



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización de los principales focos de inmisión de gas
radón en despachos de la planta baja del CUD*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Andrea Marín Alonso

DIRECTORES: Arturo González Gil
Lara Febrero Garrido

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización de los principales focos de inmisión de gas
radón en despachos de la planta baja del CUD*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Debido a los efectos perjudiciales que el gas radón produce sobre la salud, resulta de vital importancia diseñar e implementar medidas eficaces que limiten su concentración en espacios cerrados. Para ello, es necesario conocer con la mayor precisión posible los mecanismos de entrada de radón al interior de los edificios.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio de la tasa de exhalación de radón en dos despachos de la planta baja del CUD mediante el método de acumulación basada en la norma EN ISO 11665-7:2015. Para ello, se ha realizado un mapeado completo de la superficie de ambos despachos con el fin de identificar los principales focos de inmisión de cada uno de ellos.

Se concluye que el despacho 114 tiene una tasa media de exhalación de radón de un 21,8% más que la del despacho 110. Además, de ser en ambos casos superior a la tasa media mundial, 20 mBq/m²·s. Asimismo, se han localizado y cuantificado aquellas zonas con elevadas tasas de exhalación de radón.

Con este TFG se progresa en el conocimiento de entrada de gas radón en la planta baja del edificio del CUD, paso fundamental para definir e implantar las medidas de mitigación más idóneas.

PALABRAS CLAVE

Radón, Tasa de exhalación de radón, Inmisión, Método de acumulación, CUD-ENM

AGRADECIMIENTOS

Con este trabajo finaliza una etapa dura, pero a la vez muy enriquecedora y gratificante a bordo de la ENM. Y comienza otra, llena de nuevas aventuras y sueños por cumplir.

Este camino no hubiese sido lo mismo sin el apoyo incondicional de mis padres y mi hermana, pilares fundamentales de mi vida. Ellos han confiado siempre en mí, incluso cuando ni yo misma lo hacía.

Agradecer a mis tutores Lara Febrero y Arturo González la orientación, dedicación e ilusión que han mostrado durante estos meses. Y al profesor Jorge Feijoo por mostrarme su ayuda cuando lo he necesitado.

Como tampoco podría faltar, agradecer a mi promoción, 422-152, por todo lo vivido y lo compartido durante estos 5 años, llenos de buenos y malos momentos. Gracias a ellos el paso por la escuela ha sido una de las mejores épocas de mi vida y la que recordaré siempre con muchísimo cariño. Y a mis compañeros de estudio, por saber sacarme una sonrisa incluso en mis peores momentos.

Por último, a mis amigas, quienes han estado y estarán ahí siempre, demostrándome que la distancia son solo kilómetros y por alegrarse de mis logros como si de los suyos se trataran.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción del radón en el interior de edificios	6
1.2 Objetivos	8
1.3 Metodología y planificación general.....	8
2 Estado del arte	10
2.1 Generalidades del gas radón	10
2.1.1 El origen del gas radón	10
2.1.2 Fuentes de radón	11
2.2 Exhalación del radón.....	12
2.2.1 Emanación	12
2.2.2 Transporte	13
2.2.3 Exhalación	13
2.3 Factores que afectan a la inmisión del radón en edificios.....	14
2.3.1 Factores geológicos	14
2.3.2 Factores constructivos	14
2.3.3 Factores meteorológicos	14
2.4 El gas radón en el interior de edificios.....	15
2.5 Técnicas para medir la exhalación de radón del terreno	16
2.5.1 Medición integrada	17
2.5.2 Medición en continuo	17
2.6 Marco normativo europeo y español.....	18
2.6.1 Normativa vigente	18
2.6.2 Norma UNE-EN ISO 11665-7.....	19
2.7 Medidas de mitigación o prevención	19
2.7.1 Técnicas de prevención.....	19
2.7.2 Técnicas de mitigación	21
3 Materiales y métodos.....	23
3.1 Descripción del lugar de estudio	23
3.1.1 Ubicación y descripción del CUD	23
3.1.2 Descripción de los despachos 110 y 114	24

3.2 Procedimiento experimental	26
3.2.1 Normativa adoptada para la toma de datos	26
3.2.2 Materiales y equipos empleados para las mediciones	27
3.2.3 Metodología empleada en la toma de datos.....	30
3.2.4 Fases de la experimentación	32
3.3 Tratamiento de datos	34
4 Resultados de exhalación de radón en los despachos del CUD	37
4.1.1 Resultados en el despacho 114	37
4.1.2 Resultados en el despacho 110	41
4.1.3 Comparación entre despachos	44
5 Conclusiones	49
5.1 Conclusiones	49
5.2 Líneas futuras	50
6 Bibliografía.....	51
Anexo I : elección del tamaño de la cámara de acumulación.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Posibles caminos del Radón hacia el interior de los edificios. [3].....	6
Figura 1-2 Mapa de potencial de radón en España [6]	7
Figura 2-1 Cadena de desintegración del Uranio [5]	10
Figura 2-2 Contribución de las distintas fuentes de exposición, natural y artificial, a la dosis recibida por la población [1]	11
Figura 2-3 Dibujo del perfil de un suelo donde se señalan los procesos que experimenta el gas radón y esquema del proceso de emanación del radón Rn-222 [16].....	13
Figura 2-4 Influencia de la proporción de envolvente en contacto con el terreno [12]	15
Figura 2-5 Influencia del tipo de solución constructiva de la envolvente [12].....	16
Figura 2-6 Esquema de los distintos métodos de medición del radón	16
Figura 2-7 Esquema del dispositivo experimental para la medida de la tasa de exhalación de radón mediante el uso de colectores de carbón activo [19]	17
Figura 2-8 Clasificación por municipio establecida en el Documento Básico HS Salubridad – Sección HS 6, “Protección frente a la exposición al radón” [6]	18
Figura 2-9 Sistema de barrera de protección frente al radón [3]	20
Figura 2-10 Ventilación forzada de la cámara de aire [11].....	20
Figura 2-11 Sistema de despresurización natural del terreno [12].....	21
Figura 2-12 Sistema de despresurización activa del suelo (DAS) [12]	22
Figura 2-13 Medidas de mitigación más idóneas en función de la concentración de radón y de la tipología de la vivienda [12].....	22
Figura 3-1 Emplazamiento del edificio del CUD dentro de la ENM – Fuente: Mapas de Apple	23
Figura 3-2 Localización despacho 110 y 114 en planta baja del CUD	24
Figura 3-3 Dimensiones de los despacho 110 a la izquierda y 114 a la derecha. Unidad de medida cm-PowerPoint	24
Figura 3-4 Mapa geológico de Pontevedra - A Guarda. Fuente: IGME [23]	25
Figura 3-5 Visor cartográfico IGME de la ENM [24]	25
Figura 3-6 Ejemplo de cambio en la concentración de actividad de radón en la cámara de acumulación [26]	27
Figura 3-7 RadonEye	28
Figura 3-8 Visualización de la concentración de radón en tiempo real - Software Grafana	28
Figura 3-9 Cámara de acumulación	29
Figura 3-10 Soporte para RadonEye	30
Figura 3-11 Colocación del RadonEye y soporte sobre las juntas del suelo	30
Figura 3-12 Dispositivo empleado para medir la tasa de exhalación de radón.....	31

Figura 3-13 Esquema del dispositivo experimental empleado para medir la tasa de exhalación de radón por método de acumulación.	31
Figura 3-14 Planta del despacho 114 y ubicación de los RadonEye y las cámaras de acumulación – PowerPoint.....	32
Figura 3-15 Distribución de los lotes de mediciones del despacho 114	33
Figura 3-16 Planta del despacho 110 y ubicación de los RadonEye y las cámaras de acumulación – PowerPoint.....	33
Figura 3-17 Distribución de los lotes de mediciones del despacho 110	34
Figura 3-18 Visualización de la concentración de radón de los distintos RadonEye en el tiempo - Software Grafana	35
Figura 3-19 Cálculo de tasa de exhalación absoluta y relativa de gas radón en posición C4 (punto de referencia) y K12 del suelo del despacho 114 – Software: Excel.....	36
Figura 4-1 Tasa de exhalación de radón superficial del despacho 114 en $\text{mBq/m}^2\cdot\text{s}$	37
Figura 4-2 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 10 de febrero a las 08:30	38
Figura 4-3 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 10 de febrero a las 11:45	38
Figura 4-4 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 1 de marzo a las 17:00.....	39
Figura 4-5 Tasa relativa de exhalación de radón superficial del despacho 114.....	39
Figura 4-6 Representación en gráfico 3D de tasa relativa de exhalación de radón en el despacho 114 – Excel.....	40
Figura 4-7 Representación en gráfico de contorno de la tasa relativa de exhalación de radón en el despacho 114 Excel.....	40
Figura 4-8 Tasa de exhalación de radón superficial del despacho 110 en $\text{mBq/m}^2\cdot\text{s}$	41
Figura 4-9 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 15 de febrero a las 13:30	42
Figura 4-10 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 16 de febrero a las 14:20	42
Figura 4-11 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 28 de febrero a las 08:45	42
Figura 4-12 Tasa relativa de exhalación de radón superficial del despacho 110.....	43
Figura 4-13 Representación en gráfico 3D de tasa de exhalación de radón en el despacho 110 – Microsoft Excel.....	44
Figura 4-14 Representación en gráfico de contorno de tasa de exhalación de radón en el despacho 110 – Microsoft Excel.....	44
Figura 4-15 Tasa absoluta de exhalación de gas radón en el despacho 114 ($\text{mBq/m}^2\cdot\text{s}$)	46
Figura 4-16 Tasa absoluta de exhalación de gas radón en el despacho 110 ($\text{mBq/m}^2\cdot\text{s}$)	47
Figura 4-17 Mapa de curvas de nivel de tasa absoluta de exhalación de radón del despacho 114. Mostrándose el punto de referencia mediante la estrella - Surfer.....	47
Figura 4-18 Mapa de curvas de nivel de tasa absoluta de exhalación de radón del despacho 110. Mostrándose el punto de referencia mediante la estrella - Surfer.....	48
Figura 0-1 Tasa de exhalación de radón en cámara de acumulación de 7,4 litros.....	54
Figura 0-2 Tasa de exhalación de radón en cámara de acumulación de 22 litros.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Valores de concentración de radio en materiales de construcción[18]	14
Tabla 3-1 Dimensiones de la cámara de acumulación de gas radón.....	29
Tabla 3-2 Cuadro resumen: mediciones de tasa de exhalación del suelo en cámara de acumulación....	31
Tabla 4-1 Tasa de exhalación de radón en el punto de referencia de los despachos 110 y 114 (mBq/m ² ·s) y relación existente entre ambas	45

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción del radón en el interior de edificios

El radón es una fuente de radiación ionizante de origen natural que supone un riesgo para la salud. Es la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón después del tabaco, siendo más probable que se produzca en personas que fuman o han fumado que en quienes no lo han hecho nunca. Y es la principal causa de cáncer de pulmón en no fumadores [1].

El gas radón se caracteriza por ser inapreciable para el ser humano, ya que es incoloro, inoloro e insípido. Esto supone un gran riesgo para el ser humano ya que no es consciente de la radiación a la que se está exponiendo continuamente. Este gas procede de la cadena de desintegración del uranio, presente principalmente en las rocas de la corteza terrestre. El radón, al ser un gas, presenta gran movilidad, provocando que una vez es liberado de la roca pueda alcanzar la superficie, diluyéndose con los gases atmosféricos y penetrando en el interior de las edificaciones, donde aumentará su concentración si la ventilación es insuficiente.

La concentración de uranio presente en el subsuelo es la principal fuente de radón en edificaciones. Una vez emana del terreno, penetra en el interior de los edificios a través de los materiales de cerramiento debido a grietas, juntas y a la porosidad del terreno (Figura 1-1). Otra fuente emisora de radón son algunos de los materiales de construcción, representando la segunda fuente de radón en el interior de los edificios, aunque se estima que como máximo puede llegar a representar el 20% de la concentración total de radón ya existente [2].

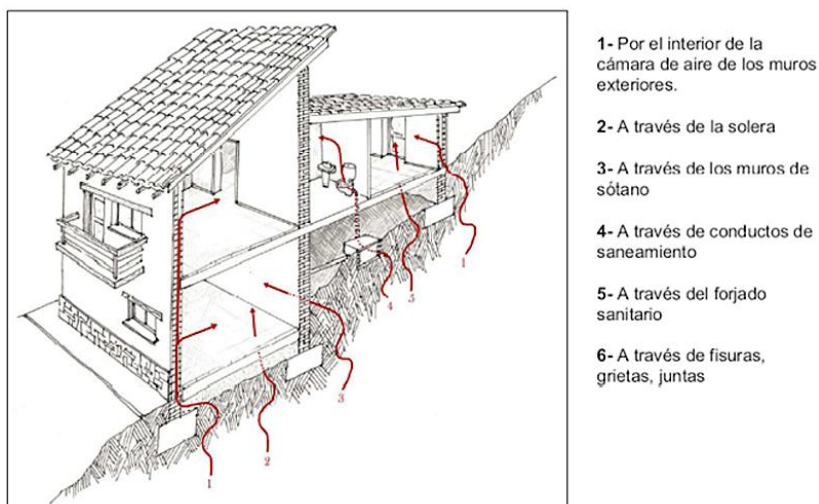


Figura 1-1 Posibles caminos del Radón hacia el interior de los edificios. [3]

Para medir la actividad radiológica del radón se empleará el Becquerel (Bq), que se define como el número de desintegraciones por segundo de átomos radioactivos. Por otro lado, la concentración de actividad en el interior de un edificio se medirá en Becquerel por metro cúbico de aire (Bq/m^3). Mientras que la tasa de exhalación en superficie será medida en Becquerel por metro cuadrado por segundo. Según el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la concentración de radón que presentan las casas españolas es de 43 Bq/m^3 [4].

Debido al riesgo que supone para la salud la exposición al radón, diversos organismos internacionales han establecido normativas y estrategias para controlar los niveles de concentración de radón a los que los seres humanos nos vemos sometidos. Aunque no se conoce el valor umbral por debajo del cual la exposición a radón no suponga ningún riesgo para la salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda no superar los 100 Bq/m^3 de media anual para edificios de nueva construcción y entre $200\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$ para los ya existentes. Sin embargo, los distintos países han definido sus propias políticas en relación con la exposición al radón. Por ejemplo, Estados Unidos ha establecido como nivel de referencia máximo promedio anual al que puede exponerse una persona en 148 Bq/m^3 , Luxemburgo en 150 Bq/m^3 , mientras que la Unión Europea (UE) en la directiva 2013/59/EURATOM del 5 de diciembre de 2013 lo estableció en 300 Bq/m^3 . Asimismo, establece que cada Estado miembro debe establecer sus propios niveles de referencia, crear un plan de acción para identificar espacios donde este se vea superado y adoptar medidas de mitigación cuando sea necesario [5]. En España para cumplir la directiva de la Unión Europea, se establece en la sección HS 6 del Código Técnico de la Edificación (CTE), 300 Bq/m^3 como nivel de referencia promedio anual de concentración de radón.

En 1991, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) puso en marcha el proyecto MARNA para determinar la cantidad de radiación gamma existente en todo el territorio español (Figura 1-2). Se concluyó que Galicia y Extremadura son las comunidades autónomas con mayores concentraciones medias de radón en viviendas.

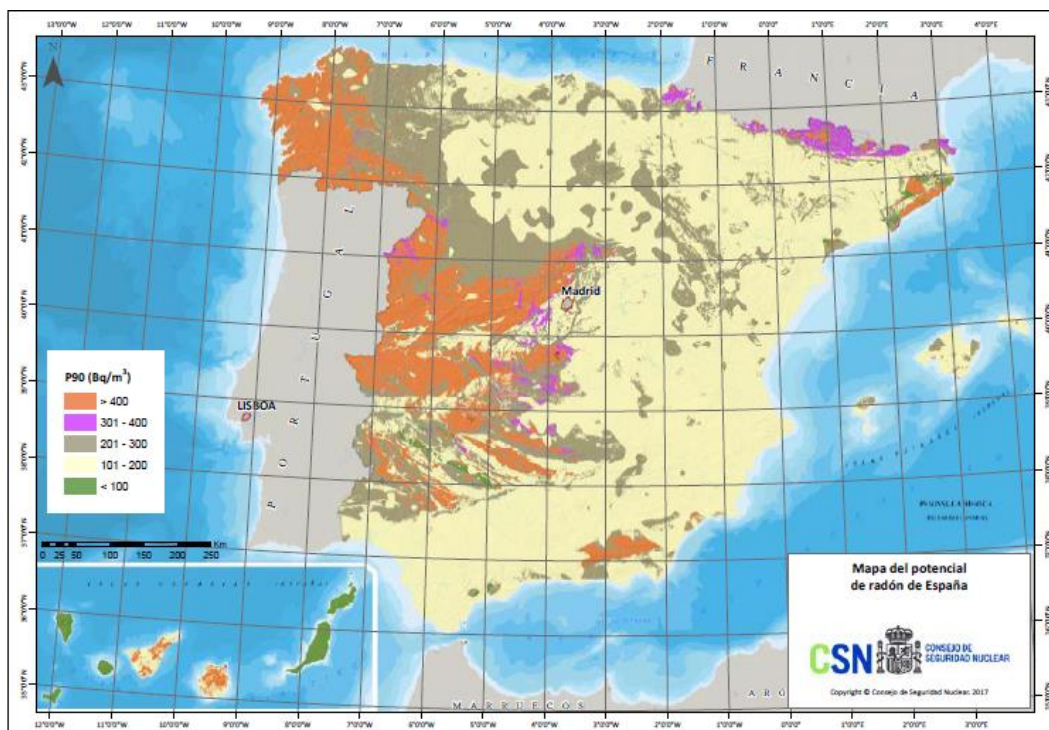


Figura 1-2 Mapa de potencial de radón en España [6]

Por esta razón en la Escuela Naval Militar (ENM), emplazada en Pontevedra, se han llevado a cabo diversos Trabajos de Fin de Grado relacionados con el gas radón. En el curso académico 2018-2019 el actual AF Muñoz Yébenes confirmó que la concentración media de radón en el cuartel Marqués de la

Victoria y los edificios emplazados en el Patio de Aulas superaban los límites estipulados por la normativa europea y nacional [7]. Profundizando en ello, el actual AN García Denia durante los meses de diciembre y enero del 2019-2020 realizó una serie de mediciones en el edificio del CUD, cuyos datos reflejaron la existencia de despachos donde la concentración de radón triplicaba los niveles de concentración de la normativa actual [8]. Así, el AN Lázaro Benavides, concluyó que el despacho 114 mostraba una concentración media muy elevada de este gas, llegando a alcanzar los 3000 Bq/m³ durante varios días [9]. Además, tras analizar el despacho 112, contiguo al anteriormente citado, se observó que, en él, la concentración media de radón cumplía la normativa nacional. Basándose en un análisis geológico de la zona se consideró que este contraste podía ser debido a la existencia de dos tipos de terreno bajo el edificio del CUD.

Los lugares de estudio del presente TFG son los despachos 114 y 110 del CUD ya que presentan concentraciones de radón muy dispares. Esta diferencia puede deberse a que la tasa de inmisión de radón a través de la superficie del suelo es también mayor en un despacho que en el otro, al presentar ambos los mismos materiales de construcción y estar influenciados por los mismos factores meteorológicos. Por ello, a lo largo del presente TFG se pretende corroborar esta hipótesis, analizando la tasa de inmisión de radón a través del suelo de cada uno de estos despachos. Con la información obtenida se quiere asimismo localizar zonas por las que la entrada de gas radón sea relativamente mayor en cada despacho; es decir, localizar posibles grietas o fisuras en el pavimento o en el subsuelo de cada despacho que estén favoreciendo la inmisión de gas radón. La finalidad de este TFG es, por tanto, contribuir a alcanzar un conocimiento más preciso del comportamiento del gas radón en los despachos de la planta baja del CUD para, finalmente, llegar a definir e implementar las medidas de mitigación óptimas.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de estudio del presente TFG será la caracterización de los principales focos de gas radón en dos de los despachos de la planta abaja del CUD. Para lograrlo se establecen los siguientes objetivos:

1. Conocer la tasa de exhalación media de cada uno de los despachos con el objetivo de comprobar que el despacho 114 tiene mayor tasa de exhalación que el despacho 110.
2. Conocer la tasa de exhalación relativa del suelo de los despachos 114 y 110 con el fin de localizar los principales focos de inmisión de cada uno de ellos.
3. Establecer una correlación entre ambos despachos que permita conocer la tasa de exhalación de radón en ambos, a partir de la medición de un único punto de cualquiera de las dos superficies del suelo.

