros con tamaño de acceso nanométrico.

Este hecho indica que la capacidad de absorción capilar del granito GM debe ser superior a la del granito GS.

Con respecto a las propiedades mecánicas se aprecia que por término medio el granito GM presenta una mayor resistencia frente al impacto. Teniendo en cuenta la porosidad accesible al agua y el modelo propuesto por Aoki, que tiene en cuenta el tamaño de los poros, hace que este granito presente una resistencia a compresión ligeramente mayor.

$$\text{Aoki: UCS (MPa)} = 0.079 \cdot e^{-0.039n} \cdot L_s^{1.1}$$

Ecuación 4-1 Ecuación de Aoki

En donde N es la porosidad dacesible al H₂O y L_s es el número de rebotes que da el martillo cuando impacta con el material.

Los datos de dureza superficial indican que la diferencia observada en los dos granitos no es estadísticamente significativa. Sin embargo, sí que se aprecia diferencia en la resistencia a compresión, calculada a través de la ecuación de Aoki. Este resultado encaja con estudios previos que muestran la relación existente entre estapropiedad mecánica y la presencia de poros que, además de reducir el esqueleto mecánicamente útil del material, actúan como concentradores de tensiones [16] [17]

Finalmente, en términos relativos a la durabilidad frente a la acción de agentes externos (DDE y EMDc), aspecto especialmente importante en este trabajo si se tiene en cuenta que a medida que los granitos se alteran son más propensos a facilitar la salida de elementos radioactivos. Por ello, el granito GS, al presentar menos durabilidad. Será más propenso a emitir más cantidades de radionucleidos.

4.3 Ensayo de exhalación de radón en campana estanca sin degradación

Uno de los ensayos clave para este trabajo de investigación ha sido el ensayo de medición de concentración de radón en campana de secado estanca. Los estudios de exhalación en rocas graníticas implican de la cantidad de radón que se emite desde las rocas utilizando detectores de radón, en este caso Bertin Alpha E. Este ensayo ha supuesto un preludio de los resultados que obtendremos a continuación a través de la degradación de estas dos rocas que se han medido.

Como describimos anteriormente, este ensayo se ha dividido en dos fases para cada una de las rocas sometidas a ensayo. En la primera fase se hizo una medición de la radiación de la campana de vacío sin rocas en el interior. A continuación, se presenta la gráfica obtenida del ensayo durante 12 horas.

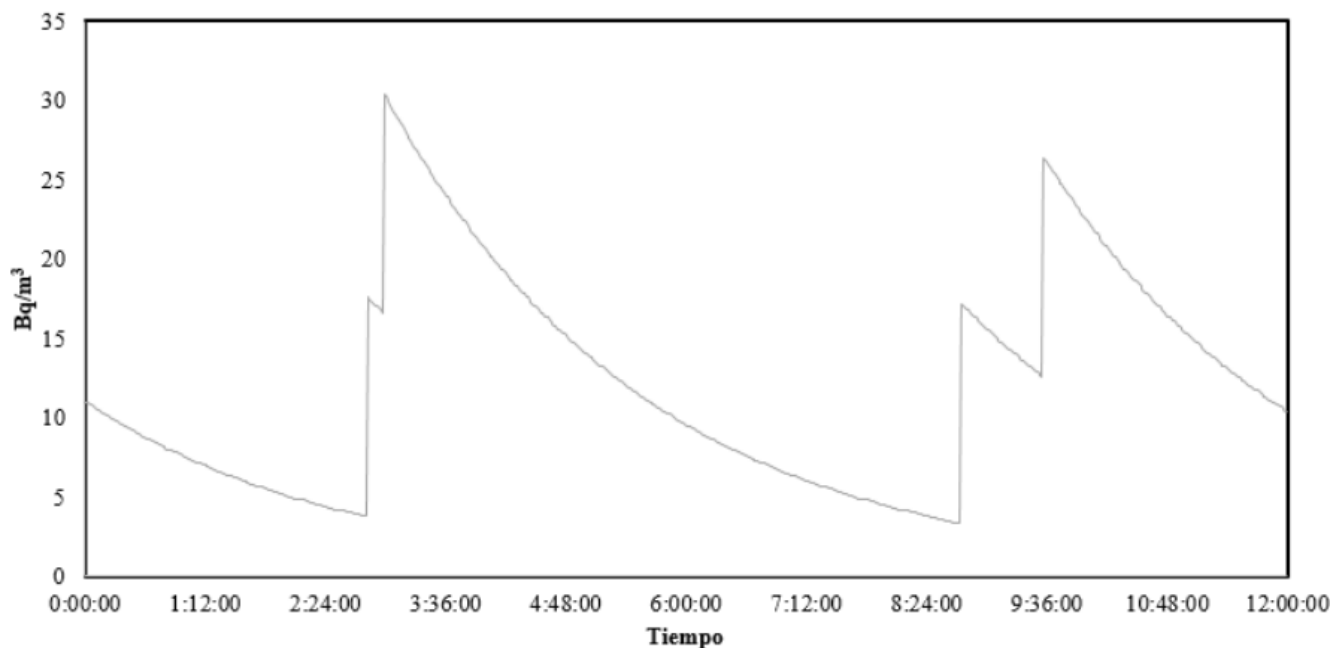


Figura 4-8 Emisión de Radón dentro de la campana de desecado sin rocas (Elaboración propia)

Como se puede observar en la Figura 4-8, las cantidades de radiación oscilan entre los 5 y los 30 Bq/m³. Siendo la media de este registro 12,15 Bq/m³, por lo que se puede concluir que el sistema empleado es estanco y no hay fuentes de radón. En esta gráfica, se pueden apreciar variaciones de las concentraciones de radón, que podrían estar debidas a variaciones de temperatura dentro de la cámara.