La finalidad última de este TFG es contribuir al conocimiento del comportamiento del gas radón en el interior de los edificios, con el propósito de diseñar e implementar las medidas de mitigación más óptimas.

1.3 Metodología y planificación general

En el presente apartado se expone de forma general la estructura que se ha seguido para la realización del presente TFG, que a su vez sirve como esquema de la metodología general seguida en el mismo.

Tras una breve introducción, en el segundo capítulo se explican las principales fuentes de gas radón, el proceso de exhalación, la inmisión de este gas radioactivo en el interior de los edificios, las técnicas de medición, la normativa europea y nacional en vigor al respecto, así como diversas técnicas de mitigación y prevención.

Seguidamente, en el Capítulo 3 se describen los equipos de medida y la metodología empleada para la toma de los datos experimentales, así como los procedimientos y herramientas para su posterior análisis.

En el Capítulo 4 se presentan y discuten los principales resultados obtenidos en cada una de las fases experimentales.

Finalmente, en el Capítulo 5, se extraen una serie de conclusiones a partir de los resultados obtenidos y se proponen diferentes líneas futuras para continuar esta investigación.

Asimismo, se incluye un anexo en el que se muestran las mediciones realizadas para la elección de la cámara de acumulación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades del gas radón

2.1.1 El origen del gas radón

El radón es un gas noble radiactivo de origen natural. Se genera por la desintegración del radio (Ra-226), perteneciendo a la cadena de desintegración del uranio (Figura 2-1). El radón se encuentra en la naturaleza en forma de tres isótopos, el torón (Rn-220), el actinón (Rn-219) y radón (Rn-222); todas ellas emisoras de partículas alfa en su desintegración. El Rn-222, propiamente conocido como radón, es el isótopo natural radiactivo con mayor periodo de desintegración, de 3,824 días. Sin embargo, el torón y actinón tienen un periodo de desintegración de 55,6 segundos y 3,96 segundos respectivamente. De estos tres isótopos del radón, el Rn-222 es el que mayor significado radiológico tiene, y al que se hará referencia de ahora en adelante con el nombre de radón.

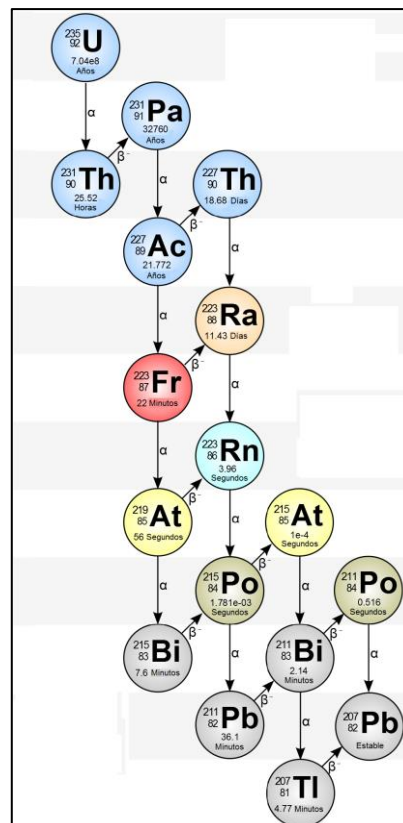


Figura 2-1 Cadena de desintegración del Uranio [10]

El gas radón es un gas noble, y como tal, es químicamente estable e inerte. Esto junto con su carácter gaseoso y su vida media hacen que pueda desplazarse a cierta distancia de su fuente de origen, ya sea por difusión, arrastre o disuelto en fluidos como aguas subterráneas.

La existencia de radón en el ambiente se debe a la existencia de uranio en rocas y suelos que forman la corteza terrestre; el uranio al desintegrarse dará lugar a Ra-226 que a su vez se desintegrará en Rn-222. Así, la concentración de gas radón variará entre unos suelos terrestres y otros. Esta variación no solo depende del tipo de roca sino también de la permeabilidad del terreno. Así pues, se ha demostrado que existe gran concentración de uranio en suelos arcillosos pero la cantidad de radón que exhalan es reducida debido a la impermeabilidad de las arcillas. Por el contrario, los suelos calcáreos contienen menor concentración de uranio, pero al ser permeables al radón y presentar numerosas grietas, la exhalación es mucho mayor. *“Como norma general, hay más radón en zonas graníticas que en zonas arcillosas o calcáreas”*[11].

El radón exhalado del interior de la corteza terrestre al alcanzar la superficie puede introducirse en el interior de espacios cerrados mezclándose con el aire que se encuentra en su interior; o expulsarse a la atmósfera dónde se difunde rápidamente. Por lo que, el radón también está presente en el aire atmosférico, aunque con una concentración del orden de 10 Bq/m³, variando de 1 a 100 Bq/m³ dependiendo de la cantidad de radón que exhale el terreno. Esta concentración también se ve condicionada por otros factores como son la presión atmosférica, la humedad, la temperatura o la velocidad del viento. Siendo la temperatura y la presión atmosférica las principales variables meteorológicas que condicionan la exhalación de radón. Por un lado, se sabe que, si aumenta la temperatura ambiental, como ocurre en los meses de verano o durante el día, ocasionará una disminución en el valor de la concentración de radón en el interior de un edificio. De forma contraria ocurre durante los meses de invierno o las noches. Por otro lado, se ha demostrado que cuando se producen descensos bruscos de presión, se produce un incremento en los niveles de radón [4].

2.1.2 Fuentes de radón

El ser humano se ve afectado por fuentes de radiación naturales y artificiales tal y como se puede observar en la Figura 2-2. Las fuentes de carácter natural son aquellas que proceden de radiaciones cósmicas, del radón, el torón, de las rocas del suelo, alimentos, agua y aire. Mientras que las fuentes de carácter artificial, proceden de radiaciones y materiales médicos, así como de diversas fuentes de vertidos y lluvias [12].

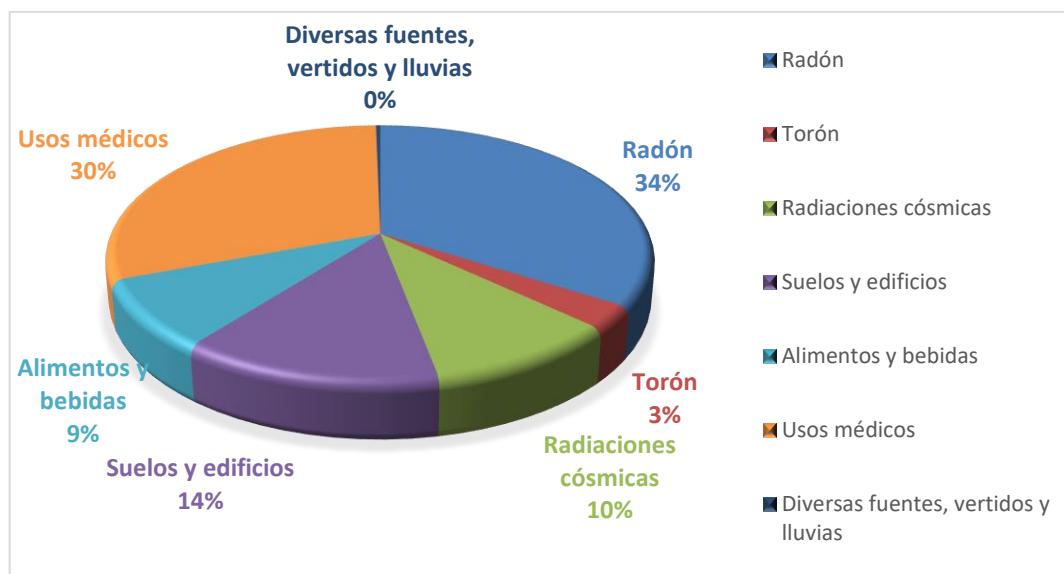


Figura 2-2 Contribución de las distintas fuentes de exposición, natural y artificial, a la dosis recibida por la población [12]

Para que la concentración de radón existente en un determinado lugar se considere alta, este debe de formarse continuamente. Por ello, es necesario saber dónde se encuentra localizado el uranio del que deriva. Este se encuentra en muchos minerales, rocas y suelos del planeta en una mayor o menor concentración. Esto hace que el terreno, los materiales de construcción, así como el agua se conviertan en las principales fuentes de radón.

Inmisión por el suelo

Las concentraciones de radón en suelos varía entre los 10000 y 50000 Bq/m³ [4]. Puede ocurrir que la concentración de radón aumente debido a la existencia de materiales de desecho procedentes de minas de uranio o fosfato por la zona. Como ya se expuso en el apartado anterior la cantidad de radón que entra en un edificio depende no solo de la concentración de Ra-226 del suelo si no de la permeabilidad y porosidad del mismo. Esta es la principal fuente de radón en edificaciones, por ello, se estudiará en este TFG.

Materiales de construcción

El contenido radioactivo que presentan los materiales de construcción depende fundamentalmente de la concentración de uranio, torio y potasio que contiene la zona de procedencia. Además, se sabe que los materiales de construcción constituyen la segunda fuente de radón en el interior de los edificios, aunque existen ocasiones en la que puede llegar a ser despreciable en comparación con la concentración de radón que aporta el terreno. La cantidad de radón que liberan los materiales de construcción no solo depende de la concentración de uranio que posean, sino también de la porosidad del material o el origen de estos materiales, ya que pueden haber sido extraídos de zonas con alto nivel de uranio. Puede ocurrir que la concentración de radio sea elevada en ladrillos y hormigón si los materiales básicos han sido extraídos de zonas cuya concentración de radiación natural es elevada. En general, los materiales de construcción aportan a la concentración media de radón en el interior de los edificios entre 10 y 20 Bq/m³ [13], siendo las arcillas, el hormigón y los ladrillos los elementos con mayor cantidad de uranio.

Agua

Al contrario de las aguas superficiales, las aguas que se extraen de fuentes subterráneas, como manantiales, pozos, presentan elevadas concentraciones de uranio, radio y torio. Al igual que ocurre en los suelos su concentración varía mucho de unos lugares a otros y puede ser considerada como una fuente importante de exposición natural a radiación. La presencia de radón en el agua puede resultar perjudicial al ser humano de dos formas diferentes, mediante la ingesta de agua con elevada concentración de radón, o debido a que el agua es conductor directo al aire [14].

2.2 Exhalación del radón

La vida media del Rn-222 es de 3,824 días, tiempo suficiente para que el radón pase desde la roca a la atmósfera a través del suelo. En los granos minerales del medio, algunos de los átomos de radón generados por la desintegración del Ra-226, logran alcanzar el espacio intersticial entre las partículas, este proceso recibe el nombre de emanación. Tras esto, los átomos de radón son transportados hasta la superficie del suelo generalmente por difusión. Y una vez han alcanzado la superficie, pueden desintegrarse o ser liberados a la atmósfera. Esta liberación se conoce como exhalación (Figura 2-3).

2.2.1 Emanación

El proceso de emanación consiste en que, en los granos minerales del medio, alguno de los átomos de radón que se han generado por la desintegración del Ra-226, logran atravesar la matriz sólida del material alcanzando el espacio intersticial entre partículas. Esto se debe sobre todo a la energía de retroceso con la que salen despedidos. Por ello la desintegración del radio debe producirse muy cerca de la superficie del suelo, del orden de 20-70nm para minerales comunes. La distancia de retroceso varía en agua, en aire y en sólido, por lo que la cantidad de átomos de radón que consiguen escapar al espacio

intersticial varía según el medio. Otros factores como el tamaño y la forma del grano, la porosidad, la permeabilidad o humedad también afectan a la emanación del radón [15].

El coeficiente de emanación ϵ , se usa para cuantificar la fracción de átomos de radón producidos por la desintegración de Ra-226, que llegan a penetrar en el espacio intersticial entre las partículas. Cuando adquiere el valor de 1, todo el radón escapa del material; pero si por el contrario tiene un valor de 0, ningún átomo de radón es capaz de escapar del material. En general, en terrenos con tamaños de grano más pequeño y húmedos el coeficiente de emanación adquiere sus valores más altos [16].

2.2.2 Transporte

Una vez los átomos de radón se encuentran en el espacio entre partículas son transportados generalmente por difusión hasta la superficie del suelo, donde se desintegran o se liberan a la atmósfera. El gradiente de concentración determina la eficacia del proceso de transporte, ya que como bien postula la primera ley de Fick de la difusión, el flujo difusivo es proporcional al gradiente de concentración. Existen otros parámetros como son el tipo de suelo, la humedad, el grado y el método de compactación que también afectan al proceso de difusión.

2.2.3 Exhalación

La exhalación es el proceso mediante el cual el radón es liberado a la atmósfera. Se emplea la tasa de exhalación E , para cuantificar esta propiedad, y se define como la concentración de radón liberada por unidad de superficie durante una unidad de tiempo. El valor de la tasa de exhalación depende de los factores que afectan tanto al coeficiente de emanación como al de transporte de radón. Asimismo, las condiciones meteorológicas influyen considerablemente en la tasa de exhalación, en especial las variaciones en la presión barométrica; aunque es la humedad el factor más determinante.

La humedad afecta tanto al coeficiente de difusión como al de emanación, por lo que la exhalación de radón va a depender en gran parte de ella. Por un lado, los átomos de radón que se escapan de la red cristalina al espacio intersticial aumentan con la humedad. Sin embargo, la tasa de difusión de estos átomos de radón a la superficie del suelo disminuirá con la humedad. Por lo tanto, si aumenta el contenido de humedad puede disminuir o incrementar la exhalación de radón. Algunos estudios han demostrado que se produce un incremento en exhalación cuando el contenido de humedad aumenta de un 0,2 a 5,7% en peso, pasado este porcentaje aumenta muy lentamente hasta que se satura, y la situación se invierte por completo, produciéndose un decrecimiento de la exhalación [17].

La presión es un factor que afecta mucho en la exhalación de radón a la atmósfera. La variación en la presión ocasiona cambios en el gradiente de presión existente entre el terreno y el exterior, por lo que el flujo convectivo se ve modificado. La presión afecta de diferente manera al espacio intersticial entre las partículas y al aire próximo a la superficie. A pesar de ello, un descenso en la presión atmosférica favorece una mayor exhalación de radón.

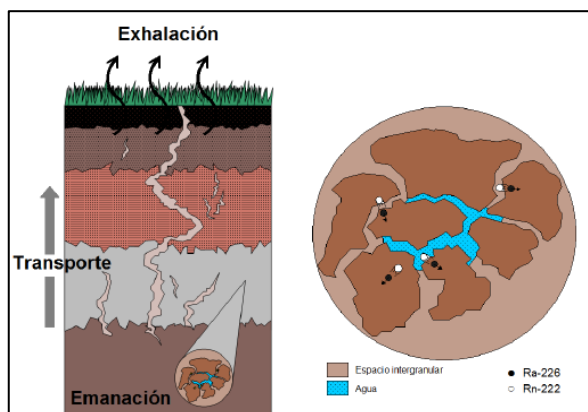


Figura 2-3 Dibujo del perfil de un suelo donde se señalan los procesos que experimenta el gas radón y esquema del proceso de emanación del radón Rn-222 [17]

2.3 Factores que afectan a la inmisión del radón en edificios

2.3.1 Factores geológicos

La composición del terreno sobre el que se asienta la edificación es el factor más importante de los distintos factores geológicos, representando al menos el 80% de la inmisión de radón al interior de los edificios [18]. El radón al proceder de la cadena de desintegración del uranio y al no presentar todos los suelos la misma cantidad, resulta necesario el estudio de las rocas que componen el terreno.

Cabe destacar el granito, como roca ígnea que mayor nivel de uranio contiene. Además, es en el Sistema Central (Sierra de Guadarrama) y en diversas partes de Galicia donde se encuentra principalmente. Por otro lado, destacar las pizarras y los esquistos, como rocas metamórficas con mayor concentración de uranio. Sus principales yacimientos se localizan en Salamanca, Badajoz o Cáceres. A su vez, las rocas calizas como rocas sedimentarias con mayor concentración de uranio [6].

2.3.2 Factores constructivos

La composición de los materiales constructivos que conforman una vivienda posee unos valores de exhalación de radón de alrededor 10 Bq/m²·h. Entre estos materiales destacan los ladrillos cerámicos, yesos y cementos por su considerado nivel de radio; aunque sus concentraciones pueden variar en base a su lugar de origen. En el estudio “*The National Radiation Protection Institute*” [19] se analizaron diferentes materiales de construcción, registrándose así diferentes valores de concentración de radón que estos materiales constructivos pueden llegar a aportar (Tabla 2-1).

Materiales de construcción	Mínimo (Bq/kg)	Máximo (Bq/kg)
Ladrillos	45,2	143
Hormigón	21,1	192
Arena	13,3	41
Arcilla	40,9	199
Cemento	36,5	88
Cenizas volantes	75,5	363
Limos	12,5	94
Yesos	12,1	86

Tabla 2-1 Valores de concentración de radio en materiales de construcción

2.3.3 Factores meteorológicos

El viento por un lado favorece el intercambio de aire entre el interior y el exterior a través de grietas, cerramientos, puertas. Por otro lado, provoca un efecto de succión sobre la fachada del edificio ocasionando una depresión en el interior del mismo. Esto provoca que la vivienda succione aire para igualar presiones. Si este aire proviene del terreno rico en radón, provocaría que la concentración de radón se viese elevada. Sin embargo, es una variable poco influyente.

La presión atmosférica es un factor que influye 100 veces más que el viento en la concentración de radón en el interior de edificios [20]. Así, un descenso brusco en la presión, favorece la exhalación de radón del terreno y por lo tanto un aumento en los niveles de concentración de radón. Por el contrario, un aumento considerable en la presión, dificulta la exhalación de radón del terreno por lo que los niveles de concentración de radón disminuirán.

Otro de los factores a destacar son las precipitaciones. Durante largos periodos de precipitaciones, la concentración de radón en el aire atmosférico disminuye debido a que la permeabilidad del suelo que se encuentra alrededor de la vivienda también lo hace. La presencia de tanta agua hace que los poros del terreno se saturen, y, en consecuencia, el terreno se hace más impermeable a la exhalación de radón. Sin embargo, el suelo bajo el edificio al permanecer seco se vuelve más permeable a la exhalación de radón hacia el interior del edificio [20].

Por otro lado, tanto el estudio del CSN [4] como la tesis del Dr. Borja Frutos Vázquez [20] concluyen que aunque no exista una correlación entre la temperatura y la concentración de radón para un determinado periodo de tiempo, se observa que existe cierta relación a nivel diario. Los niveles de radón se disparan durante la noche debido a la estabilidad atmosférica. Además, añade que la diferencia de presión que generan los cambios de temperatura entre el interior y el exterior del edificio son muy pequeños del orden de 1 Pa, por lo que su influencia en la concentración de radón es mínima.

Finalmente existen diferentes estudios que exponen conclusiones contradictorias acerca de las mareas terrestres, entendiéndose como el efecto gravitacional que tiene la Tierra, el Sol y la Luna sobre la corteza terrestre. Por un lado, algunas investigaciones han indicado que no existe ningún tipo de relación entre las mareas terrestres y oceánicas con la concentración de radón. Sin embargo, existen otros estudios que han demostrado que existe cierta correlación entre la concentración de radón y las fases de la Luna. De este modo podría decirse que no hay una conclusión clara respecto a este tema.

2.4 El gas radón en el interior de edificios.

Como se ha explicado anteriormente la inmisión de gas radón en el interior de un edificio procede en su mayoría del propio terreno, aunque también de los materiales de construcción o del agua. Por este motivo las concentraciones de radón son mayores en los sótanos o en las plantas bajas ya que son las que están en contacto con el terreno.

Existen otros factores determinantes en el nivel de concentración de gas radón en el interior de un edificio como son las características constructivas del mismo. Algunas de ellas son:

- La proporción de la superficie del edificio que está en contacto con el terreno. Cuanto mayor sea, mayor será la posibilidad de que el radón entre en el interior del edificio (Figura 2-4).

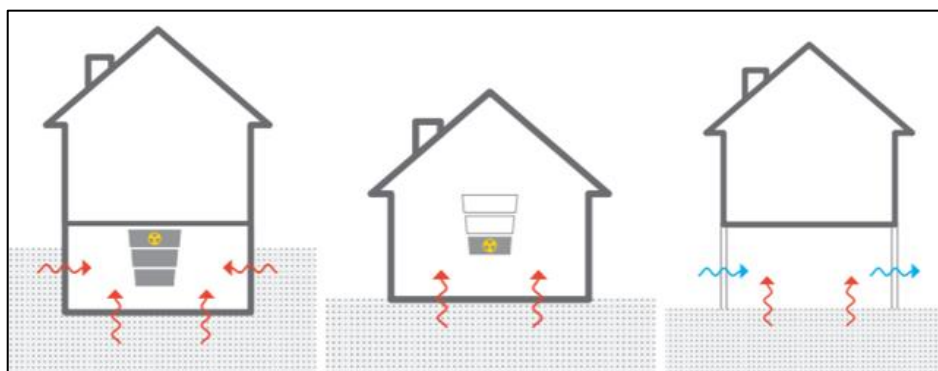


Figura 2-4 Influencia de la proporción de envoltorio en contacto con el terreno [13]

- La permeabilidad a los gases de la envoltorio. Cuanto mayor sea la permeabilidad del cerramiento, ya sea por estar deteriorado, por fisuras, o grietas mayor posibilidad habrá de que el radón penetre en el interior del edificio.
- Solución constructiva de la envoltorio, si por ejemplo se ha instalado una barrera anti-radón o una cámara de aire ventilada. Esto dificulta la entrada de radón en el interior (Figura 2-5).

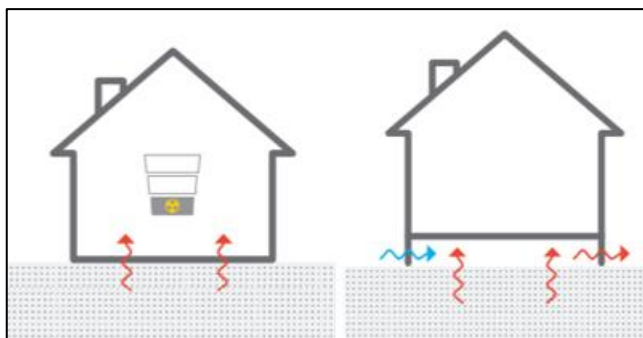


Figura 2-5 Influencia del tipo de solución constructiva de la envolvente [13]

- La existencia de elementos que atraviesen la envolvente, como bajantes que atraviesen la solera. Esto provoca que existan puntos por donde el radón se introduzca fácilmente.
- La comunicación entre los sótanos y las plantas habitables puede ocasionar que se desplace desde las zonas por donde penetra hasta las zonas habitables.
- El sistema de ventilación, es beneficioso si contribuye a que la concentración en el interior del edificio baje, y resulta perjudicial si, por el contrario, se produce una depresión en el interior del edificio facilitando la entrada del gas.

2.5 Técnicas para medir la exhalación de radón del terreno

Las mediciones se pueden realizar mediante una u otra técnica según el objetivo de la medición. Así, las mediciones a corto plazo serán empleadas para identificar de forma rápida por donde la exhalación de radón es elevada; las mediciones de seguimiento se usarán para confirmar y caracterizar las altas concentraciones de este gas; las de diagnóstico, se usarán para establecer medidas correctoras ante una elevada concentración de radón; y las mediciones pre y post-mitigación para determinar la eficacia de las soluciones empleadas.

A diferencia de las mediciones a corto plazo, las de largo plazo permiten obtener información del promedio anual de concentración de radón. Para ello, se usan detectores que empleen un método de medición integrada como son las trazas, carbón activo y los electretes, o medición en continuo generalmente mediante cámaras de acumulación (Figura 2-6). Este último, además de proporcionar el promedio anual también permite ver como varía la concentración a lo largo del tiempo, pudiendo así percibir cualquier alteración que se produzca.

Además, los métodos de medición también se pueden clasificar en métodos pasivos, los cuales necesitan tras la exposición un análisis; y métodos activos, los cuales permiten una lectura directa de los niveles de radón. Como norma general los detectores de medición en continuo suelen trabajar en activo y suelen ser más precisos. Mientras que los métodos de medición integrada suelen ser de tipo pasivo.



Figura 2-6 Esquema de los distintos métodos de medición del radón

2.5.1 Medición integrada

Permiten obtener información sobre las concentraciones promedio existentes en un área determinada, durante un periodo de tiempo que puede ser de días, semanas o meses. Son empleados especialmente para estudios de inspección y reconocimiento. Además, por lo general, son métodos de tipo pasivo. Entre ellos destacan los tres que se explican a continuación.

Colectores con carbón activo

Método pasivo empleado para medir la tasa de exhalación del suelo durante un determinado periodo de tiempo. Este método se basa en la capacidad que tiene el carbón activo para retener el radón. El carbón activo que está directamente en contacto con el terreno absorbe el radón que este exhala y mediante espectrometría gamma se analiza la muestra (Ver Figura 2-7). Para determinar la concentración de radón se mide la radiación gamma de los isótopos Pb-214 y Bi-214, descendientes de vida corta del Rn-222 emitidas por el carbón activo.

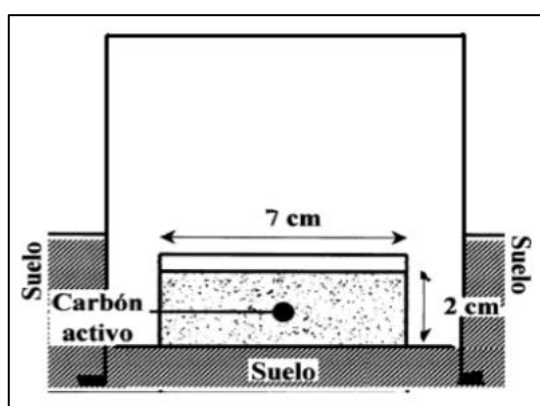


Figura 2-7 Esquema del dispositivo experimental para la medida de la tasa de exhalación de radón mediante el uso de colectores de carbón activo [21]

Detectores de trazas

Los detectores de trazas se usan para medir la tasa media de concentración de radón durante un periodo largo de tiempo. Además, suele emplearse una vez se ha determinado la presencia de altas concentraciones de radón mediante otras técnicas más rápidas. Una de las principales ventajas de los detectores de trazas es su fiabilidad. El detector suele ser de carbonato de alil diglicol (CR-39), un polímero muy sensible a las radiaciones α , por lo que no sólo detectaría la presencia de radón sino de todos los átomos que al desintegrarse produzcan radiaciones de este tipo. Los detectores son materiales sólidos que al ser atravesados por partículas α causan ionizaciones dejando una marca. Posteriormente estas marcas pueden ser observadas tras un procedimiento de grabado con una solución alcalina.

Electretes

Es un método pasivo empleado para medir la concentración de radón promedio durante el periodo de tiempo de exposición. El electrete es un disco de teflón cargado positivamente, y a medida que el radón y sus descendientes se van descomponiendo liberan partículas α , que al ionizarse y cargarse negativamente son atraídos a la superficie del electrete, cargada positivamente. Al entrar en contacto se produce una reducción del voltaje. La descarga de potencial permite conocer la concentración de radón que existe en el ambiente en un periodo de tiempo determinado.

2.5.2 Medición en continuo

Método activo, mediante el cual se hace pasar un flujo de aire continuamente por el detector, así permite evaluar constantemente la concentración de radón del edificio. Son mecanismos que proporcionan mucha información además de ser necesarios para conocer cualquier tipo de alteración que

se produzca a tiempo real. Normalmente la cámara de acumulación es la técnica más empleada para la medición en continuo de gas radón. Este método será explicado en más detalle en el punto 3, al ser el empleado en las mediciones experimentales del presente trabajo.

2.6 Marco normativo europeo y español

2.6.1 Normativa vigente

Debido al riesgo que ocasiona el radón al ser humano, muchos países han establecido niveles de concentración de referencia, por encima de los cuales se recomienda o se obliga una modificación de dichos niveles. La última normativa europea en vigor es la Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013, que establece en su artículo 54, bajo el epígrafe “*Radón en los lugares de trabajo*”, que “*Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados en los lugares de trabajo. El nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superará los 300 Bq/m³, a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional*” [5].

En el marco normativo español, para cumplir con las obligaciones recogidas en la Directiva 2013/59/EURATOM, se ha creado una nueva sección dentro del Código Técnico de la Edificación (CTE), la sección HS6, *Protección frente a la exposición del radón*. En ella se establece que “*para limitar el riesgo de exposición de los usuarios a concentraciones inadecuadas de radón procedente del terreno en el interior de los locales habitables, se establece un nivel de referencia para el promedio anual de concentración de radón en el interior de los mismos de 300 Bq/m³*”[22]. Así mismo, en el Apéndice B del CTE, se clasifican los municipios en zonas I y II en función del potencial al radón (Ver Figura 2-8):

Zona I: si menos del 5% urbanizado de ese municipio se encuentra en un área cuyo potencial al radón sea superior a 300 Bq/m³; o si más del 5% urbanizado de ese municipio se encuentra en un área cuyo potencial al radón esté entre los 200-400 Bq/m³.

Zona II: más del 5% urbanizado de ese municipio se encuentra en un área donde el potencial al radón sea superior a 300Bq/m³.

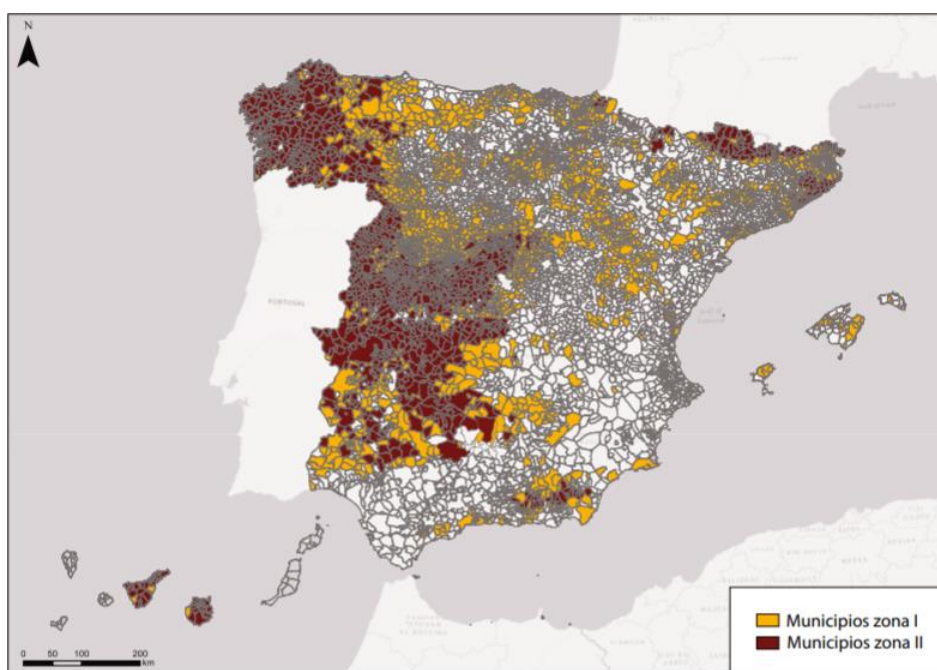


Figura 2-8 Clasificación por municipio establecida en el Documento Básico HS Salubridad – Sección HS 6, “Protección frente a la exposición al radón” [6]

2.6.2 Norma UNE-EN ISO 11665-7

Para conocer la tasa de exhalación de radón en superficie en España se emplea la Norma EN ISO 11665-7:2015 *Método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie* [23] adoptada de la Norma ISO 11665-7:2012 del Comité Técnico ISO/TC 85 *Energía nuclear, tecnologías nucleares y protección radiológica*, de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Esta es la norma de referencia que se ha empleado a lo largo de este trabajo para estimar la tasa de exhalación de radón.

Esta norma se refiere únicamente al Rn-222 ya que su impacto radiológico es más representativo que el isótopo 220 o el 219. Aunque este método es únicamente estimativo, debido a que ciertos parámetros como son las condiciones meteorológicas resultan difíciles de cuantificar, puede aplicarse en investigaciones, en búsqueda de fuentes o en estudios comparativos de tasas de exhalación de radón en una superficie.

Con tasa de exhalación en superficie, nos referimos a la cantidad de radón (Rn-222) que migra desde la roca donde se ha producido hasta el aire por unidad de tiempo y unidad de superficie. En suelos con uranio pueden llegar a observarse tasas de exhalación en superficie de alrededor 50000 mBq/m²·s; muy por encima de la tasa media de exhalación en superficie a lo largo del globo de 20 mBq/m²·s estimada por el comité científico de las Naciones Unidas [22].

En la presente norma, para estimar la tasa de exhalación de radón de una superficie se emplea un método de medición en continuo mediante circulación o difusión. Aunque en ambos casos, será necesaria una cámara de acumulación y un instrumento que muestree continuamente el aire de la cámara de acumulación y mida las radiaciones emitidas por el radón y sus productos de desintegración. Además, destacar que en el método de medición en continuo mediante difusión el radón aprovecha el gradiente de presión generado entre los gases existentes en el terreno y el aire del interior del edificio para introducirse en su interior.

2.7 Medidas de mitigación o prevención

Como se ha citado anteriormente en el apéndice B del CTE, se clasifican los municipios en zona I o zona II en función del potencial de radón. Así, en zona I a los edificios de nueva construcción se les obliga a que tengan una barrera de protección que limite el paso del radón procedente del terreno o una cámara de aire ventilada. Por otro lado, en zona II los edificios de nueva construcción deberán tener una barrera de protección frente al radón y, o una cámara de aire ventilada (natural o forzada) o un sistema de despresurización del terreno [24].

Otras soluciones para edificios ya existentes alternativas o complementarias a las anteriormente citadas, son el sellado de los cerramientos y una mejor ventilación.

El uso de una u otra técnica vendrá determinado entre otros, por la concentración de radón existente, por la composición y compactación del terreno, si la vivienda es de nueva construcción o no, y de qué materiales está hecho. En los siguientes apartados se explican brevemente algunas de estas técnicas de prevención y de mitigación.

2.7.1 Técnicas de prevención

Barrera anti-radón

Medida pasiva que consiste en interponer una membrana continua e impermeable al radón entre el terreno que está en contacto con el edificio y el propio edificio, de tal manera que el radón existente en el terreno no penetre en el interior del edificio (Ver Figura 2-9). La membrana puede colocarse tanto en la cara exterior que está en contacto con el suelo como en la interior. Además, se ha demostrado que la colocación de esta membrana es mucho más eficaz en climas templados, donde las diferencias de presión provocadas por la temperatura son pequeñas. Por otro lado, resaltar la importancia del proceso de colocación de la misma, ya que si se produce cualquier perforación podría ocasionarnos un efecto

totalmente contrario al deseado, captando radón del terreno y filtrándolo al interior del edificio a través de la grieta.

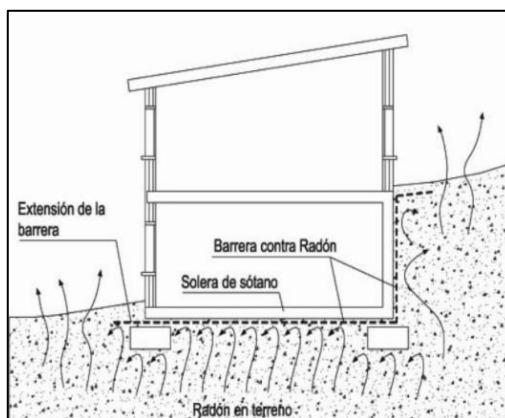


Figura 2-9 Sistema de barrera de protección frente al radón [3]

Cámara de aire ventilada o ventilación de la cámara de aire en forjados sanitarios

Es un espacio bajo el edificio que permite que la solera de hormigón no apoye directamente sobre el terreno, sino que lo haga sobre los muretes de apoyo. Así, la cámara de aire actúa como espacio de captación de radón del terreno y con la ayuda de un sistema de ventilación forzada consigue la entrada de aire limpio desde los muretes de apoyo expulsando el aire con altas concentraciones de radón por los muretes de apoyo opuestos. Es una técnica útil cuando la despresurización activa no es viable (Ver Figura 2-10).

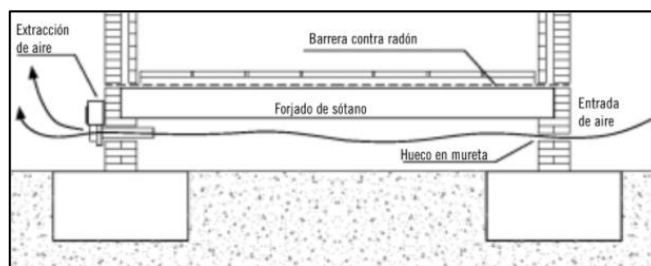


Figura 2-10 Ventilación forzada de la cámara de aire [3]

Sellado de grietas y fisuras

Esta medida suele ir acompañada de otros métodos de mitigación. El sellado de grietas y juntas, así como los cerramientos de espacios localizados entre el terreno y el edificio, suele realizarse con silicona acrílica provocando que actúe como una barrera frente a la entrada de radón. Se ha demostrado que el sellado por sí solo únicamente es eficaz en 1 de cada 1500 casos, por lo que no es recomendable su uso como estrategia exclusiva [24].

Ventilación

Puede realizarse de manera activa, mediante sistema de ventilación mecánica, o pasiva, abriendo ventanas y aberturas de ventilación. Consiste en la renovación del aire del interior de un edificio. Esta medida presenta un buen rendimiento para zonas donde la concentración es baja, los materiales de construcción constituyen una fuente de radón importante o existen problemas con la calidad del aire interior. Sin embargo, tras varios estudios, se ha llegado a la conclusión de que para que fuese efectivo sería necesario alcanzar una tasa de ventilación de entre 2 y 5 renovaciones por hora, algo que únicamente se conseguiría mediante la instalación de un sistema de ventilación forzada [3].

Por otro lado, puede llegar a ser contraproducente si no llega a entrar suficiente aire limpio, ya que se crearía una depresión en el interior del edificio ocasionando la entrada de radón del terreno y

aumentando los niveles de concentración en el interior. Por ello es imprescindible controlar la relación entre el flujo de extracción y el de inmisión.

Sistema de despresurización natural del terreno

Método mediante el cual se extrae de manera natural o forzada aire desde el área donde se asienta el edificio. De esta manera se crea una vía de escape para el radón y se reduce el flujo de radón que puede filtrarse al interior del edificio. A través de un conducto de evacuación conectado a un punto de captación, situado bajo el edificio, se extrae radón al exterior (Ver Figura 2-11). Esto funciona debido a la diferencia de presiones, pero si las concentraciones llegaran a ser excesivas y no fuera suficiente la extracción de manera natural, se podría conectar un extractor mecánico.

Si queremos realizar una extracción de manera natural, es necesario tener en cuenta la permeabilidad del suelo, ya que cuanto mayor sea ésta mejor será su funcionamiento, al favorecer el desplazamiento del radón entre los poros del terreno hasta llegar al punto de captación.