A continuación, se introdujo cada una de las rocas en la campana de desecado y se procedió a registrar la radiación que emite cada una de ellas durante un periodo aproximado de 40 horas. Los valores representados constituyen un preludio de lo que nos encontraremos en ensayos posteriores.

4.4 Ensayos de exhalación del radón

Como se puede observar en la Figura 4 9, se puede apreciar que la cantidad de Radón que emite la roca GS es superior a la que emite GM de manera permanente, esto concuerda con los datos mineralógicos analizados anteriormente donde se mostró que GS presentaba un contenido de minerales radioactivos mayor.

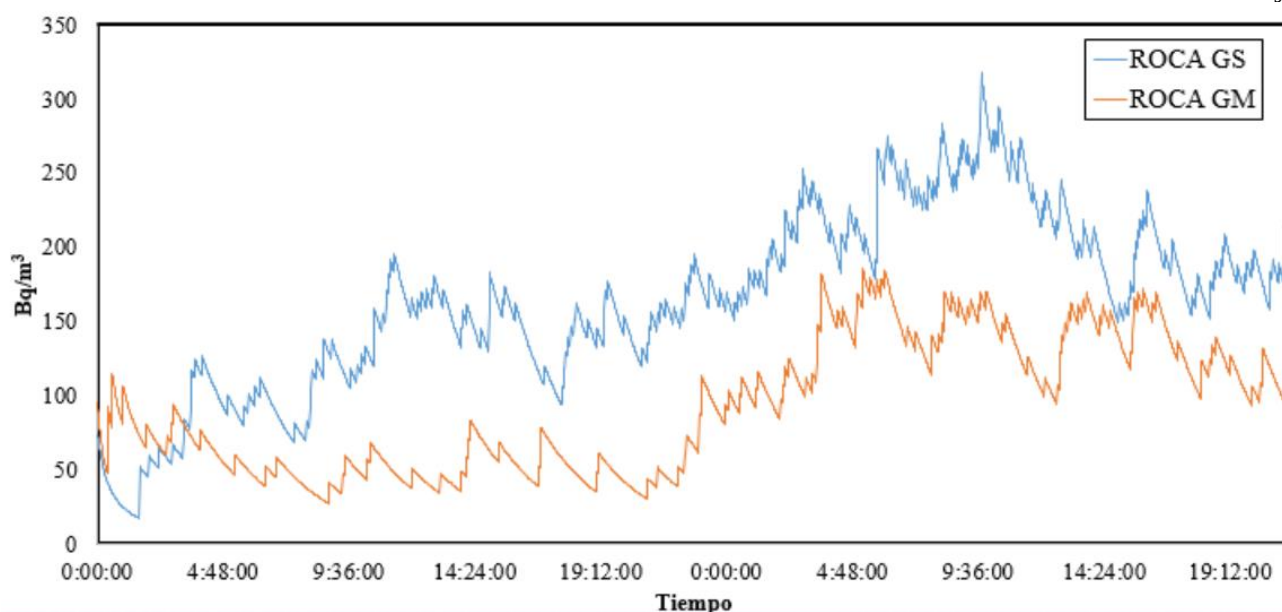


Figura 4-9 Exhalación de radón en rocas GS y GM. (Elaboración propia)

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran los resultados obtenidos de liberación de radionucleidos durante la fase de absorción de HCl y la posterior desorción del mismo

Como puede apreciarse en la figura, se ve una progresión creciente en la exhalación de radón durante ambas fases (absorción y desorción) independientemente del granito alterado. Esto se debe a que los minerales de ambos granitos están sufriendo un proceso de degradación que incrementa la porosidad y permite liberar la radiación contenida en muchos de ellos.

A continuación, se muestran los resultados de la roca GM tras tres días de absorción (véase Figura 4-10).

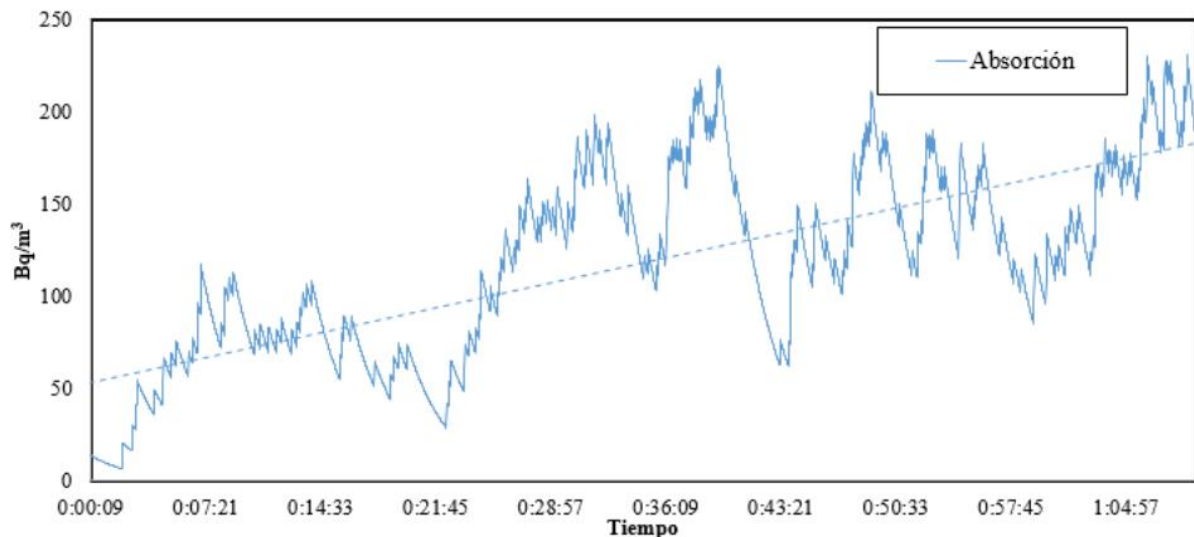


Figura 4-10 Emisión de radón durante la absorción de HCl en la roca GM

Como puede apreciarse en la figura, se ve una progresión de la exhalación de radón creciente de la roca. Esto se debe a que los materiales que la componen (entre ellos el Uranio) se degradan, lo que conlleva a un aumento de la emisión de radón. En nuestro caso, la tasa de emisión de radón ha pasado de tener una media de $91,9 \text{ Bq/m}^3$ (ensayo sin degradación) a una media en la fase de absorción de $117,91 \text{ Bq/m}^3$, esto nos permite verificar que se ha producido una degradación de los materiales que componen la roca.

La segunda subfase de este ensayo consiste en medir la emisión de radón por parte de la roca sin humedad. Para ello se dejó medir durante 48 horas la roca degradada. Obteniendo los siguientes resultados (véase Figura 4-11).

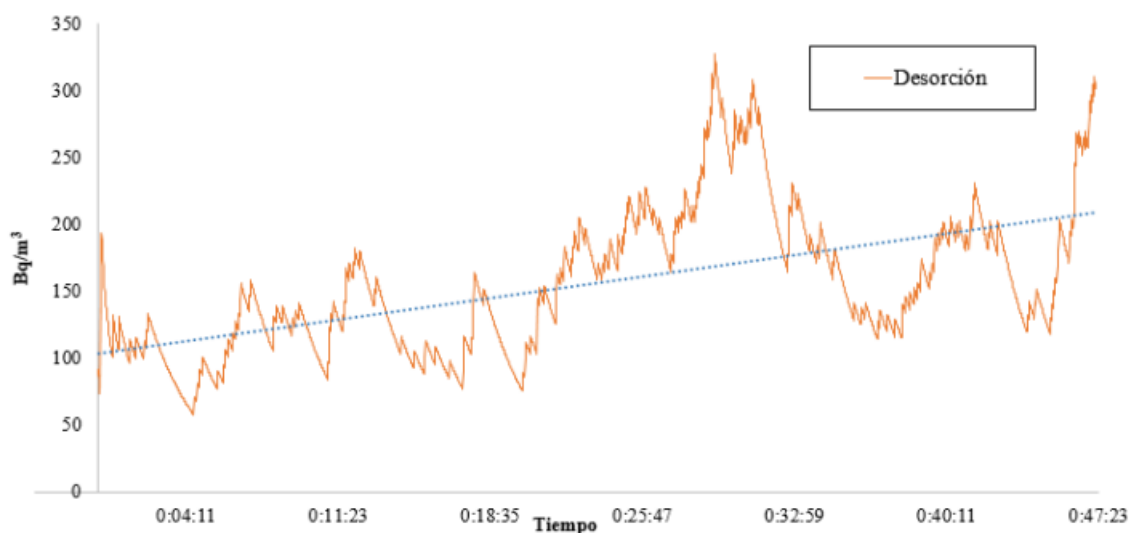


Figura 4-11 Emisión de Radón durante desorción de HCl en la roca GM

Durante esta fase se puede contemplar un considerable aumento de emisión de radón, en torno a un 40% más, dando como media $196,4 \text{ Bq/m}^3$. Podemos concluir que los ensayos de hidrólisis han tenido un impacto significativo en la emisión de radón.

En ambos casos, el proceso de exhalación fue mayor durante la fase de desorción. Esto se debe a que la salida de la disolución facilita la difusión del gas, tal y como ocurre en los procesos de carbonatación de los morteros [18][]. En el caso de GM, la tasa de emisión de Radón durante la absorción ha pasado de tener una media de $91,9 \text{ Bq/m}^3$ a una media en la fase de absorción de $117,91 \text{ Bq/m}^3$.

Durante la fase de desorción se pudo contemplar un considerable aumento de emisión de radón, en torno a un 40%