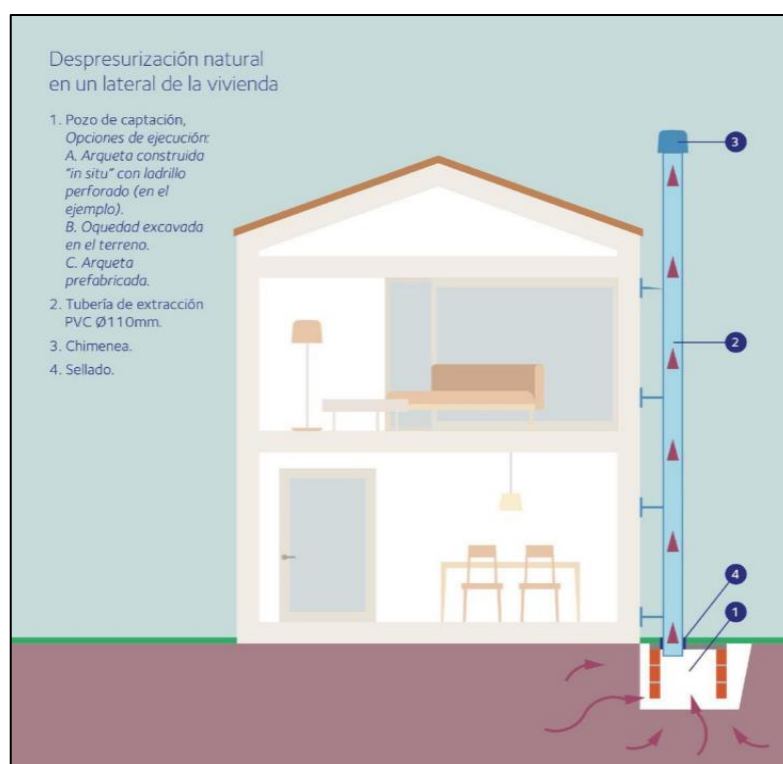


Figura 2-11 Sistema de despresurización natural del terreno [25]

2.7.2 Técnicas de mitigación

En viviendas ya construidas o en fase de construcción además de buscar la reducción de radón del interior del edificio, se debe tener en cuenta que la intervención que se realice debe causar la mínima molestia a sus ocupantes. Por ello en viviendas ya construidas la técnica más empleada es la despresurización activa del suelo (DAS) (Ver Figura 2-12). Su funcionamiento es muy similar a los sistemas de extracción natural con la peculiaridad de que lleva incorporado un extractor para forzar la evacuación de gases, consiguiendo así una succión más constante y mayor en el punto de captación de aire. Dependiendo de la permeabilidad del terreno, de la concentración de radón en él, y el número de puntos de captación se empleará un extractor con una mayor o menor potencia. Así, en terrenos donde la permeabilidad sea baja, la superficie a cubrir sea grande o existan varios puntos de captación será necesario la instalación de un extractor con una gran potencia. Sus principales limitaciones en edificios ya existentes aparecen cuando el material situado bajo el edificio presente permeabilidad limitada y esto ocasiona que sea necesario instalar un sumidero o pozo de aspiración o redimensionar el ventilador DAS.

También puede ocurrir que sea complicado sellar el espacio entre el suelo y el edificio; o que sea complicado encontrar un buen recorrido para los conductos de ventilación.

Otra técnica de actuación en viviendas ya construidas es la colocación de una barrera anti-radón por el interior del edificio. Está técnica no es recomendable para concentraciones altas, aunque para concentraciones medias y bajas de radón es la idónea ya que es una técnica correctora de larga vida útil y sin la necesidad de ningún tipo de mantenimiento.

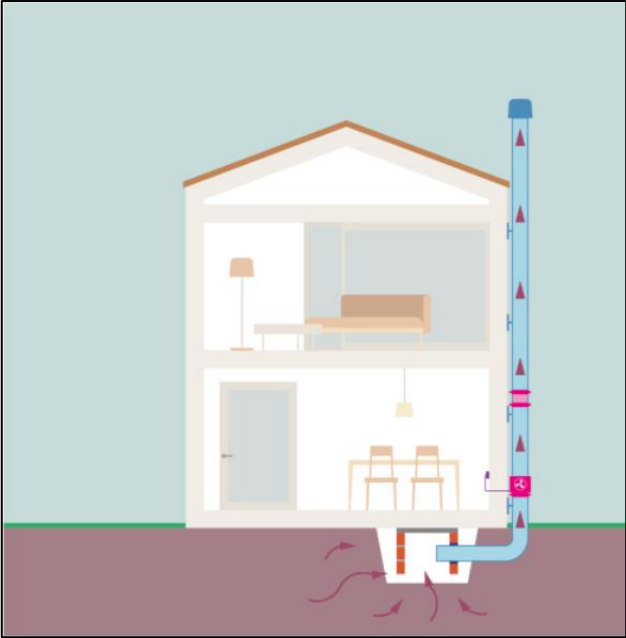


Figura 2-12 Sistema de despresurización activa del suelo (DAS) [25]

En la Figura 2-13 se muestran las soluciones más recomendables según el tipo de vivienda, los niveles de concentración de radón y la viabilidad en viviendas ya existentes. Aunque como ya se expuso anteriormente la aplicación de cualquier medida de mitigación requiere de un estudio diagnóstico previo que permita determinar la medida correctora más idónea.

TIPOLOGÍA DE VIVIENDAS			NIVEL CONCENTRACIÓN RADÓN (Bq/m3)	
			MEDIO (300 < x < 600)	ALTO (> 600)
ESPACIO HABITABLE	SOLERA		Ventilación interior	Presurización positiva en interior de vivienda
	FORJADO SANITARIO		Ventilación C.A. de forjado sanitario ó Ventilación interior	Despresurización activa
ESPACIO NO HABITABLE	SOLERA		Sellado + Barrera anti-radón	Barrera anti-radón + Despresurización activa
	FORJADO SANITARIO		Sellado + Ventilación C.A. de forjado sanitario	Barrera anti-radón + Ventilación forzada C.A. de forjado sanitario

Figura 2-13 Medidas de mitigación más idóneas en función de la concentración de radón y de la tipología de la vivienda [26]

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del lugar de estudio

3.1.1 Ubicación y descripción del CUD

El objeto de estudio del presente TFG es dos de los despachos de profesores del Centro Universitario de la Defensa (CUD), más concretamente el despacho 110 y 114. El edificio que los alberga se sitúa al sureste de la Escuela Naval Militar (Ver Figura 3-1), y fue construido entre los años 1939 y 1943 siendo reformado entre abril de 2009 y marzo de 2010.



Figura 3-1 Emplazamiento del edificio del CUD dentro de la ENM – Fuente: Mapas de Apple

Actualmente el edificio consta de dos plantas. En la planta baja, se ubican varios seminarios en donde los profesores imparten clases, así como algunos de los despachos de profesores y la sala de grados. Mientras que, en la planta superior, se ubican el resto de despachos de profesores, la secretaría del CUD, la sala de reuniones, la sala de juntas y la secretaria económica.

Es un espacio muy frecuentado tanto por alumnos de la Escuela Naval Militar, como profesores o personal de servicios administrativos. Por ello, es conveniente conocer la exposición al gas radón a la que el personal tanto civil como militar se enfrenta diariamente, ya que altas concentraciones de este gas constituyen un riesgo para la salud.

3.1.2 Descripción de los despachos 110 y 114

Tanto el despacho 110 como el 114 se encuentran en la planta baja del Centro Universitario de la Defensa. Limítrofe por la cara Este del despacho 114 se encuentra el despacho 112, por su cara Oeste, el salón de grados, por la cara norte y sur, al igual que el despacho 110, limita con el pasillo interior del edificio del CUD y el patio de aulas respectivamente. A su vez, el despacho 110 limita por su cara Este con el despacho 108 y por el Oeste con el despacho 112 (Figura 3-2).

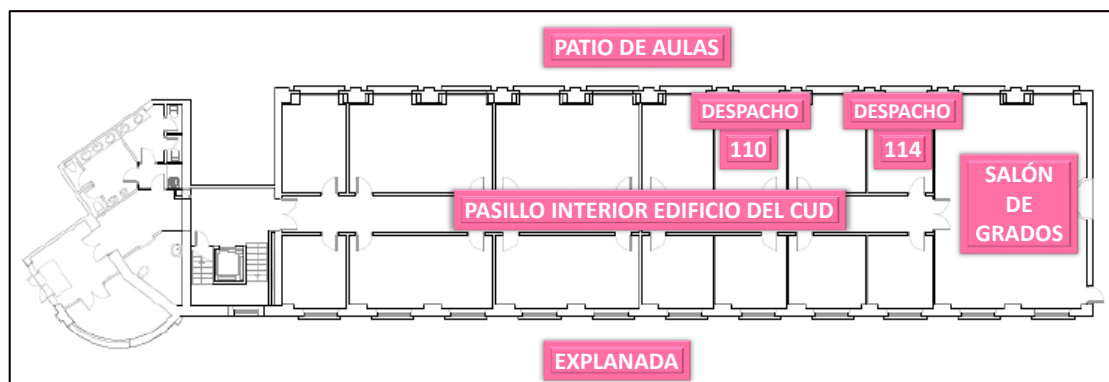


Figura 3-2 Localización despacho 110 y 114 en planta baja del CUD

Ambos despachos cuentan con una ventana orientada hacia el Patio de Aulas y una puerta de acceso de madera. A partir del *Proyecto de Remodelación del CUD*, se extrae que las paredes interiores de ambos despachos están formadas por perfiles de acero galvanizado y un relleno de fibras minerales y recubiertas de dos hojas de panel de yeso cartón a ambos lados. Por otro lado, la pared que está en contacto con el Patio de Aulas está compuesta por ladrillo hueco recubierta con una capa de yeso. Y el suelo es de mármol, presentando el despacho 110 una longitud en planta de 509 cm y un ancho de 378,5 cm. Mientras que el despacho 114 tiene una longitud en planta de 509 cm de largo y 353 cm de ancho (Figura 3-3).

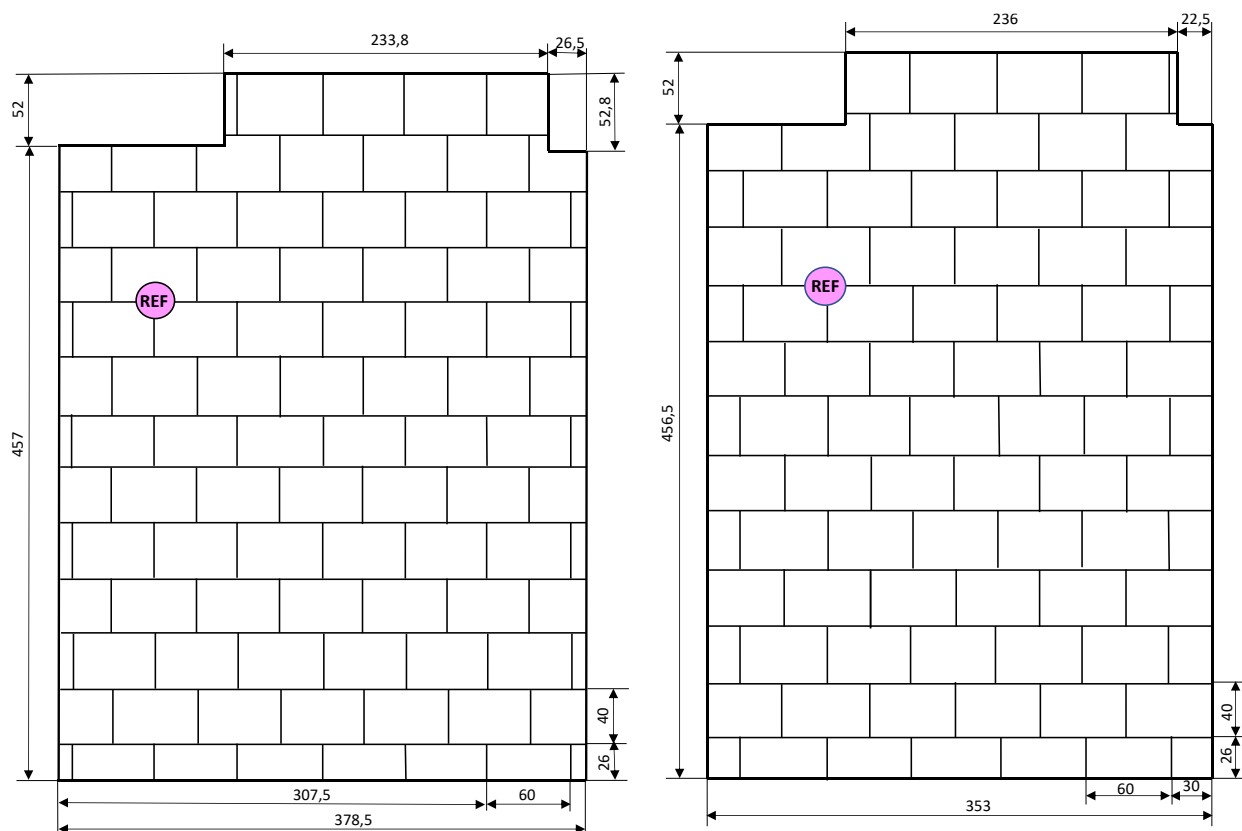


Figura 3-3 Dimensiones de los despachos 110 a la izquierda y 114 a la derecha. Unidad de medida cm

Para conocer la composición del subsuelo del CUD, y en especial de los despachos 110 y 114, se ha empleado el mapa geológico del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). A partir de la Figura 3-4, se puede observar que en la zona de estudio predomina el granito dos micas, aunque también existe una pequeña zona con suelo indiferenciado. Por lo tanto, el granito al ser elemento principal que compone el subsuelo de la ENM favorece la presencia de radón ya que es la roca ígnea que mayor concentración de uranio contiene.

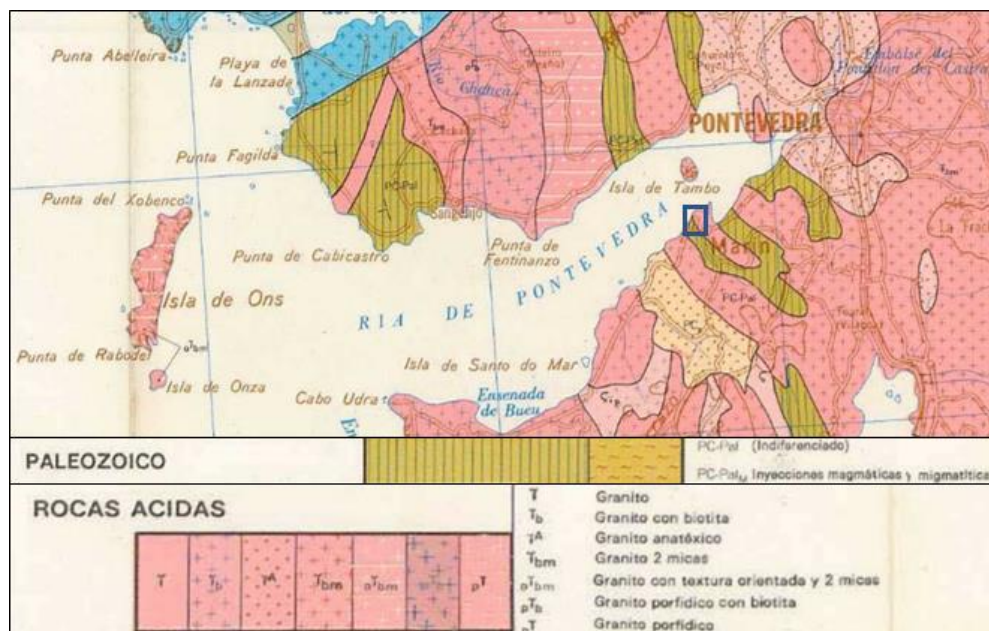


Figura 3-4 Mapa geológico de Pontevedra - A Guarda. Fuente: IGME [27]

A fin de analizar en mayor profundidad la composición del subsuelo de la ENM, se adjunta mapa (Ver Figura 3-5) del visor cartográfico del IGME. En donde se puede observar que la composición del subsuelo es predominantemente granítica, al igual que en la Figura 3-4. Además, existe una diferencia de terrenos en zonas próximas al CUD, más concretamente cerca del despacho 114, aunque no se puede distinguir en qué zona es exactamente. La zona coloreada en rosa corresponde a rocas graníticas mientras que la zona de color grisáceo son acumulaciones de grava, arcillas y limos. Esto podría ser el motivo que justificase la existencia de valores de concentraciones de radón tan diferenciados entre los despachos 112 y 114 del CUD, como se demostró en el estudio realizado por el ahora AN Lázaro Benavides [9].

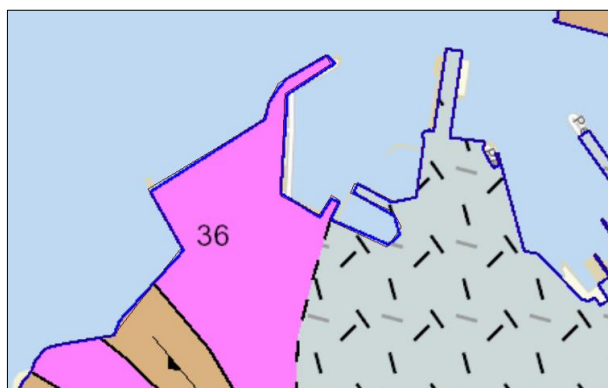


Figura 3-5 Visor cartográfico IGME de la ENM [28]

A día de hoy el despacho 114 se emplea como almacén, debido a que la concentración media de radón en el mismo excede el valor máximo permitido tanto por la normativa europea como nacional, que establece un máximo de 300 Bq/m³. El estudio realizado por el ahora AN García Denia, así lo demuestra [8]. Sin embargo, el despacho 110 se emplea como tal, al no existir ningún indicio de que la

concentración media de radón esté por encima de la máxima establecida. Es por ello que para comprender mejor los mecanismos de entrada de radón en la planta baja del CUD, se procede a estudiar la tasa relativa de inmisión de radón a través del suelo de ambos despachos.

En ambos despachos, se han empleado distintos medidores para determinar la concentración de gas radón que exhala el suelo. En los apartados siguientes se expone cuál ha sido el mecanismo empleado para llevarse a cabo.

3.2 Procedimiento experimental

Como ya se expuso en el apartado 2.5, existen diferentes técnicas para medir la exhalación de radón del suelo. En el presente trabajo se ha empleado el método de acumulación para conocer la tasa de exhalación del suelo de los despachos 110 y 144.

3.2.1 Normativa adoptada para la toma de datos

El método empleado se basa en la norma UNE-EN ISO 11665-7: *Método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie* [23]. Para determinar esta tasa de exhalación puede utilizarse el método de medición en continuo mediante circulación de aire o por difusión, o el método de medición puntual. Ambos parten de las siguientes premisas: la acumulación de radón se llevará a cabo en una cámara libre de radón en contacto con la superficie de estudio durante el tiempo que dure la medición; se muestreará un volumen de aire representativo del aire existente en la cámara de acumulación; se medirá la concentración de actividad de radón en dicha muestra y finalmente se calculará la tasa de exhalación del suelo.

En el presente trabajo el método empleado es la medición en continuo por difusión. Se debe, en primer lugar, a que CUD disponía ya de varios RadonEye, medidores de concentración de actividad de radón, por lo que no era necesario realizar ningún gasto extra. En segundo lugar, el periodo de medición es de 1 a 3 horas, por tanto, podrán realizarse varias mediciones a lo largo del día, y así en un periodo de dos meses conocer de forma exhaustiva la tasa de exhalación del suelo de ambos despachos. En tercer lugar, al ser un método de medición en continuo no solo es más preciso, sino que además permite una lectura directa de los niveles de radón sin la necesidad de un análisis posterior.

Una vez seleccionado el método de medición es necesario escoger la cámara de acumulación. En la norma en la que se basa este TFG, se especifica que el recipiente empleado debe permitir la acumulación de gas radón en su interior, por ello no debe permitir que el gas se difunda hacia el exterior durante el periodo de medición. Por consiguiente, debe ser impermeable al radón. Asimismo, en caso de estar expuesto a luz solar ni el color ni el material deben de provocar un aumento en la temperatura del aire acumulado en su interior. Además, el volumen efectivo de la cámara de acumulación debe ser de al menos diez veces más que el volumen de aire que el medidor de radón muestree en dicho recipiente. Además, las medidas de este recipiente deben de ser conocidas. Al no especificar el tamaño de la cámara de acumulación, se seleccionaron varios cubos de 7,4 litro y 22 litros de capacidad. Tras la realización de una serie de mediciones con ambos recipientes, en posiciones muy próximas y durante el mismo periodo de tiempo, se concluyó que la tasa de exhalación de radón del suelo no variaba apenas entre una u otra cámara de acumulación. Por lo que se seleccionó el cubo con menor capacidad, dado que, cuanto mayor sea el volumen de la cámara más tiempo necesitará de acumulación y por consiguiente serán necesarios periodos de medición más extensos (Ver Anexo I:).

En la cámara de acumulación la concentración de radón aumenta con el tiempo en función de la tasa de exhalación de la superficie de estudio, el volumen del contenedor u otros factores como las fugas. Debido a que la concentración de actividad de radón al comienzo del proceso de acumulación es próxima a cero, y las pérdidas por fugas pueden considerarse despreciables, la concentración de radón en la cámara de acumulación puede aproximarse a un crecimiento lineal. Pasados alrededor de 80 minutos, existe un momento en el que la concentración de radón presente en la cámara se satura y los valores empiezan a permanecer constantes; tal y como se observa en la Figura 3-6.

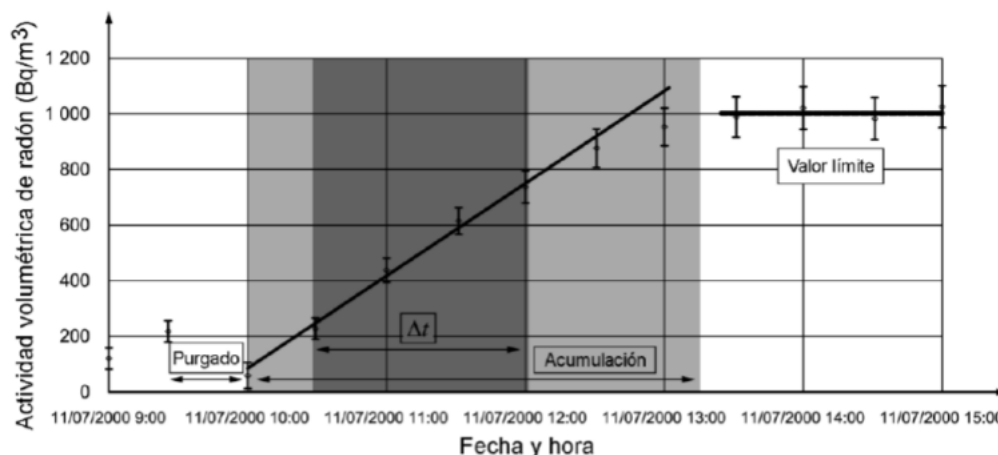


Figura 3-6 Ejemplo de cambio en la concentración de actividad de radón en la cámara de acumulación [23]

Según estipula la norma UNE-EN ISO 11665-7 a partir de la pendiente de la recta obtenida en el tramo de acumulación, la superficie de la cámara de acumulación en contacto con el suelo y el volumen efectivo del recipiente, se calcula la tasa de exhalación en superficie. Tal y como se muestra en la siguiente Ecuación 1.

$$\Phi = \frac{pte * V}{S}$$

Ecuación 1 Tasa de exhalación en superficie (Bq/m²·s) [23]

Donde:

- Ø: tasa de exhalación de gas radón en un punto de la superficie de estudio. Medido en Bq/m²·s.
- Pte: pendiente de la recta obtenida en la fase de acumulación. Medido en Bq/m³·s.
- V: volumen efectivo de la cámara de acumulación. Medido en m³.
- S: superficie efectiva de la cámara de acumulación. Medido en m².

3.2.2 Materiales y equipos empleados para las mediciones

Durante este apartado se realizará una descripción de los materiales y equipos empleados en la toma de medidas del presente trabajo.

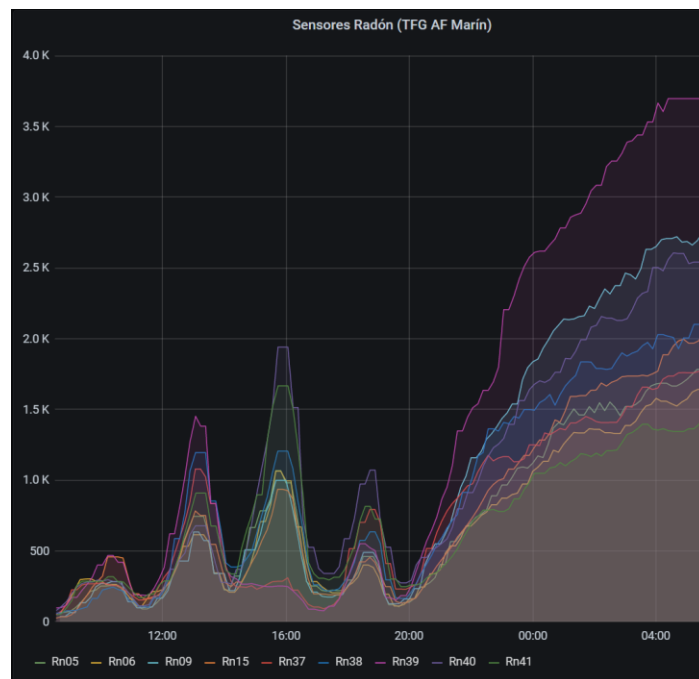
RadonEyeRD200

El *RadonEyeRD200* ha sido empleado para conocer la concentración de radón que exhala el suelo (Ver Figura 3-7). Ha sido fabricado por la empresa surcoreana RadonEye. Es un equipo que por su reducido tamaño puede ubicarse en casi cualquier sitio, siendo su principal inconveniente la necesidad de tener que estar conectado a una toma de corriente. Mide de forma continua la concentración de radón, pero únicamente registra los datos cada 10 minutos. Además, estos datos quedan registrados en Bq/m³ o pCi/L (Picocuries por litro de agua).

Este equipo es capaz de detectar hasta un máximo de 3696 Bq/m³ con una tasa de precisión del 10%. Se han empleado a lo largo de las distintas fases del presente trabajo nueve de estos dispositivos, numerados con las pegatinas: 05,06,09,15,37,38,39,40 y 41. Este equipo fue empleado en años anteriores en el TFG del AN Muñoz Yébenes [7], el AN García Denia [8] y el AN Lázaro Benavides[9].

**Figura 3-7 RadonEye**

Para facilitar la toma y posterior análisis de los datos, se utiliza un sistema de monitorización desarrollado por profesores del CUD en el marco de un proyecto de investigación que permite visualizar a tiempo real la concentración de radón registrada por todos los medidores RadonEye en uso. Este sistema utiliza el software Grafana para su visualización. Además, permite la descarga de los datos registrados para su interpretación y análisis posterior (Ver Figura 3-8).

**Figura 3-8 Visualización de la concentración de radón en tiempo real - Software Grafana**

Cámara de acumulación

La cámara de acumulación empleada es un cubo de polipropileno (Ver Figura 3-9) cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 3-1. Se ha empleado el diámetro medio para su cálculo para el cálculo del volumen y área efectivas.



Figura 3-9 Cámara de acumulación

Cámara de acumulación	Dimensiones
Diámetro superior (cm)	24,9
Diámetro inferior (cm)	23,2
Diámetro medio (cm)	24,05
Altura (cm)	16,6
Volumen efectivo (cm ³)	7540,98
Volumen efectivo (m ³)	0,00754
Área (cm ²)	454,28
Área (m ²)	0,045

Tabla 3-1 Dimensiones de la cámara de acumulación de gas radón

Como se mencionó anteriormente la impermeabilidad al gas radón es una de las principales características que debe tener la cámara de acumulación. Se sabe que en superficies con grosores superiores a los 0,9 mm el radón es impermeable al polietileno [9]. Como el polietileno de alta densidad presenta un coeficiente de difusión del orden de magnitud del polipropileno, y el polietileno de baja densidad presenta un coeficiente de difusión 10 veces mayor al del polipropileno [29] [30], y el espesor de la cámara de acumulación es de 1mm, se ha empleado una cámara de acumulación de polipropileno, al ser impermeable al gas radón.

Soporte para RadonEye

Una vez el gas radón emana del suelo, penetra en el interior de los edificios principalmente a través de grietas o juntas. Por ello, la tasa de exhalación de radón del suelo será mayor en aquellos lugares donde converjan varias juntas del pavimento, siendo ahí donde se instalan los medidores. Se han empleado unos soportes (Ver Figura 3-10) sobre los que se colocan los RadonEye para evitar que los medidores estén en contacto directo con el suelo, sino a 45 mm de este. Pudiendo así medir una toma representativa de la concentración de radón existente en la cámara de acumulación.

Los soportes han sido impresos en la impresora Ultimaker 3, ubicada en el edificio de investigación del CUD, siendo el material empleado PLA, ácido poliláctico. Sus dimensiones son las siguientes: 100mm de diámetros exterior, 50 mm de diámetro interior y 45 mm de altura.



Figura 3-10 Soporte para RadonEye

3.2.3 Metodología empleada en la toma de datos

Para llevar a cabo las mediciones, en primer lugar, se determinó que se realizarían sobre el suelo de ambos despachos, en concreto en dónde confluyen varias juntas, al ser dónde se produce mayor exhalación de radón (Ver Figura 3-11).



Figura 3-11 Colocación del RadonEye y soporte sobre las juntas del suelo

Tras esto se colocaron los equipos de medición de radón sobre el soporte y se instalaron las cámaras de acumulación con aire libre de radón sobre estos. Más tarde se aseguró el sellado entre la cámara de acumulación y el suelo, para ello se realizó un pequeño surco en cada recipiente que permitiera el paso del cable que conectaba el RadonEye con la toma de corriente y se colocó un objeto pesado sobre la cámara (Ver Figura 3-12). De esta manera la cámara actuaría como material estanco al radón y comenzaría la fase de acumulación en su interior. En la Figura 3-13 se muestra un esquema del dispositivo empleado, donde aparece señalado con el 1 el medidor RadonEye, con el 2 la cámara de acumulación, mientras que el 3 y 4 se corresponden con el volumen efectivo de la cámara de acumulación y la superficie de exhalación respectivamente.



Figura 3-12 Dispositivo empleado para medir la tasa de exhalación de radón

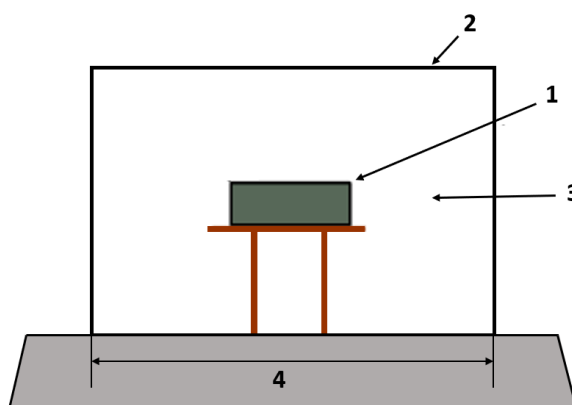


Figura 3-13 Esquema del dispositivo experimental empleado para medir la tasa de exhalación de radón por método de acumulación.

Las variaciones en la concentración de radón registradas por el medidor fueron monitorizadas en continuo durante todo el periodo que duraba la medición, entre 90 y 120 minutos. Una vez pasado este tiempo, se procedía a la ventilación del despacho, los medidores y la cámara de acumulación para volver a ser utilizados en las sucesivas mediciones.

En la Tabla 3-2 se recoge a modo resumen, el procedimiento seguido en cada de unas de las mediciones de exhalación de radón realizadas en ambos despachos.

Procedimiento	Objetivos	Duración aproximada	Duración total
Colocación del soporte, del RadonEye y cámara de acumulación	Comenzar las mediciones	15 minutos	
Captación y medida	Medir la concentración de radón exhalado a partir de la acumulación del mismo en la cámara, hasta su saturación	2 horas	2 horas y 45 minutos
Ventilación de cámara de acumulación y medidores	Limpiar la cámara y ventilar los medidores para bajar la concentración de radón en ellos, para mejorar la captación de radón exhalado.	40 minutos	

Tabla 3-2 Cuadro resumen: mediciones de tasa de exhalación del suelo en cámara de acumulación

3.2.4 Fases de la experimentación

La fase de toma de datos comprende alrededor de 2 meses, entre mediados del mes de enero y principios del mes de marzo del presente año. Se emplearon entre siete y nueve de los medidores de los que dispone actualmente el CUD. Durante estos meses fueron cambiados de posición alrededor de 4 veces al día, permitiendo obtener así un mapeado de ambos despachos para conocer las zonas donde la exhalación del suelo es mayor y menor. La experimentación puede dividirse en 3 fases:

3.2.4.1 Fase 1

En la fase 1 las mediciones se realizaron en el despacho 114. La Figura 3-14 muestra la planta del despacho 114 donde se puede observar que el suelo dispone de 129 puntos donde las juntas entre baldosas confluyen, lugar donde se colocarán los medidores RadonEye. A partir de la imagen de la derecha se ve representado el área que ocupan las cámaras de acumulación en el suelo, y los colores representan los distintos lotes de medición. Del total del área que conforma el suelo del despacho 114 se ha medido mediante el método de acumulación llevado a cabo en el presente TFG 36% del área.

Durante esta fase se emplearon 7 RadonEye siendo necesarios 24 lotes de medición para el mapeado completo del suelo del despacho 114. Esta primera fase comprendió en un primer momento entre los días 31 de enero y 18 febrero. Más tarde se realizó una última medición el día 1 de marzo, en la que se repitieron aquellas mediciones cuyos resultados parecían desorbitados.

Debido a que la tasa de exhalación del suelo no permanece constante todos los días, fue necesario establecer un punto de referencia, ubicado en la posición C4, sobre el que referenciar todos los datos obtenidos, con el objetivo de obtener un mapeado completo de la superficie del despacho 114. Esto permitirá conocer las zonas del suelo donde la inmisión de radón sea mayor. En la Figura 3-15 aparece representada en primer lugar la planta del despacho 114, los distintos lotes de medición con el día y la hora en los que se realizaron, y el RadonEye que se empleó como medidor de referencia.

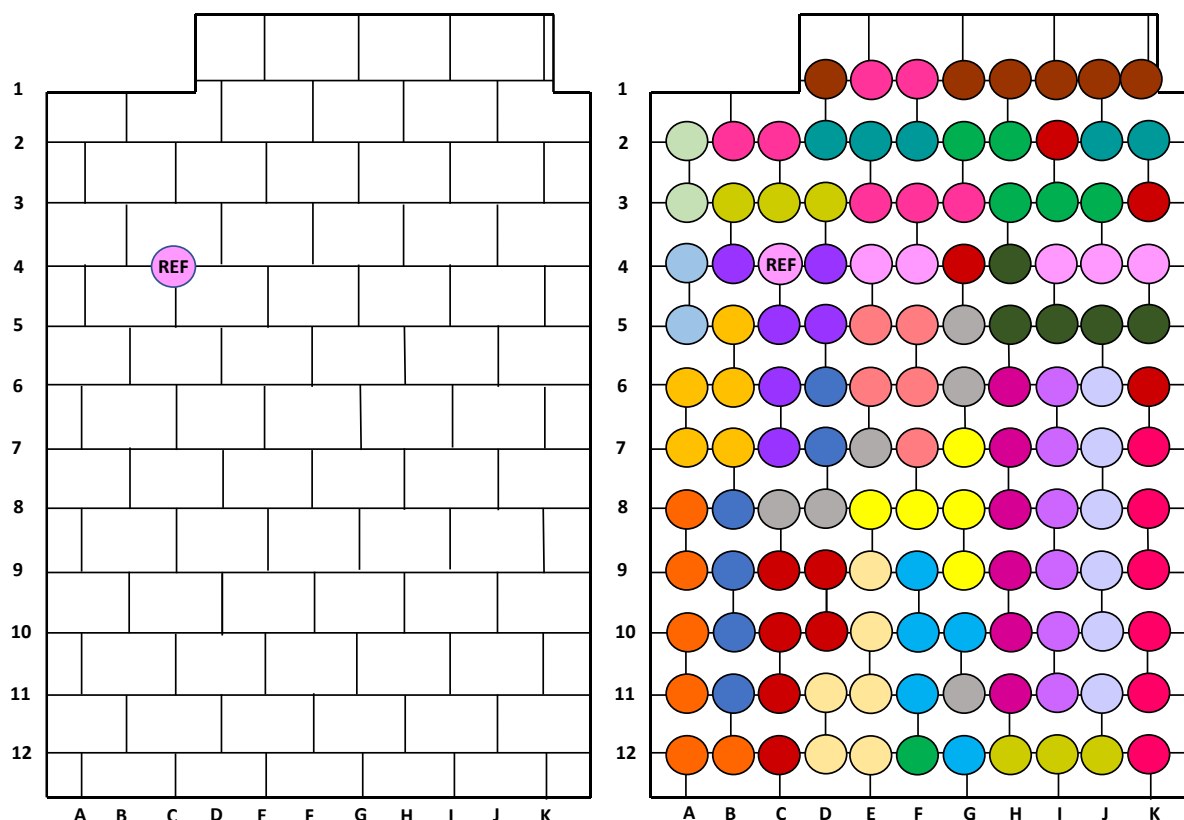


Figura 3-14 Planta del despacho 114 y ubicación de los RadonEye y las cámaras de acumulación



Figura 3-15 Distribución de los lotes de mediciones del despacho 114

3.2.4.2 Fase 2

La fase 2 corresponde a las mediciones que se realizaron en el despacho 110. Al ser un despacho en uso, las mediciones tuvieron que realizarse en los momentos en los que el despacho se encontraba vacío, por lo que mayoría tuvieron que realizarse a últimas horas de la tarde. La Figura 3-16 muestra la planta del despacho 110 donde se puede observar que el suelo dispone de 152 puntos donde las juntas entre baldosas confluyen, lugar donde se colocarán los medidores RadonEye. En la imagen de la derecha queda representado el área que ocupan las cámaras de acumulación en el suelo, además la gama de colores muestra los distintos lotes de medición. Del total del área que conforma el suelo del despacho 114 se ha medido mediante el método de acumulación llevado a cabo en el presente TFG 29% del área.

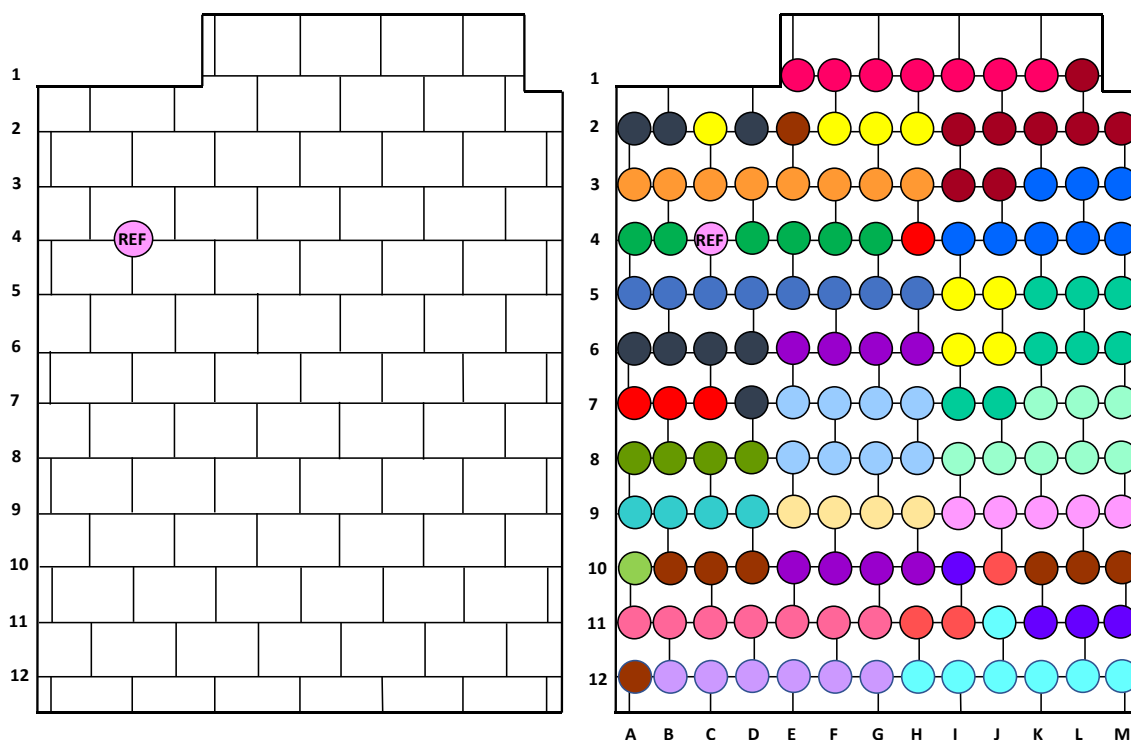


Figura 3-16 Planta del despacho 110 y ubicación de los RadonEye y las cámaras de acumulación

Durante esta fase se emplearon 9 RadonEye permitiendo así agilizar las mediciones. A pesar de ello, esta fase comprendió desde el 14 de febrero al 1 de marzo, y fueron necesarios 24 lotes de mediciones. En el despacho 110 también se colocó un medidor de referencia en la posición C4, para así poder correlacionar todos los datos y obtener un mapeado del suelo del despacho que nos permita conocer las zonas donde el suelo exhala más o menos radón. En la Figura 3-17, está representada la planta del despacho 110, los diferentes lotes de medición junto con el día y la hora de inicio y fin de las mediciones.