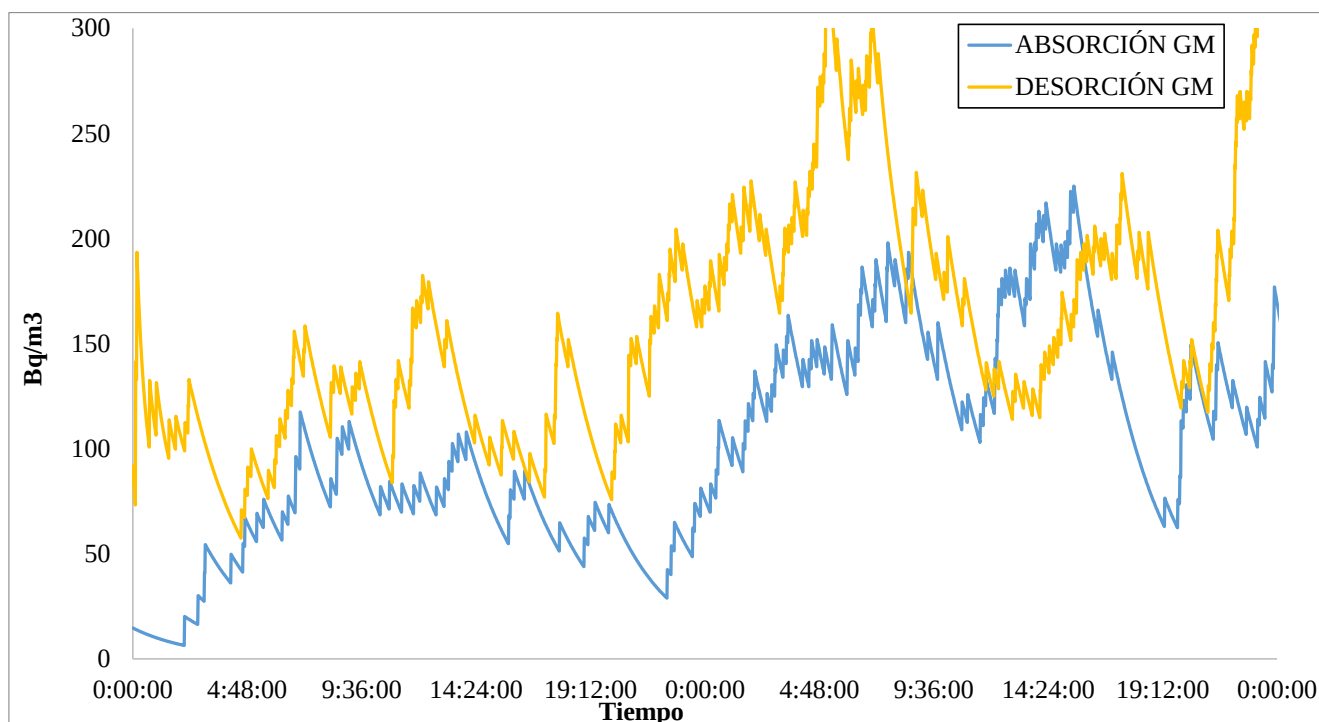


Figura 4-12 13 Emisión de radón durante las etapas de absorción y desorción de HCl en la roca GM

Como podemos apreciar en la Figura 4-12 , la cantidad de radionucleidos durante la fase de desorción es superior a la de absorción, confirmando las suposiciones planteadas desde un principio.

A continuación, se representa la gráfica de la emisión de radón tras tres días de hidrólisis (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

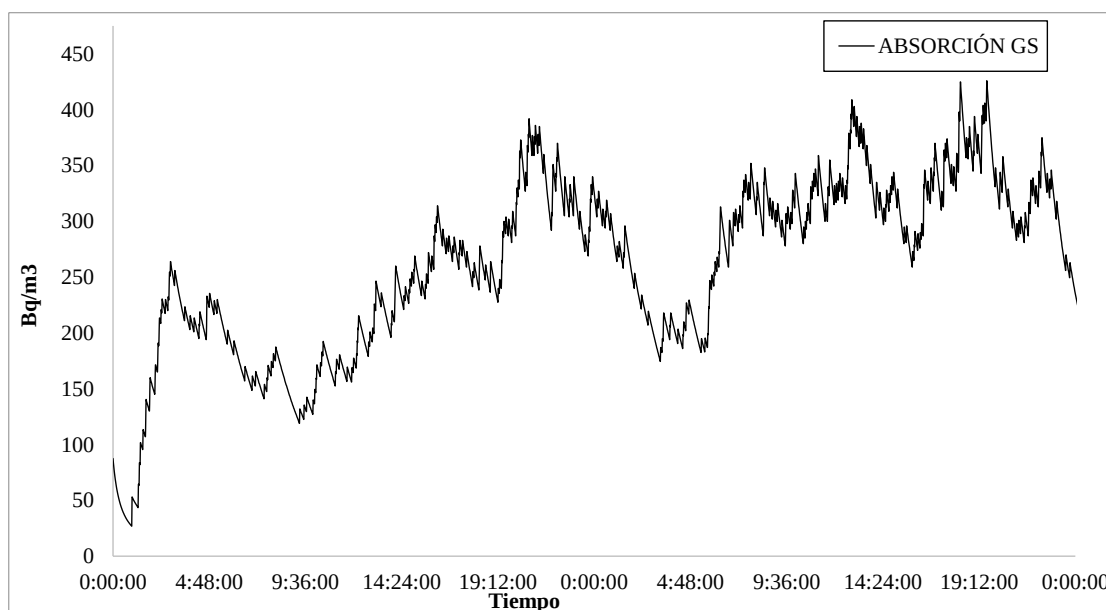


Figura 4-14 Emisión radón durante absorción GS

Como se puede observar en la gráfica gracias a la línea de tendencia se puede apreciar un considerable aumento de la cantidad de radionucleidos que recibe nuestro medidor de radón. Esto se

debe a que debido a la absorción del HCl durante la hidrólisis fomenta que el aire contenido dentro de la roca salga al exterior liberando gran cantidad de radionucleidos. Tomando una media total de 268,29 Bq/m³ una media superior a la obtenida cuando realizamos el anterior ensayo en el que sólo medíamos esta roca sin degradar, con una media de 145,15 Bq/m³.

La segunda subfase de este ensayo consiste en medir la emisión de radón por parte de la roca sin humedad. Para ello se dejó medir durante 72 horas la roca degradada. Obteniéndose los siguientes resultados.