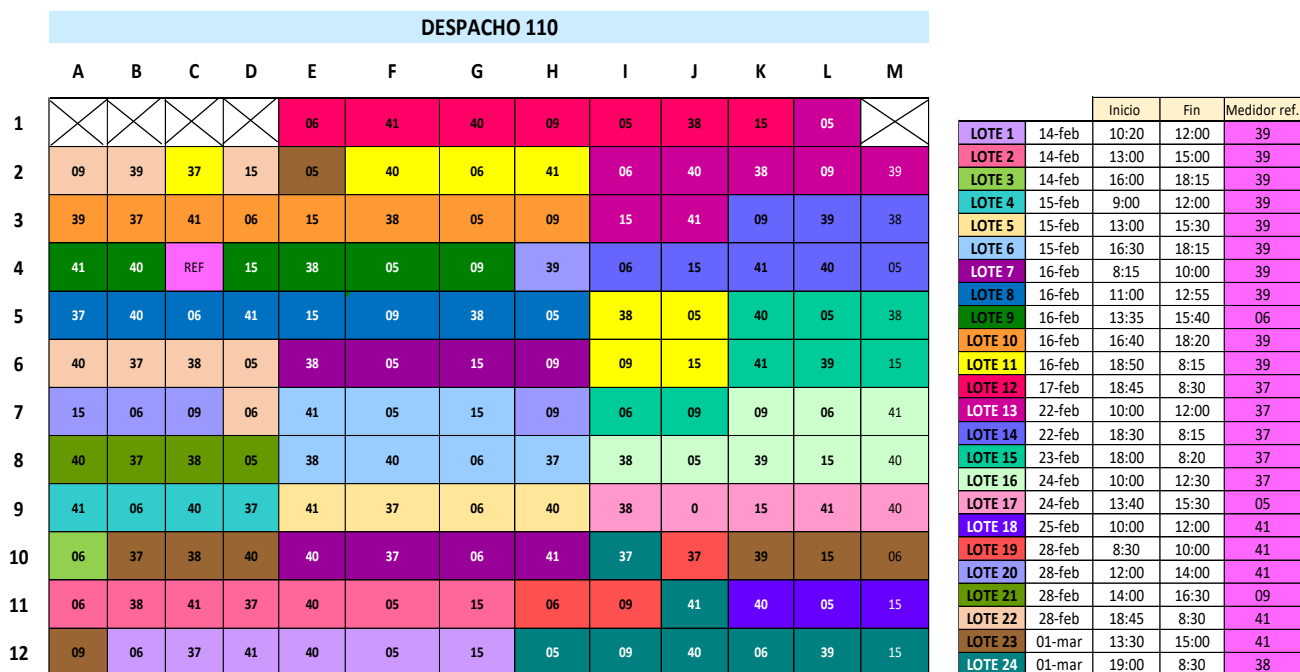


Figura 3-17 Distribución de los lotes de mediciones del despacho 110

3.2.4.3 Fase 3

Esta fase consiste en comparar las dos posiciones de referencia, C4, de ambos despachos. Con el fin de en primer lugar comprobar que nuestra hipótesis de que el despacho 114 exhala más radón que el despacho 110 es cierta. Pero para poder confirmar esta hipótesis es necesario que las mediciones en ambos despachos se produzcan en el mismo instante de tiempo, así al estar influenciados por los mismos factores meteorológicos y estar contruidos de los mismos materiales la diferencia concentración en el interior de la cámara de acumulación se deberá únicamente a factores geológicos. Y, en segundo lugar, intentar establecer una correlación entre ambos despachos, que nos permita conocer la tasa de exhalación de un despacho a partir del otro.

Para ello una vez finalizadas la fase 1 y la 2, y aprovechando los momentos en que ambos despachos se encontraban vacíos se realizaron una serie de mediciones. Se realizaron al mismo tiempo en ambos despachos, para que las condiciones meteorológicas, el momento del día, las mareas terrestres o la temperatura fueran las mismas en ambos despachos. La toma de mediciones resultó ser mucho más rápidas que las anteriores, ya que al emplear únicamente dos de los nueve RadonEye una vez pasado el periodo de acumulación se retiraban y podían colocarse otros dos medidores nuevos tras unos minutos de ventilación.

3.3 Tratamiento de datos

En Grafana quedó registrada la concentración de radón existente en el interior de cada una de las cámaras de acumulación durante las tres fases de la experimentación. Estas medidas son registradas cada 10 minutos y se puede acceder a ellas cuando se considere. Grafana no solo registra los datos obtenidos, sino que también los presenta de una manera gráfica que nos permite seleccionar el medidor RadonEye

deseado y el periodo de tiempo objeto de estudio. En la Figura 3-18 puede observarse que, en 24 horas, desde las 08:00 del 28 de febrero a las 08:00 del 1 de marzo, se han realizado 4 lotes de mediciones. En este último lote de mediciones queda reflejado como durante la fase de acumulación la concentración de gas radón en el interior de la cámara de acumulación va aumentando de manera lineal hasta llegar a un valor límite donde se satura y el crecimiento deja de ser lineal.

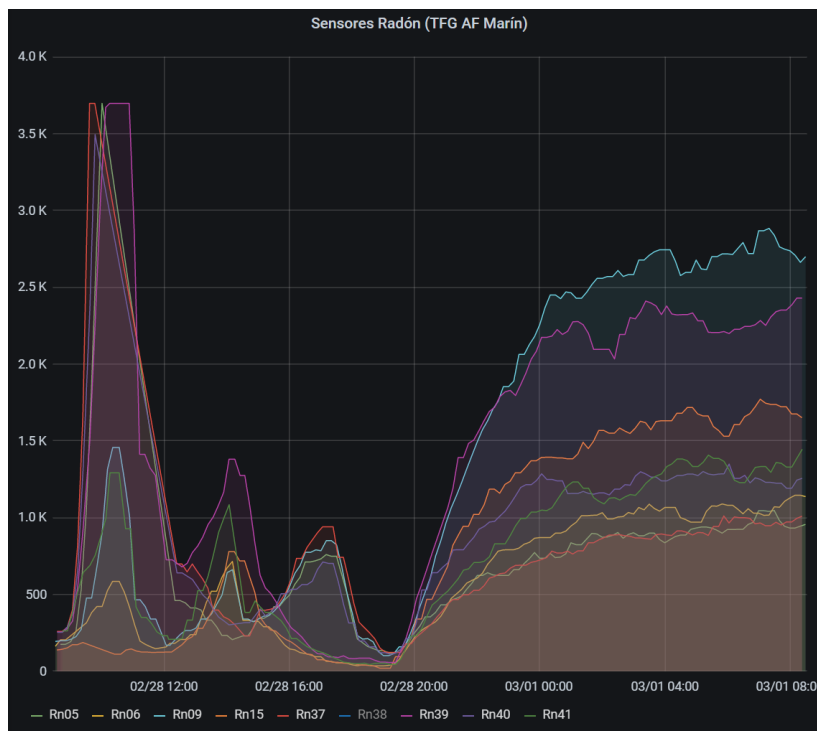


Figura 3-18 Visualización de la concentración de radón de los distintos RadonEye en el tiempo - Software Grafana

Los datos registrados en Grafana pueden ser descargados en Excel donde se genera por cada medidor una gráfica. A partir de estas, se seleccionan únicamente aquellos datos que se corresponden con la fase de acumulación, para así poder aproximarlos a un crecimiento lineal de concentración de radón y obtener la pendiente de esta recta.

Una vez conocida la pendiente, el volumen de la cara de acumulación y el área objeto de estudio; empleando la Ecuación 1 en la sección 3.2.1 podemos determinar la tasa de exhalación de cada una de las juntas. Como se expuso anteriormente es necesario comparar los datos con un punto de referencia al no haberse realizado todas las mediciones en el mismo momento. Por ello además de calcular la tasa absoluta de exhalación de gas radón en superficie también se calcula la relativa a dicho punto de referencia.

En la Figura 3-19, queda representado en primer lugar los datos obtenidos de Grafana, su representación gráfica y el punto de la superficie del suelo que está siendo estudiado. En este caso en concreto se ha estudiado la tasa de exhalación de radón en el punto de referencia (C4) y la posición K12. En segundo lugar, se han seleccionado los datos que se corresponden con el periodo de acumulación (resaltados en amarillo) y se han representado junto con la ecuación de la línea de tendencia del gráfico y el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente determina el grado de relación que hay entre ambas variables, así cuanto más se aproxime a 1 significa que la relación es lineal perfecta. A partir de la ecuación de la línea de tendencia lineal se ha obtenido la pendiente, y junto con el área y el volumen de la cámara de acumulación se obtiene la tasa de exhalación.

La tasa de exhalación del punto de referencia se ha considerado que es 1, para no tener así valores negativos una vez calculemos la tasa relativa del resto de puntos. Para obtenerla, únicamente habría que dividir la tasa de exhalación absoluta del punto de estudio entre la tasa de exhalación absoluta del punto

de referencia y multiplicarlo por 1. Así conocemos la cantidad de radón que exhala ese punto del suelo con respecto al de referencia.

REF-Rn37-8FEB (08:50-10:30)

Time (s)	Day & time	Rn37
0	08/02/2022 8:53	1054
600	08/02/2022 9:03	1106
1200	08/02/2022 9:13	1207
1800	08/02/2022 9:23	1499
2400	08/02/2022 9:33	1810
3000	08/02/2022 9:43	2268
3600	08/02/2022 9:53	2811
4200	08/02/2022 10:03	3277
4800	08/02/2022 10:13	3685
5400	08/02/2022 10:23	3696
6000	08/02/2022 10:33	3696

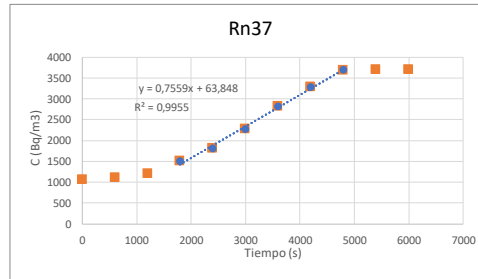
$$P \text{ (Bq/m}^3\text{s)} = 0,7559$$

$$\Phi = (P \cdot V)/S = 0,1254794 \text{ (Bq/m}^2\text{s)}$$

POSICIÓN: C4

$$\Phi = 125,48 \text{ (mBq/m}^2\text{s)}$$

$$\Phi_{\text{relativo}} = 1$$



Rn05-8FEB (08:50-10:30)

Time (s)	Day & time	Rn05
0	08/02/2022 8:50	775
600	08/02/2022 9:00	817
1200	08/02/2022 9:10	824
1800	08/02/2022 9:20	856
2400	08/02/2022 9:30	924
3000	08/02/2022 9:40	1020
3600	08/02/2022 9:50	1145
4200	08/02/2022 10:00	1272
4800	08/02/2022 10:10	1367
5400	08/02/2022 10:20	1382
6000	08/02/2022 10:30	1467

$$P \text{ (Bq/m}^3\text{s)} = 0,1897$$

$$\Phi = (P \cdot V)/S = 0,0314902 \text{ (Bq/m}^2\text{s)}$$

POSICIÓN: K12

$$\Phi = 31,49 \text{ (mBq/m}^2\text{s)}$$

$$\Phi_{\text{relativo}} = 0,25$$

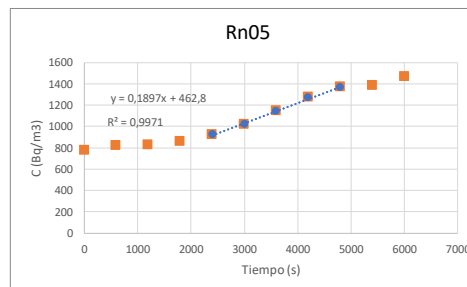


Figura 3-19 Cálculo de tasa de exhalación absoluta y relativa de gas radón en posición C4 (punto de referencia) y K12 del suelo del despacho 114 – Software: Excel

4 RESULTADOS DE EXHALACIÓN DE RADÓN EN LOS DESPACHOS DEL CUD

A lo largo del siguiente apartado se presentarán los resultados correspondientes a las fases de estudio de exhalación de radón de los despachos 114 y 110. Para la representación de los datos obtenidos, se ha empleado el programa Microsoft Excel y el software Surfer con el método estadístico Kriging.

4.1.1 Resultados en el despacho 114

En la Figura 4-1 se muestran los valores de tasa de exhalación obtenidos en los diferentes ensayos realizados durante la fase I descrita en la sección 3.2.4.1 y calculados según el procedimiento descrito en la sección 3.2.1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1				24,95	24,15	13,94	38,25	13,20	13,51	10,54	5,62
2	25,48	34,03	40,81	54,20	41,34	39,13	74,87	63,69	22,19	2,37	18,89
3	43,28	25,57	23,03	57,78	44,41	82,15	17,50	49,76	33,70	29,08	8,87
4	162,40	152,32	REF	97,29	68,91	59,47	52,67	44,13	39,54	12,73	9,83
5	75,71	27,31	90,81	50,27	43,52	61,51	44,91	45,56	23,78	25,02	19,87
6	21,63	21,11	62,92	38,79	45,13	36,25	41,26	28,50	17,69	18,34	12,27
7	28,62	24,67	47,80	48,89	25,68	35,27	49,53	28,29	22,02	25,24	29,17
8	34,58	27,51	24,84	19,64	20,58	25,10	27,54	24,93	16,38	18,85	12,95
9	28,88	45,69	11,47	17,53	19,98	30,19	28,47	25,43	8,61	20,52	14,16
10	75,27	74,86	52,48	206,15	105,77	203,81	289,79	162,70	38,49	79,21	30,23
11	29,84	31,47	23,76	18,78	23,20	68,97	34,60	50,46	44,90	9,08	8,82
12	18,93	14,55	19,54	30,03	17,78	52,23	37,76	76,41	32,35	51,77	25,10

	250-300
	200-250
	150-200
	100-150
	50-100
	20-50
	0-20

Figura 4-1 Tasa de exhalación de radón superficial del despacho 114 en mBq/m²·s

Resaltar que el comité científico de las Naciones Unidas estima una tasa de exhalación de radón en superficie en la Tierra de 20 mBq/m²·s. Aunque se ha observado que en suelos con contenido en uranio puede llegar a alcanzar los 50 Bq/m²·s [31].

Tras las mediciones realizadas en el suelo del despacho 114 puede observarse que el 75% de los datos obtenidos superan la tasa media de exhalación de radón del planeta. Correspondiéndose el 50% de ellos a una tasa de exhalación de entre 20 y 50 mBq/m²·s. Y el otro 25% a tasas de exhalación superiores a los 50 mBq/m²·s. Llegando a existir puntos donde es diez veces mayor a la media de la Tierra.

En cada lote de mediciones también se obtuvo la tasa de exhalación de radón en el punto de referencia. A pesar de que las medidas de referencia se realizaron en la misma posición, su valor ha ido variando a lo largo de la jornada y entre los distintos días. Por ello, la pendiente obtenida en la fase de acumulación de las distintas mediciones es diferente, implicando que el valor de referencia de la tasa de exhalación también lo sea, como puede observarse a modo de ejemplo en la Figura 4-2, Figura 4-3 y Figura 4-4. Destacar que las dos primeras figuras se corresponden con mediciones realizadas el mismo día, pero en diferente momento, mientras que la tercera se corresponde con otro día y con otro momento del día. Los valores de la tasa de exhalación medidos durante la fase 1 en el punto de referencia han entre los 178,75 mBq/m²·s y los 60,81 mBq/m²·s, siendo su valor medio 95,93 mBq/m²·s.

Esta diferencia se debe principalmente a que las condiciones meteorológicas reinantes en todas las mediciones no han sido las mismas. Como ya se expuso en el apartado 2.3.3 los factores meteorológicos afectan a la tasa de exhalación del suelo, en especial, la presión atmosférica y las mareas. Aunque de esta última, no existen por ahora estudios que aporten conclusiones claras al respecto.

REF-Rn37-10FEB (08:30-09:45)

Time (s)	Day & time	Rn37
0	10/02/2022 8:43	615
600	10/02/2022 8:53	665
1200	10/02/2022 9:03	853
1800	10/02/2022 9:13	1104
2400	10/02/2022 9:23	1483
3000	10/02/2022 9:33	1901
3600	10/02/2022 9:43	2230
4200	10/02/2022 9:53	2558

$$P \text{ (Bq/m}^3\text{s)} = 0,6327$$

$$\Phi = (P \cdot V)/S = 0,1050282 \text{ (Bq/m}^2\text{s)}$$

POSICIÓN: C4

$$\Phi = 105,03 \text{ (mBq/m}^2\text{s)}$$

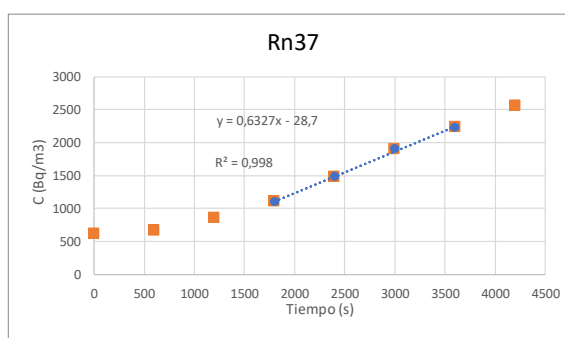


Figura 4-2 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 10 de febrero a las 08:30

REF-Rn09-10FEB (11:45-13:15)

Time (s)	Day & time	Rn09
0	10/02/2022 11:50	178
600	10/02/2022 12:00	202
1200	10/02/2022 12:10	294
1800	10/02/2022 12:20	478
2400	10/02/2022 12:30	713
3000	10/02/2022 12:40	1011
3600	10/02/2022 12:50	1282
4200	10/02/2022 13:00	1582
4800	10/02/2022 13:10	1867
5400	10/02/2022 13:20	2127

$$P \text{ (Bq/m}^3\text{s)} = 0,4658$$

$$\Phi = (P \cdot V)/S = 0,0773228 \text{ (Bq/m}^2\text{s)}$$

POSICIÓN: C4

$$\Phi = 77,32 \text{ (mBq/m}^2\text{s)}$$

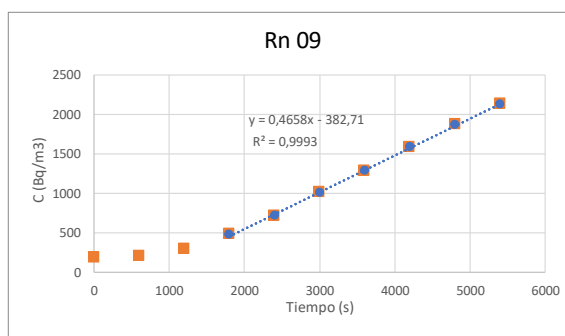


Figura 4-3 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 10 de febrero a las 11:45

REF-Rn41-1MAR (17:00-18:15)

Time (s)	Day & time	Rn41
0	01/03/2022 16:54	104
600	01/03/2022 17:03	104
1200	01/03/2022 17:13	129
1800	01/03/2022 17:23	154
2400	01/03/2022 17:33	370
3000	01/03/2022 17:43	603
3600	01/03/2022 17:53	839
4200	01/03/2022 18:03	1039
4800	01/03/2022 18:13	1279

P (Bq/m³*s)= 0,3747
Φ= (P*V)/S= 0,0622002 (Bq/m²*s)

POSICIÓN: C4

Φ= 62,20 (mBq/m²*s)

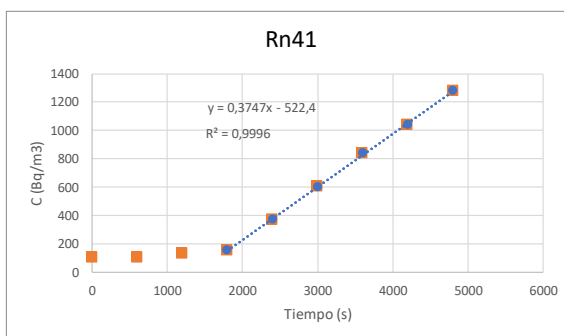


Figura 4-4 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 1 de marzo a las 17:00

Como las mediciones fueron realizadas en diferentes momentos se tomó la misma posición de referencia en cada uno de los lotes de tal forma que se pudo obtener un valor relativo de la tasa de exhalación de radón en cada uno de los puntos estudiados. Por ello, fue necesario corregir el valor obtenido en cada punto mediante la Ecuación 2, obteniéndose así la tasa relativa de exhalación de radón en el suelo del despacho 114 (Ver Figura 4-5).

$$\phi_{\text{relativo}} = \frac{\phi_{\text{real}}}{\phi_{\text{referencia}}}$$

Ecuación 2 Tasa relativa de exhalación de radón en superficie.