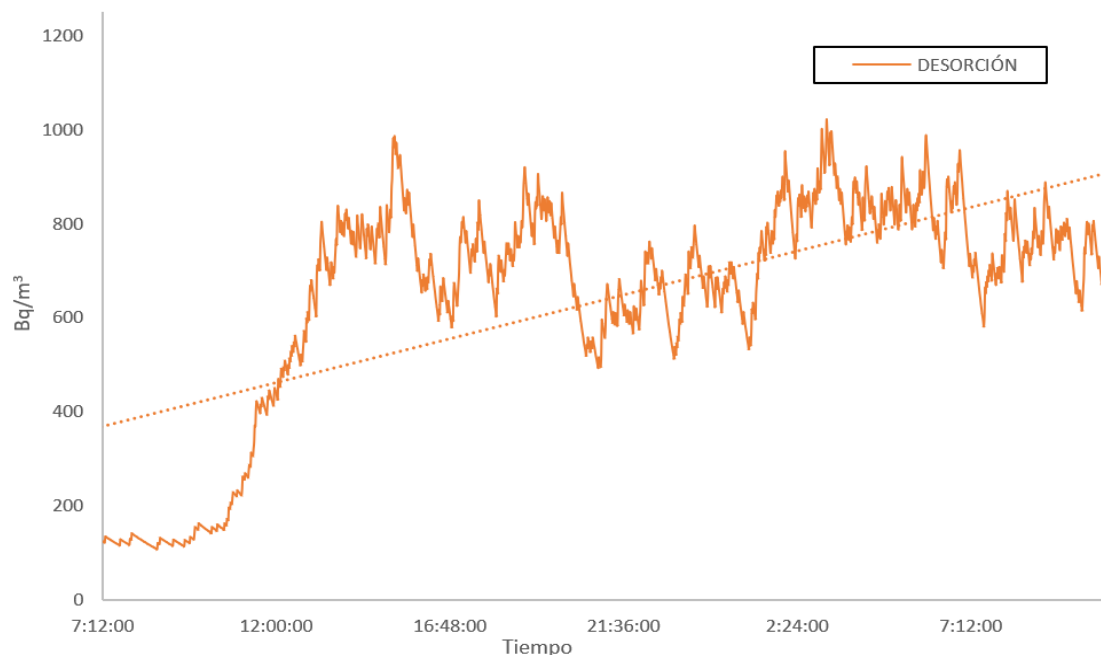


Figura 4-15 Emisión de radón durante fase desorción roca GS

Durante esta fase se puede contemplar un considerable aumento de emisión de radón, en torno a un 40% más, dando como media 428,75 Bq/m³. Podemos concluir que los ensayos de hidrólisis han tenido un impacto significativo en la emisión de radón, aumentándose el nivel de emisión hasta en un 66%.

Por esto y por todo lo expuesto anteriormente se puede concluir que en el balance general, la roca GS presenta unos niveles muy superiores de emisión de radionucleidos.

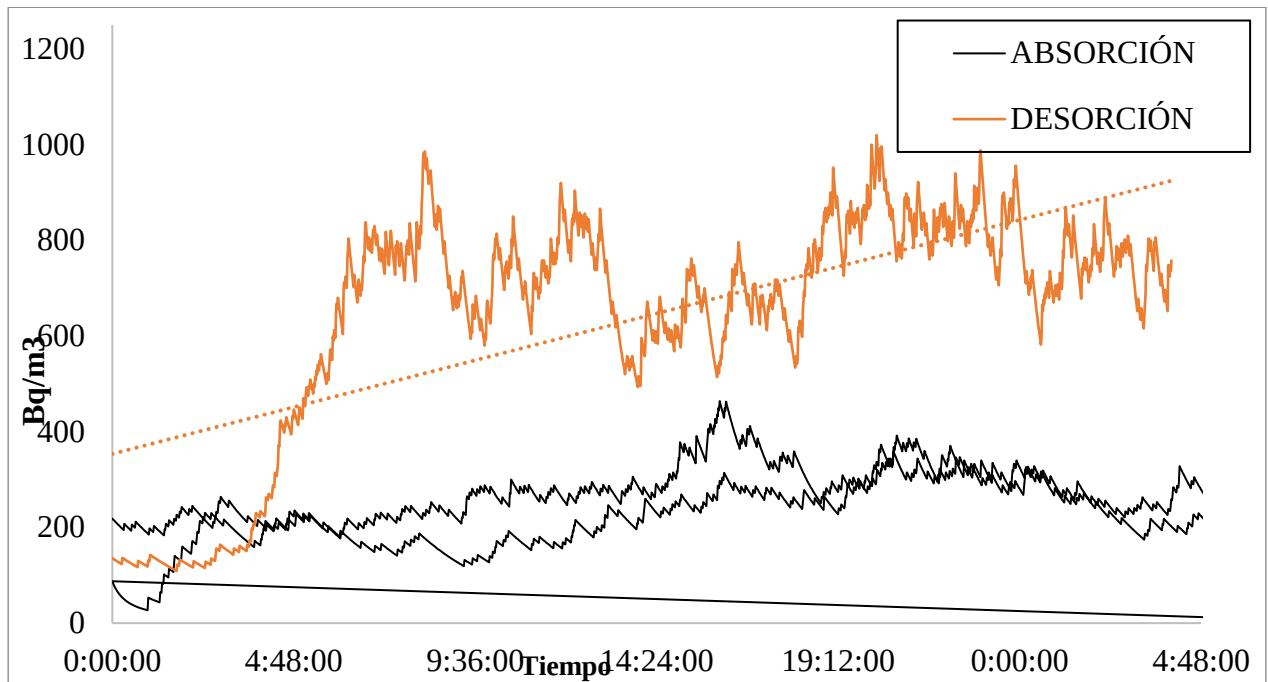


Figura 4-16 Gráfica Absorción y Desorción roca GS

Como se puede observar en la Figura 4-16 Gráfica Absorción y Desorción roca GS, deja de manifiesto que la cantidad de radionucleidos emitidos durante la desorción es muy superior a durante la fase de absorción, corroborando las hipótesis planteadas en un principio. Dando como media 428,75 Bq/m³. Podemos concluir que los ensayos de hidrólisis han tenido un impacto significativo en la emisión de radón, aumentándose el nivel de emisión hasta en un 66% con respecto al de absorción.

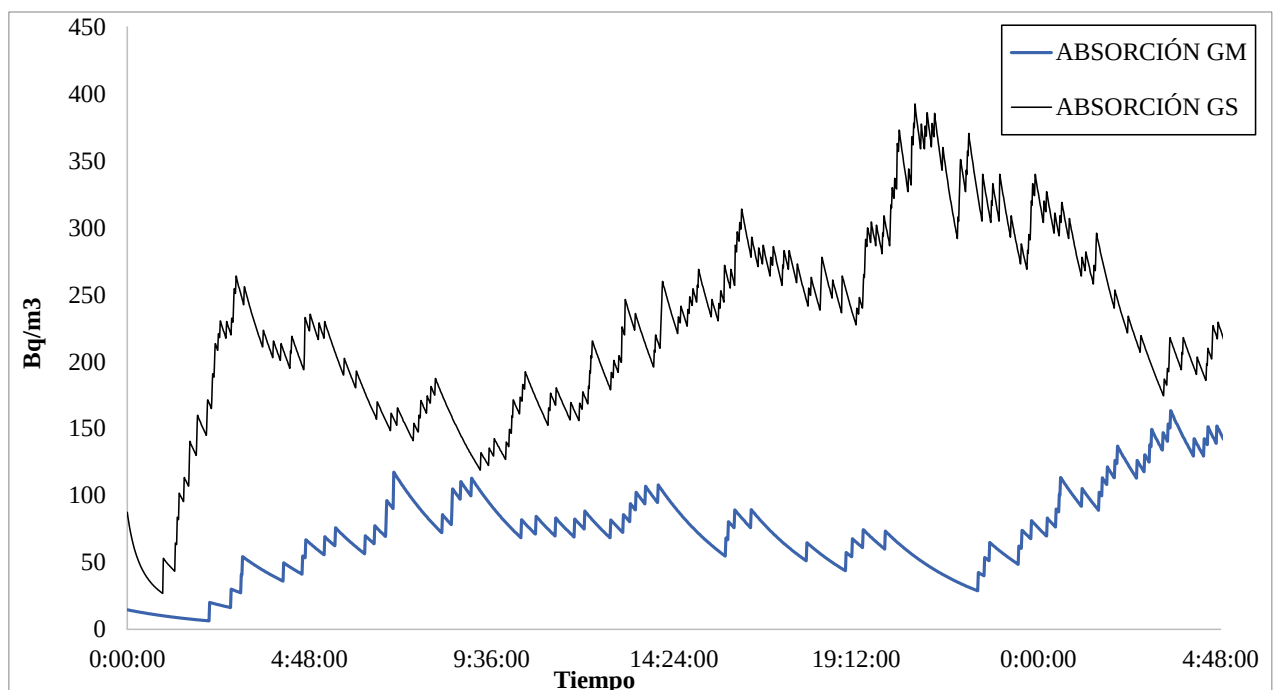


Figura 4-17 Gráfica Absorción GS y GM

La cantidad de radiación alfa registradas en la fase de absorción por parte de la roca GS es constantemente superior a la de la roca GM. (Véase Figura 4-17 Gráfica Absorción GS y GM). Esto se debe principalmente a la composición mineralógica de la roca GS, que tiene mayor composición de materiales radiactivos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

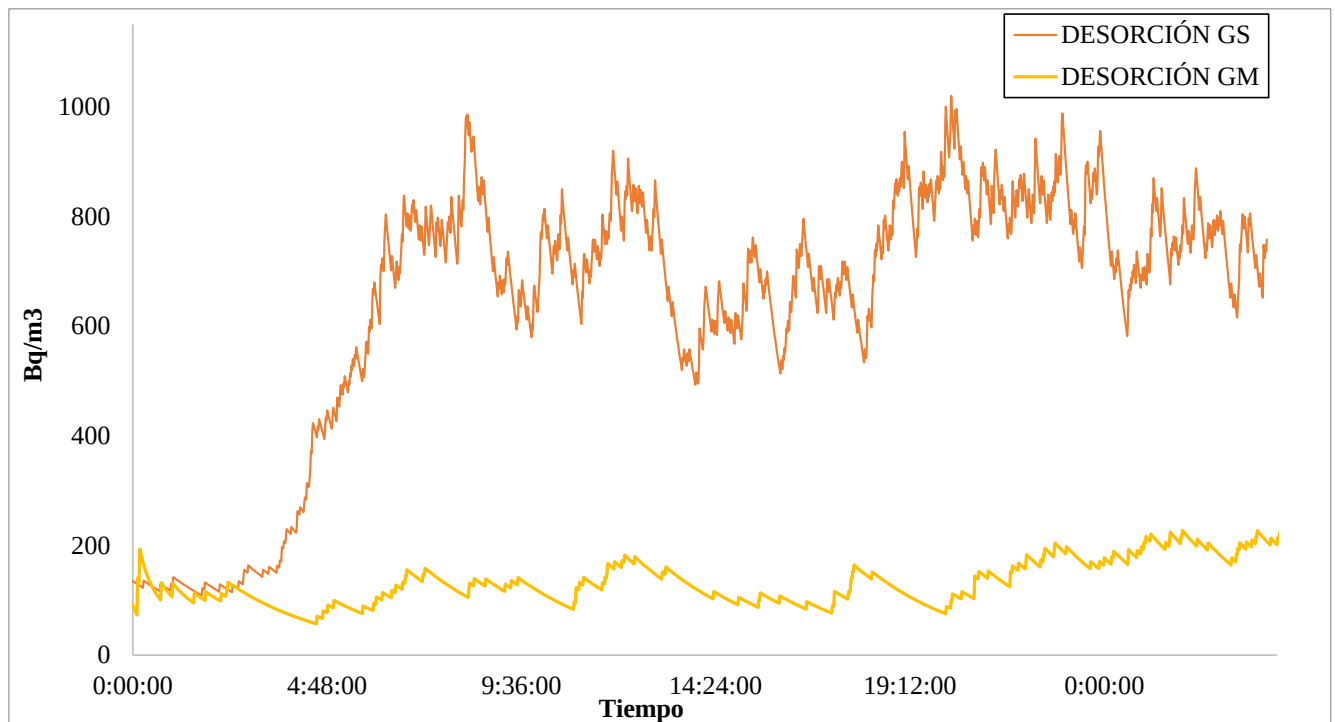


Figura 4-18 Gráficas desorción GM y GS

La Figura 4-18 Gráficas desorción GM y GS pone de manifiesto y corrobora una vez más que la emisión de radionucleidos durante la fase de desorción, fase en la que más se acentúa esta diferencia de emisiones. Que es predominante para la roca GS debido a los factores como la composición mineralógica expuesta anteriormente.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