Donde:

- ϕ_{relativo} : tasa de exhalación de radón de un punto de la superficie de estudio respecto al valor de referencia. Al ser un valor relativo no tiene unidades
- ϕ_{real} : tasa de exhalación de radón obtenida a partir de la concentración de radón medida en la cámara de acumulación. Medido en mBq/m²*s.
- $\phi_{\text{referencia}}$: valor de referencia de la tasa de exhalación de radón obtenido en cada lote de mediciones. Medido en mBq/m²*s.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1				0,25	0,24	0,14	0,38	0,13	0,14	0,11	0,06
2	0,25	0,34	0,41	0,54	0,41	0,39	0,75	0,64	0,22	0,02	0,19
3	0,43	0,26	0,23	0,58	0,44	0,82	0,18	0,50	0,34	0,29	0,09
4	1,62	1,52	REF	0,97	0,69	0,59	0,53	0,44	0,40	0,13	0,10
5	0,76	0,27	0,91	0,50	0,44	0,62	0,45	0,46	0,24	0,25	0,20
6	0,22	0,21	0,63	0,39	0,45	0,36	0,41	0,28	0,18	0,18	0,12
7	0,29	0,25	0,48	0,49	0,26	0,35	0,50	0,28	0,22	0,25	0,29
8	0,35	0,28	0,25	0,20	0,21	0,25	0,28	0,25	0,16	0,19	0,13
9	0,29	0,46	0,11	0,18	0,20	0,30	0,28	0,25	0,09	0,21	0,14
10	0,75	0,75	0,52	2,06	1,06	2,04	2,90	1,63	0,38	0,79	0,30
11	0,30	0,31	0,24	0,19	0,23	0,69	0,35	0,50	0,45	0,09	0,09
12	0,19	0,15	0,20	0,30	0,18	0,52	0,38	0,76	0,32	0,52	0,25

	2,5-3
	2-2,5
	1,5-2
	1-1,5
	0,5-1
	0-0,5

Figura 4-5 Tasa relativa de exhalación de radón superficial del despacho 114

A partir de estos datos se ha realizado un gráfico 3D y un gráfico de contorno (Ver Figura 4-6 y Figura 4-7). En ambos se puede observar que existen zonas del suelo del despacho donde la exhalación de radón es mucho mayor que en otras. Destacando la franja próxima al pasillo del CUD cuyos valores relativos oscilan entre 1 y 2,9; además de una zona próxima al punto de referencia cuya tasa relativa de exhalación está próxima al 1,5. Se ha observado que el suelo en ambas zonas es homogéneo al igual que ocurre en todo el despacho, es decir, que aparentemente no existe ninguna grieta, fisura o corte superficial en el pavimento que provoque que la tasa de exhalación sea mayor en esas zonas. Por ello, se considera que la principal razón que puede explicar estas diferencias es una discontinuidad del terreno por debajo del nivel del pavimento que facilite la emanación de radón por dichas zonas. Para confirmar esta hipótesis sería necesario un análisis del subsuelo.

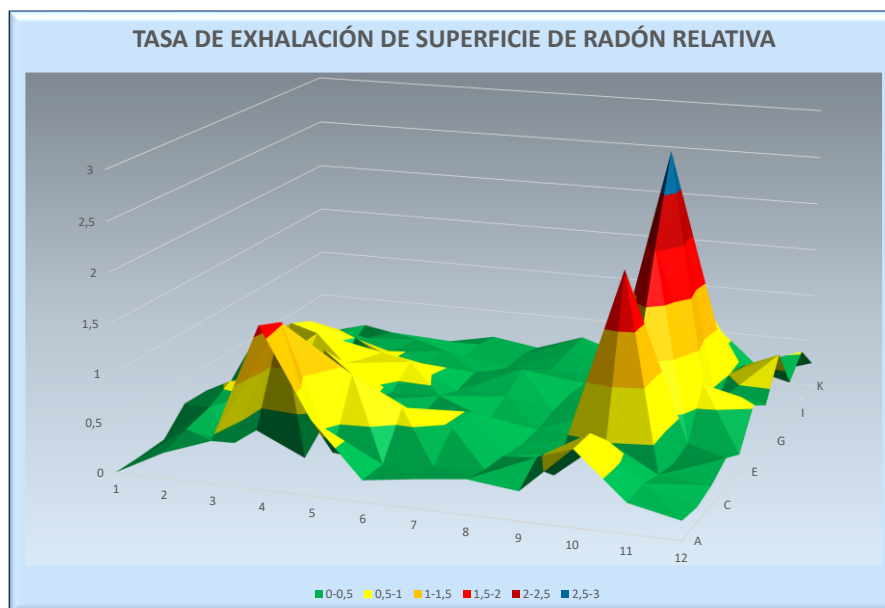


Figura 4-6 Representación en gráfico 3D de tasa relativa de exhalación de radón en el despacho 114 – Excel

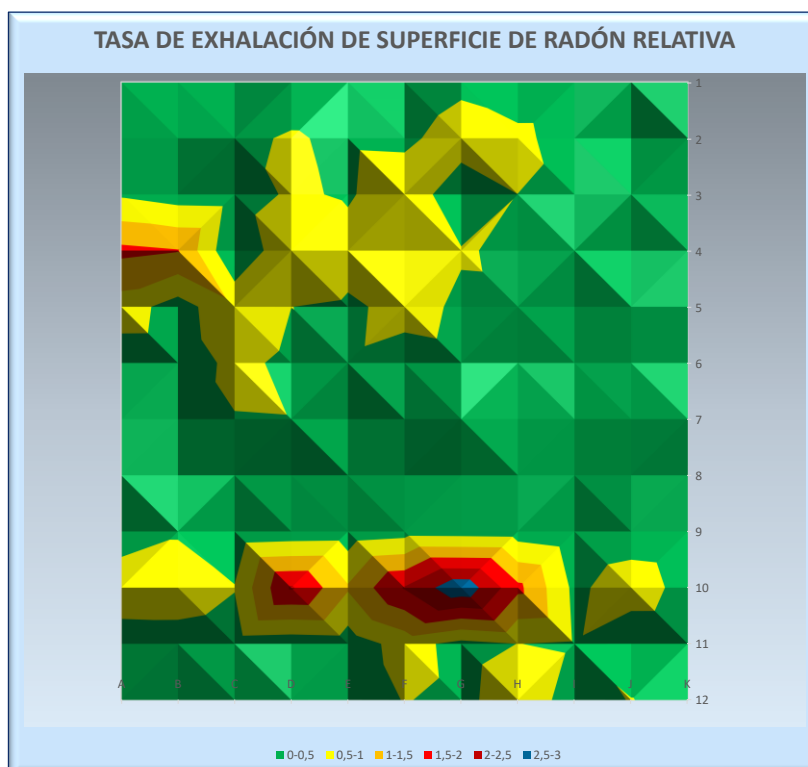


Figura 4-7 Representación en gráfico de contorno de la tasa relativa de exhalación de radón en el despacho 114

Excel

4.1.2 Resultados en el despacho 110

En la Figura 4-8, se muestran los valores de tasa de exhalación obtenidos en los diferentes ensayos realizados durante la fase II descrita en sección 3.2.4.2 y calculados según el procedimiento descrito en la sección 3.2.1

Respecto a esta fase destacar que los valores de exhalación de radón en el suelo del despacho 110 son menores a los obtenidos en el despacho 114 (Ver Figura 4-1). Ya que, el 40% de los datos tienen una tasa de exhalación menor a la media del planeta. Además, el 50% presenta una tasa de exhalación de gas radón en superficie entre los 20 y los 50 mBq/m²·s. Y únicamente el 10% de los datos obtenidos tras las mediciones presentan tasas de exhalación de gas radón superiores a los 50 mBq/m²·s.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1					13,45	15,77	9,84	9,08	23,90	15,11	12,12	14,41	
2	25,35	27,52	22,87	23,62	13,98	23,21	14,06	7,72	42,68	19,42	44,24	40,29	40,29
3	27,42	43,79	33,00	13,23	30,83	34,89	29,08	16,90	34,20	42,66	31,91	43,28	45,88
4	52,95	52,59	REF	21,08	38,91	25,33	33,70	29,42	78,15	81,29	181,24	130,36	96,66
5	32,90	17,46	24,44	37,18	29,50	24,82	37,18	29,08	17,30	11,07	47,53	39,92	32,29
6	29,51	8,47	16,40	12,91	8,88	11,01	13,99	11,17	25,86	14,19	11,25	44,85	26,98
7	24,77	13,78	14,31	13,73	16,19	26,10	18,49	11,59	52,41	23,27	11,97	25,18	31,91
8	14,31	18,71	21,08	19,67	18,49	38,31	38,55	59,30	88,86	38,26	17,40	23,59	19,26
9	14,14	23,77	38,71	20,37	29,18	41,52	43,36	77,85	110,69	49,27	21,36	28,67	41,72
10	77,27	14,99	32,29	26,84	12,08	13,83	16,93	16,72	1,86	26,48	28,27	12,30	14,91
11	5,93	21,50	19,04	25,28	37,48	28,44	37,42	8,00	34,06	4,02	57,05	28,05	34,36
12	12,67	6,51	13,65	35,64	37,47	15,55	46,56	7,75	5,23	13,56	10,71	14,56	3,62

	150 - 200
	100 - 150
	50 - 100
	20-50
	0-20

Figura 4-8 Tasa de exhalación de radón superficial del despacho 110 en mBq/m²·s

Al igual que en el despacho 114, en cada lote de mediciones realizado también se ha obtenido la tasa de exhalación de radón en el punto de referencia. Cabe destacar que el valor de la pendiente y por consiguiente el de la tasa de exhalación de gas radón fluctúa más entre unos días y otros que la del despacho 114 (Ver Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11). Esto puede deberse a que las mediciones fueron realizadas durante la tercera y cuarta semana de febrero, momento de cambio notable de las condiciones meteorológicas respecto a las semanas anteriores. Los valores de la tasa de exhalación medidos durante la fase II en el punto de referencia han variado entre 13,15 mBq/m²·s y 110,85 mBq/m²·s, siendo su valor medio 41,90 mBq/m²·s.

Durante estas semanas se produjo un descenso de temperatura notable, además, de fuertes precipitaciones. Para confirmar esta hipótesis sería necesario realizar un estudio en profundidad de los distintos factores meteorológicos que afectan a la tasa de exhalación del suelo.

REF-Rn39-15FEB (13:30-15:00)

Time (s)	Day & time	Rn39
0	15/02/2022 13:43	525
600	15/02/2022 13:53	525
1200	15/02/2022 14:03	619
1800	15/02/2022 14:13	834
2400	15/02/2022 14:23	1044
3000	15/02/2022 14:33	1316
3600	15/02/2022 14:43	1627
4200	15/02/2022 14:53	1905
4800	15/02/2022 15:03	2138

P (Bq/m³*s)= 0,4335
 $\Phi = (P \cdot V)/S = 0,071961$ (Bq/m²*s)

POSICIÓN: C4

$\Phi = 71,96$ (mBq/m²*s)
 $\Phi_{\text{relativo}} = 1$

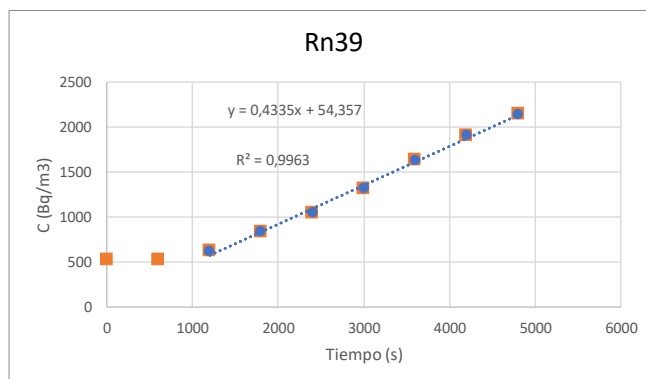


Figura 4-9 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 15 de febrero a las 13:30

REF-Rn06-16FEB (14:20-15:40)

Time (s)	Day & time	Rn06
0	16/02/2022 14:20	208
600	16/02/2022 14:30	231
1200	16/02/2022 14:40	319
1800	16/02/2022 14:50	394
2400	16/02/2022 15:00	517
3000	16/02/2022 15:10	708
3600	16/02/2022 15:20	708
4200	16/02/2022 15:30	823
4800	16/02/2022 15:40	1063

P (Bq/m³*s)= 0,1707
 $\Phi = (P \cdot V)/S = 0,0283362$ (Bq/m²*s)

POSICIÓN: C4

$\Phi = 28,34$ (mBq/m²*s)
 $\Phi_{\text{relativo}} = 1$

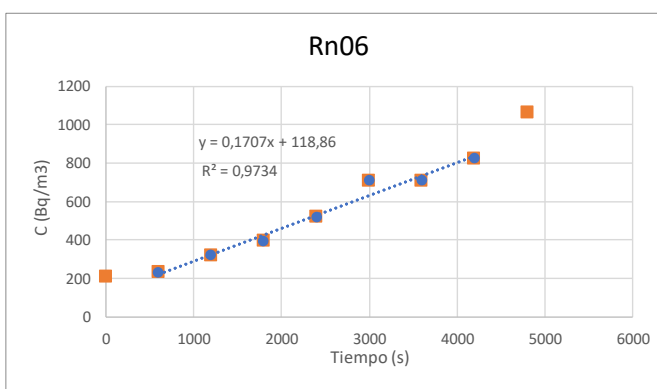


Figura 4-10 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 16 de febrero a las 14:20

REF-Rn41-28FEB (08:45-09:45)

Time (s)	Day & time	Rn41
0	28/02/2022 8:44	263
600	28/02/2022 8:53	263
1200	28/02/2022 9:03	388
1800	28/02/2022 9:13	516
2400	28/02/2022 9:23	642
3000	28/02/2022 9:36	689
3600	28/02/2022 9:46	754

P (Bq/m³*s)= 0,2108
 $\Phi = (P \cdot V)/S = 0,0349928$ (Bq/m²*s)

POSICIÓN: C4

$\Phi = 34,99$ (mBq/m²*s)
 $\Phi_{\text{relativo}} = 1$

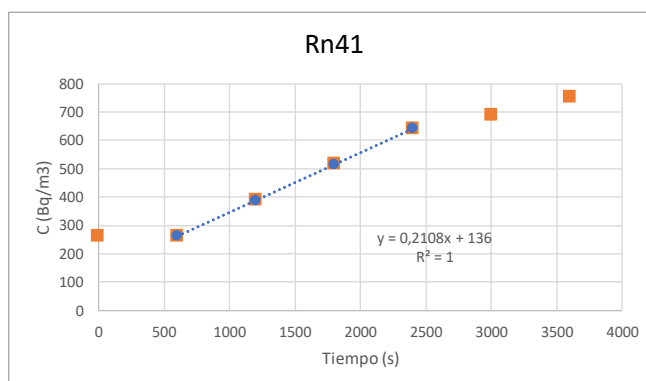


Figura 4-11 Cálculo de tasa de exhalación en el punto de referencia el 28 de febrero a las 08:45

Los valores de referencia de la tasa de exhalación de radón en la cámara de acumulación han sido necesarios para normalizar los datos anteriormente mostrados. Así, aplicando la Ecuación 2, se ha obtenido la tasa de exhalación relativa del suelo del despacho 110 mostrados en la Figura 4-12.

A pesar de tener una tasa de exhalación de gas radón menor a la del despacho 114, los valores de la tasa relativa en cada punto son mayores. En el primer despacho, como bien se puede observar en la Figura 4-6 el punto de referencia al situarse sobre una zona con una pequeña discontinuidad en el terreno presenta una tasa de exhalación de radón que ronda los 90 mBq/m²·s. Sin embargo, en el despacho 110 el punto de referencia se localiza sobre una zona cuya tasa de exhalación ronda los 30 mBq/m²·s. Además de tener un valor inferior al del 50% del suelo. Por ello, la tasa de exhalación relativa del suelo del despacho 110 presente valores mucho más elevados a los del despacho 114.

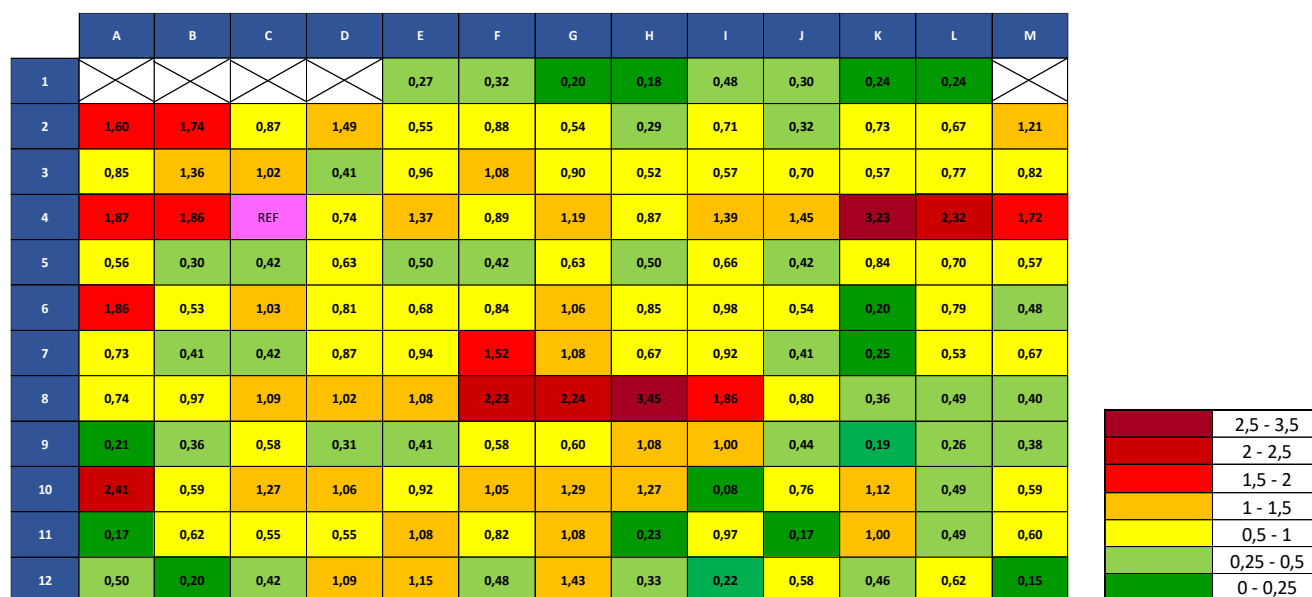


Figura 4-12 Tasa relativa de exhalación de radón superficial del despacho 110

A partir de los datos anteriormente mostrados, se ha realizado un gráfico 3D y otro de contorno (Ver Figura 4-13 y Figura 4-14 respectivamente). En ellos se observa la existencia de zonas donde la tasa de exhalación es mayor que en otras. Destacando una zona próxima al patio de aulas y al despacho 112 cuya tasa relativa de exhalación de radón llega a triplicar la de referencia; la zona del medio del despacho cuyos valores relativos oscilan entre 1,5 y 3,45 y otra pequeña zona colindante al despacho 114. Al observarse que el suelo de estas zonas es homogéneo al igual que el del resto del despacho 110 y no presentar ningún tipo de grieta o corte en el pavimento que justifique estos valores relativos tan diferenciados respecto a la tasa de exhalación del suelo, puede considerarse que estas diferencias se deben a algún tipo de irregularidad en el terreno. Por ello sería recomendable realizar un análisis del subsuelo que confirme esta hipótesis.