A partir de los ensayos realizados, los resultados obtenidos y los objetivos fijados, se exponen a continuación las principales conclusiones:

- El granito GS presenta un mayor contenido de minerales con posibilidad de emitir más radionucleidos alfa (relacionados con el gas radón) que el granito GM.
- El análisis petrográfico muestra que el granito GS muestra un mayor fisuramiento y además presenta una mayor porosidad al mercurio lo cual facilita el movimiento del gas.
- Los análisis de degradación a través de hidrólisis muestran una gran diferencia entre la emisión de radionucleidos entre las rocas GS y GM, siendo esta primera la que más cantidad de radiación emite.
- Los ensayos de degradación y registro de radionucleidos muestran una tendencia al alza de concentración de gas, que se estabiliza pasadas las 12 horas aproximadamente del ensayo, con aumentos y disminuciones de la concentración debido, probablemente a las variaciones de temperatura en la zona de registro.
- Las propiedades físicas basadas en la porosidad y la accesibilidad al mercurio y al H₂O dejan de manifiesto que son influyentes para la penetración de radón a través de paredes y muros. Sin embargo, no tienen tanta relevancia en un ensayo de degradación a través de hidrólisis en un espacio tan cerrado como una campana de desecado
- Las propiedades físicas basadas en la composición mineralógica y la composición en Uranio es un factor determinante en el registro de radionucleidos en un ambiente cerrado y pequeño como una campana de desecado

Por lo tanto, en este TFG se demuestra que la roca GS extraída de la zona oeste del patio de aulas debido a sus propiedades físico-mecánicas y mineralógicas presentará mayores tasas de exhalación que la roca GM extraída de en la zona central del patio. Esto permitiría explicar, en buena medida, las mayores concentración de gas radón detectadas en la zona oeste del edificio del CUD.

5.2 Líneas futuras

Una de las posibles líneas futuras que tiene este campo de investigación es el estudio de el grado de mitigación de la penetración de gas radón que pueden tener los materiales de la construcción.

Esta investigación puede involucrar la evaluación de diferentes tipos de materiales de construcción para determinar su eficacia en la prevención de la migración de radón a través de muros, paredes y suelos. Por ejemplo, se podrían probar diferentes tipos de materiales de sellado como ladrillos, distintos tipos de hormigón o hasta incluso maderas para ver cuáles son los más efectivos en la prevención de la migración de radón, empleando el dispositivo de registro de radón Bertin Alpha E que hemos empleado para el proyecto

Además, también se podrían llevar a cabo estudios para evaluar la eficacia a largo plazo de estas medidas pasivas. Se podrían realizar pruebas de seguimiento y monitoreo para determinar si las medidas de mitigación implementadas están funcionando adecuadamente y si se necesita alguna actualización o ajuste en el futuro.

Otra posible línea de investigación podría ser el desarrollo de tecnologías innovadoras y materiales de construcción específicos para la prevención y mitigación de la migración de radón en edificios y estructuras. Esto podría implicar la identificación de nuevos materiales que sean más efectivos en la prevención de la migración de radón, o el desarrollo de tecnologías de ventilación más avanzadas y eficientes que puedan reducir significativamente los niveles de radón en el aire interior.

Por último, ampliaría el campo de investigación del radón de las zonas ganadas al mar y la eficiencia y eficacia de los materiales empleados para reducir las concentraciones de radón.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. M. D. L. SALUD, «MANUAL DE LA OMS SOBRE EL RADÓN EN INTERIORES,» OMS, 2015.
- [2] C. L. Benavides, «Evaluación de factores determinantes en la concentración de gas radón en espacios interiores,» Marín, Pontevedra, 2021.
- [3] CSN, «Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural,» Madrid, 2000.
- [4] A. Villar, «El mapa español del radón: Análisis de factores indicativos del riesgo de cáncer,» Universidad de Cantabria, Cantabria, 2017.
- [5] ENRESA, «Los recursos geológicos de la tierra: un proceso con retorno».
- [6] E. Martínez Peña, «Edufichas,» 21 07 2022. [En línea]. Available: <https://www.edufichas.com/ciencias/tabla-periodica/>. [Último acceso: 02/02/23].
- [7] C. Camacho Martín, «Gestión de la presencia de radón en lugares de trabajo,» 2021.
- [8] D. L. E. H. Gutierrez, Interviewee, *Geología y Radón*. [Entrevista]. 10 Febrero 2023.
- [9] X. d. Galicia, «Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas,» 2018.
- [10] IGME, « MEMORIA MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA 1:50000,» MADRID, 1966.
- [11] D. O. d. I. U. Europea, «DIRECTIVA 2013/59/EURATOM DEL CONSEJO,» 2013.
- [12] A. Abassi, «Niveles de Radón y materiales de Construcción de Granito,» Facultad de Ciencias del Mar, Turquía.
- [13] D. L. O. PAYÉS, «Estudio del comportamiento del gas radón en aguas subterráneas,» Universidad de El Salvador, El salvador, 2020.
- [14] J. F. C. e. I. d. R. Amado, «Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos. Técnicas de Conservación,» Universidad de Vigo, Pontevedra, 2016.
- [15] IGME, «PETROGRAFÍA,» 2016.

- [16] C. Alegre Sacristán, «Evaluación del comportamiento de un mortero acumulador de energía mediante la aditivación con parafina,» Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2022.
- [17] H. A. y. Matsukura, «Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness,» Bulletin of Engineering Geology, 2009.
- [18] D. Ergenc, J. Feijoo, R. Fort y M. Akvarez de Buergo, «Effects of potassium ferrocyanide used for desalination on lime composite performances in different curing regimens. Constructions and building materials,» Vigo, 2020.
- [19] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.
- [20] A. Pérez, Cómo escribir una bibliografía, Nuevas publicaciones.
- [21] S. Miao, «Damage effects and mechanisms in granite treated with acidic,» ELSEVIER, Beijing, 2016.
- [22] P. Martínez y A. García, Cómo escribir una buena memoria de TFG, Publicaciones del 2000, 2013.
- [23] J. M. B.-D. A. M.-M. M. Pérez-Ríos, «"Attributable mortality to radon exposure in Galicia. Is it necessary to act in the face of this health problem?,» BMC, 2010.
- [24] P. Linares Alamparte, «Caracterización del Hormigón en relación a la difusión de gases y su correlación con el radón,» Tesis Doctoral, Madrid, 2015.
- [25] D. L. E. H. Gutierrez, Interviewee, *Geología y Radón*. [Entrevista]. 24 Febrero 2023.
- [26] M. d. Fomento, «Código Técnico de Edificación: Documento básico HS Salubridad,» 2019.
- [27] Díaz-Guerra, «Estudio de un método de fluorescencia de rayos X en lámina delgada para la determinación de uranio en soluciones de baja actividad,» ISSN 0081-3397, MADRID, 1980.
- [28] J. F. DE LA O PAYÉS, «ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL GAS RADÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS,» Universidad de El Salvador, El Salvador, 2020.
- [29] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [30] «El radón y sus efectos en la salud,» Organización Mundial de la Salud, 2 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health#:~:text=El%20rad%C3%B3n%20emana%20f%C3%A1cilmente%20del,y%20provocar%20c%C3%A1ncer%20de%20pulm%C3%B3n..>
- [31] L. Mederos Martín, «Las mareas,» 2009.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

La mitigación del gas radón puede tener algunas implicaciones económicas. A continuación, se presentan algunas de ellas:

- **Costos de mitigación:** La mitigación del gas radón puede implicar la instalación de sistemas de ventilación o la modificación de los sistemas de calefacción y refrigeración en edificios existentes, lo que puede resultar en costos significativos.
- **Valor de la propiedad:** La presencia de niveles elevados de radón en una propiedad puede afectar negativamente su valor de mercado. Sin embargo, la mitigación del gas radón puede ayudar a mejorar el valor de la propiedad al garantizar un ambiente interior más seguro y saludable.
- **Seguros y responsabilidad:** Las compañías de seguros pueden no cubrir los costos de mitigación del gas radón o pueden imponer requisitos específicos antes de proporcionar cobertura. Además, los propietarios y constructores pueden ser responsables legalmente si se determina que no tomaron medidas adecuadas para mitigar los niveles de radón en sus edificios.
- **Oportunidades comerciales:** La industria de la mitigación del gas radón puede ser una oportunidad comercial en sí misma, ya que hay una creciente demanda de servicios de mitigación de radón. Esto puede crear empleos y oportunidades para empresas especializadas en la mitigación de radón.
- **Regulaciones gubernamentales:** Los gobiernos pueden establecer regulaciones y estándares para la mitigación del gas radón en edificios públicos y privados, lo que puede aumentar los costos de construcción y renovación de edificios, pero también puede garantizar la seguridad pública y mejorar la calidad del aire interior en los edificios.
- **Por último,** el gas radón no se considera un contaminante en exteriores pero sí en interiores, por lo que no supone un riesgo para el medio ambiente, pero es necesario controlar su concentración en interiores por el riesgo de salud.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El gas radón es un gas radiactivo que se encuentra en la naturaleza y puede ser liberado por el suelo, las rocas y el agua subterránea. A continuación, se presentan algunas implicaciones éticas y sociales asociadas al gas radón:

- **Salud pública:** El gas radón es un carcinógeno conocido y puede causar cáncer de pulmón si se inhala en cantidades significativas. Por lo tanto, existe una responsabilidad ética y social para garantizar la salud pública y minimizar la exposición al radón en el aire interior de los edificios.
- **Propiedad privada:** Algunas medidas para reducir la exposición al radón en interiores, como la instalación de sistemas de ventilación, pueden ser costosas y pueden requerir modificaciones en la propiedad privada. Por lo tanto, se debe considerar el equilibrio entre la protección de la salud pública y el derecho a la propiedad privada.
- **Información y divulgación:** La falta de conciencia y conocimiento sobre los riesgos del radón puede llevar a una exposición excesiva. Por lo tanto, es importante que la información sobre los peligros del radón esté disponible y sea fácilmente accesible para el público.
- **Responsabilidad de los trabajadores:** Los trabajadores tienen la responsabilidad ética y social de garantizar que sus empleados no estén expuestos a niveles peligrosos de radón en el lugar de trabajo.
- **Regulación gubernamental:** Los gobiernos tienen la responsabilidad de establecer regulaciones y estándares para garantizar la seguridad pública y minimizar la exposición al radón en el aire interior de los edificios.
- **Propiedades individuales/colectivas:** En el caso de gente que tenga edificios y se dedique a su venta/arrendamiento, si se considera que la mitigación del gas radón es una responsabilidad individual de cada inquilino, esto podría poner en riesgo a personas de bajos ingresos que no puedan permitirse pagar por la mitigación.