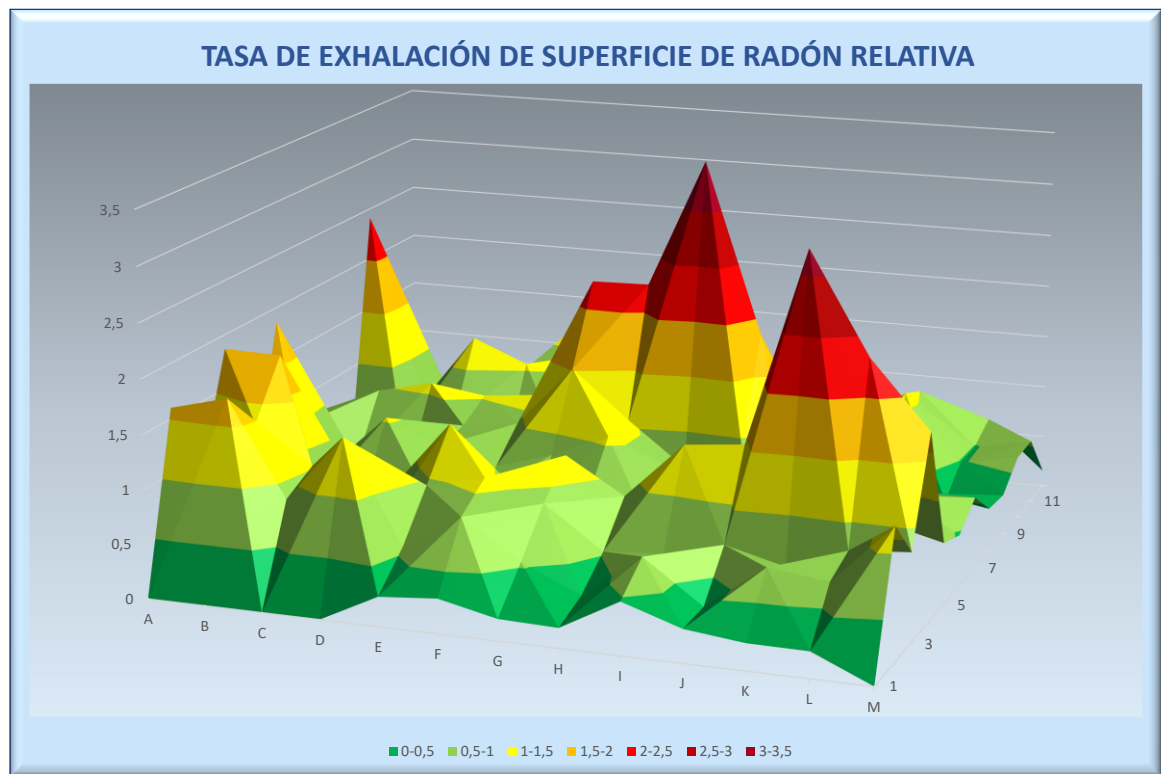


Figura 4-13 Representación en gráfico 3D de tasa de exhalación de radón en el despacho 110 – Microsoft Excel

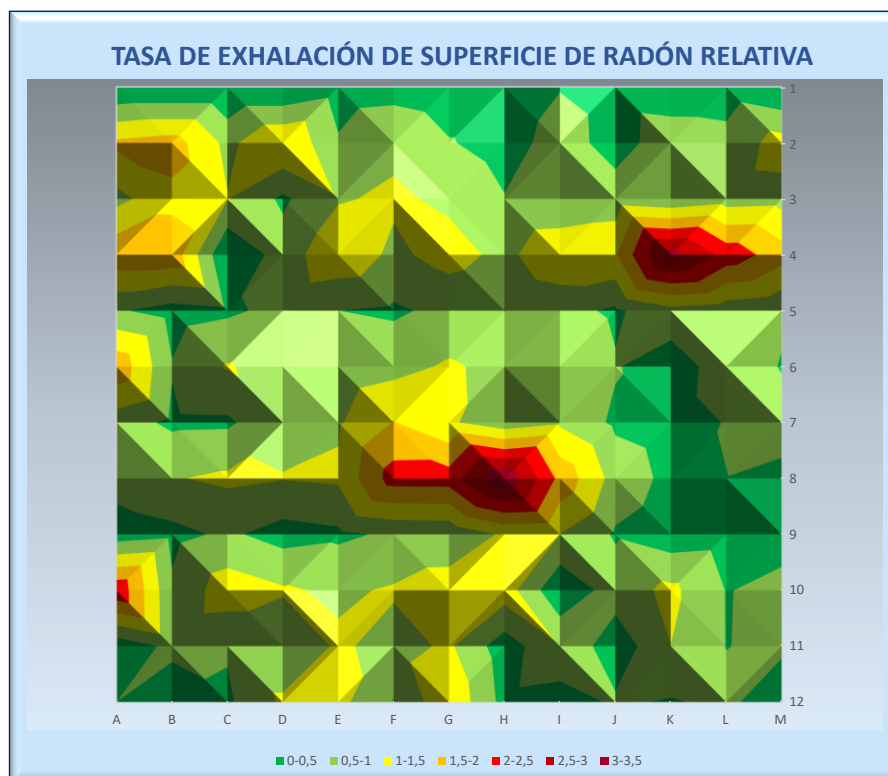


Figura 4-14 Representación en gráfico de contorno de tasa de exhalación de radón en el despacho 110 – Microsoft Excel

4.1.3 Comparación entre despachos

Mediante los datos expuestos anteriormente se puede deducir que la tasa de exhalación de gas radón en el despacho 114 es mayor que la del despacho 110. Pero para poder confirmar esta deducción fue

necesario la realización de una tercera fase, en la que se realizaron una serie de mediciones en ambos despachos durante el mismo periodo de tiempo (ver sección 3.2.4.3). Así las mediciones estaban influenciadas por los mismos factores meteorológicos. En la Tabla 4-1 se muestran todos los valores de tasa de exhalación de gas radón ($\text{mBq/m}^2\cdot\text{s}$) realizados durante los diferentes días para la posición de referencia de ambos despachos. Además de la relación de tasa de exhalación que existe entre ellos.

A la vista de los resultados obtenidos podemos concluir que efectivamente la tasa de exhalación del despacho 114 es alrededor del doble que la tasa del despacho 110. Esto como bien se expuso anteriormente puede deberse en primer lugar a que el subsuelo de ambos despachos es diferente. Y en segundo lugar a que el punto de referencia del despacho 114 se encuentra sobre una discontinuidad del terreno, siendo su tasa de exhalación de radón bastante elevada. Mientras, que el punto de referencia del despacho 110 se encuentra en una zona cuya tasa de exhalación es inferior a la del resto del despacho.

A partir de los datos obtenidos se deshecha únicamente el dato que establece que la relación entre ambos despachos es de cuatro veces mayor, al ser un valor atípico. A partir del resto de datos se realiza una media que establece que el punto de referencia del despacho 114 presenta una tasa de exhalación de gas de radón de 2,21 veces más que la del punto de referencia del despacho 110. Esta relación no es concluyente al presentar una desviación estándar de 0,72. Por ello, para obtener resultados más concluyentes, sería necesario la realización de una serie de mediciones considerablemente más larga.

Fecha y hora	Ref.-Despacho 114	Ref.- Despacho 110	Relación
2-Mar (15:00-16:00)	88,48	26,28	3,37
2-Mar (16:40-17:50)	52,04	38,21	1,36
2-Mar (19:00-20:10)	65,77	20,48	3,21
3-Mar (11:45-12:00)	50,00	28,22	1,77
3-Mar (14:20-15:30)	108,32	36,19	2,99
3-Mar (15:50-17:00)	82,47	41,09	2,01
3-Mar (18:30-19:40)	77,17	52,37	1,47
4-Mar (10:15-11:15)	70,38	17,48	4,03
4-Mar (12:30-13:45)	92,68	49,98	1,85
7-Mar (09:25-10:45)	123,84	66,9	1,85
7-Mar (15:25-16:30)	68,86	37,86	1,82
7-Mar (20:00-21:15)	81,67	44,94	1,82
8-Mar (19:30-20:50)	67,53	22,48	3,00

Tabla 4-1 Tasa de exhalación de radón en el punto de referencia de los despachos 110 y 114 ($\text{mBq/m}^2\cdot\text{s}$) y relación existente entre ambas

Una vez conocida la relación entre los despachos 110 y 114 y con el fin de mostrar de una manera más intuitiva la relación entre las tasas de exhalación de ambos despachos se le ha dado un valor determinado a la tasa del punto de referencia del despacho 114. Y a partir de ella se podrá estimar la tasa correspondiente a cada uno de los puntos de ambos despachos (Ver Figura 4-15 y Figura 4-16). Para estimar la tasa de exhalación en los puntos de los diferentes despachos, ha sido empleado la Ecuación 3.

Y el valor que se le ha dado ha sido la media de todos los valores de tasa de exhalación obtenidos en este punto a lo largo de los diferentes lotes de mediciones, siendo de 95,81 mBq/m²·s.

$$\varnothing_{absoluta} = \varnothing_{relativa} * \varnothing_{referencia}$$

Ecuación 3 Tasa de exhalación de gas radón absoluta

Donde:

- $\varnothing_{absoluta}$: tasa de exhalación de radón de un punto de la superficie de estudio respecto al valor de referencia y a su valor relativo de tasa de exhalación de gas radón. Medido en mBq/m²·s.
- $\varnothing_{relativo}$: valor de la tasa de exhalación relativa de gas radón. Se muestran en la Figura 4-5 para el despacho 114 y Figura 4-12 para el despacho 110. Al ser valores relativos no tiene unidades.
- $\varnothing_{referencia}$: valor obtenido en el punto de referencia de uno u otro despacho, dependiendo de la localización del punto de estudio. En este caso será de 95,81 mBq/m²·s para el despacho 114 y de 43,35 mBq/m²·s para el 110.

A partir de los datos Excel mostrados en la Figura 4-15 y Figura 4-16 es posible generar mediante el software Surfer un mapa de curvas de nivel de la tasa de exhalación de radón de la superficie de los despachos 114 y 110 que puede facilitar la visualización y comparación de los resultados obtenidos (Ver Figura 4-17 y Figura 4-18). Como el área total muestreada representa el 36% y el 29% de la superficie total del suelo del despacho 114 y 110 respectivamente, entre los distintos modelos estadísticos existentes en el software Surfer se ha empleado el método estadístico Kriging. Es un método de inferencia espacial, que permite estimar los valores de una variable en aquellos lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por los lugares más próximos muestreados.

El software Surfer es empleado para la visualización en 3D, la creación de isolíneas y el modelado de superficies [32]. Así, a partir de datos XYZ, Surfer puede transformarlos en mapas topográficos, mapas de relieve...

Las isolíneas de los mapas de curva de nivel generados unen aquellas zonas de la superficie del suelo cuya tasa de exhalación de radón tienen el mismo valor. Además, se muestran junto a un código de colores que hace más sencillo su interpretación. Destacar que la proximidad entre las isolíneas representa una variación en la exhalación de radón muy acentuada.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1				23,90	23,14	13,36	36,65	12,65	12,94	10,10	5,38
2	24,41	32,61	39,10	51,93	39,61	37,49	71,73	61,02	21,26	2,27	18,10
3	41,47	24,50	22,07	55,36	42,55	78,71	16,77	47,68	32,29	27,86	8,50
4	155,60	145,94	95,81	93,21	66,03	56,98	50,46	42,28	37,89	12,20	9,42
5	72,53	26,17	87,00	48,16	41,69	58,93	43,02	43,65	22,78	23,97	19,03
6	20,72	20,22	60,28	37,16	43,24	34,74	39,53	27,30	16,94	17,57	11,75
7	27,42	23,64	45,80	46,84	24,60	33,79	47,46	27,11	21,10	24,18	27,95
8	33,13	26,36	23,80	18,81	19,72	24,05	26,38	23,89	15,69	18,06	12,41
9	27,67	43,77	10,99	16,79	19,14	28,92	27,28	24,37	8,25	19,66	13,56
10	72,11	71,73	50,28	197,52	101,34	195,27	277,65	155,88	36,87	75,89	28,96
11	28,59	30,15	22,76	17,99	22,23	66,08	33,15	48,35	43,02	8,70	8,45
12	18,14	13,94	18,72	28,77	17,04	50,05	36,18	73,21	30,99	49,61	24,04

	250-300
	200-250
	150-200
	100-150
	50-100
	0-50

Figura 4-15 Tasa absoluta de exhalación de gas radón en el despacho 114 (mBq/m²·s)

CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES FOCOS DE INMISIÓN DE GAS RADÓN EN DESPACHOS DE LA PLANTA BAJA DEL CUD

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1					11,69	13,70	8,55	7,89	20,77	13,13	10,40	10,32	
2	69,31	75,26	37,76	64,59	23,92	38,31	23,21	12,74	30,57	13,91	31,69	28,86	52,60
3	36,86	58,86	44,35	17,78	41,43	46,90	39,09	22,71	24,49	30,56	24,67	33,46	35,47
4	81,01	80,45	43,35	32,25	59,53	38,75	51,55	37,66	60,42	62,84	140,11	100,78	74,73
5	24,31	12,90	18,05	27,47	21,79	18,33	27,47	21,48	28,55	18,28	36,31	30,50	24,67
6	80,71	23,15	44,85	35,32	29,28	36,29	46,14	36,84	42,69	23,43	8,60	34,27	20,61
7	31,71	17,64	18,32	37,54	40,84	65,84	46,66	29,24	40,04	17,78	10,85	22,83	28,93
8	32,08	41,94	47,26	44,09	46,66	96,67	97,25	149,61	80,57	34,70	15,77	21,39	17,46
9	9,24	15,53	25,29	13,31	17,58	25,01	26,12	46,90	43,29	19,27	8,35	11,21	16,31
10	104,34	25,65	55,25	45,94	39,85	45,59	55,83	55,12	3,44	32,80	48,38	21,05	25,51
11	7,40	26,86	23,79	23,79	46,83	35,53	46,75	9,91	42,20	7,42	43,16	21,22	25,99
12	21,68	8,64	18,12	47,32	49,74	20,65	61,82	14,33	9,66	25,07	19,79	26,91	6,69

250-300

200-250

150-200

100-150

50-100

0-50

Figura 4-16 Tasa absoluta de exhalación de gas radón en el despacho 110 (mBq/m²·s)

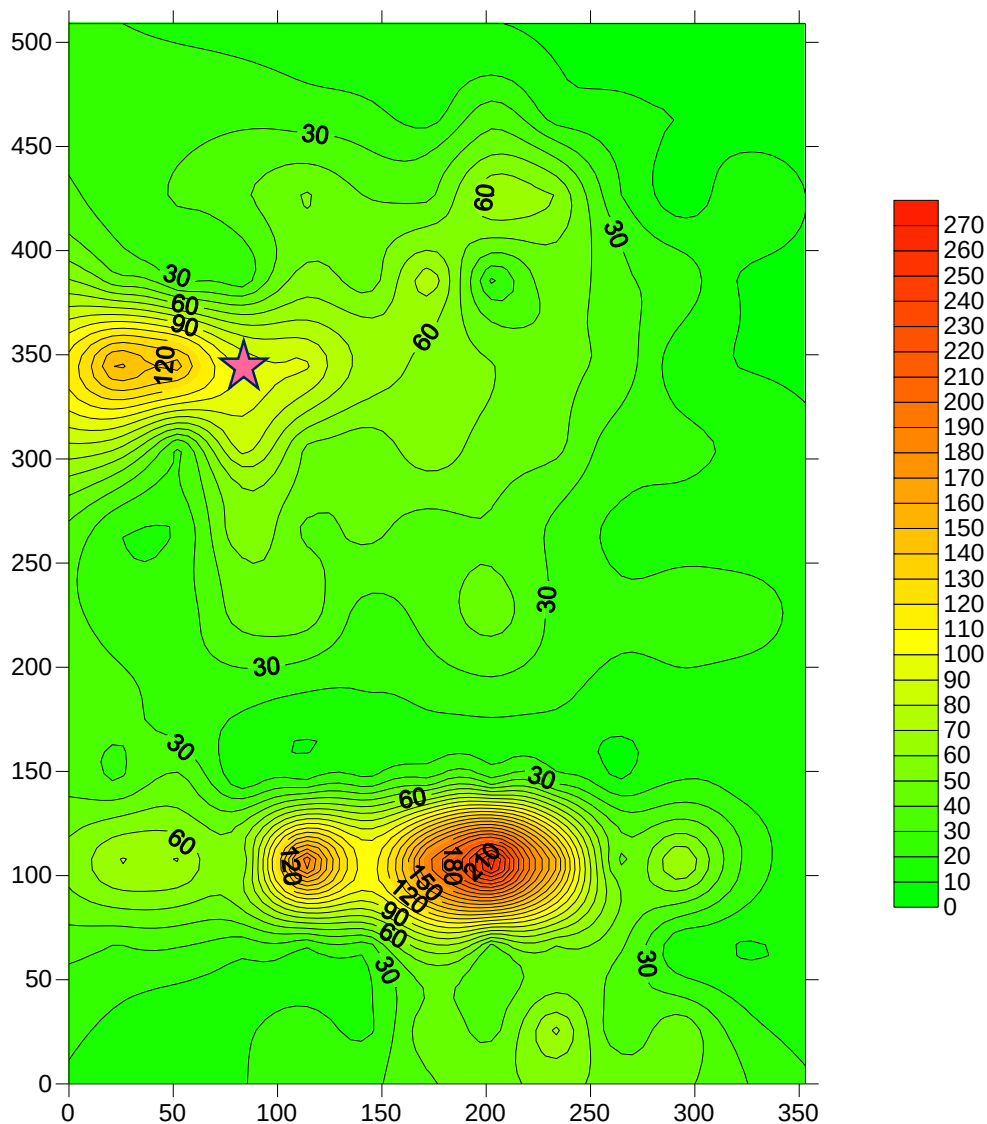


Figura 4-17 Mapa de curvas de nivel de tasa absoluta de exhalación de radón del despacho 114. Mostrándose el punto de referencia mediante la estrella - Surfer

Por un lado, el mapeado del despacho 114 demuestra la existencia de dos zonas cuya tasa de exhalación de radón es superior a la del resto de la superficie del suelo, como ya se demostró en la Figura 4-7. En primer lugar, el código de colores nos permite realizar esta observación, pero, además, la proximidad entre las isolíneas muestra que el gradiente de exhalación en apenas unos centímetros de superficie es muy grande. Es por ello que podemos confirmar que la hipótesis de una posible fisura o grieta en el subsuelo puede ser cierta.

Por otro lado, el mapeado del despacho 110 muestra dos zonas claras cuya tasa de exhalación es superior a la del resto del despacho, demostrado anteriormente en la Figura 4-14. Por ello, podemos confirmar que debe de existir una serie de irregularidades en el subsuelo de estas zonas que provoque que la tasa de exhalación de gas radón sea superior.

Como bien muestra el código de colores y la proximidad de las isolíneas en las zonas conflictivas de ambos despachos, puede decirse que las irregularidades en el subsuelo del despacho 114 provocan una tasa de exhalación de gas radón muy superior a las del despacho 110. Por un lado, se considera que en ambos despachos existen suelos distintos. Aunque, por otro lado, puede ocurrir que la profundidad o el ancho que las grietas sea distinto. En cualquiera de los casos, sería necesario corroborarlo con un análisis físico-químico del material del terreno y mediante técnicas de detección de fisuras o irregularidades en el subsuelo.

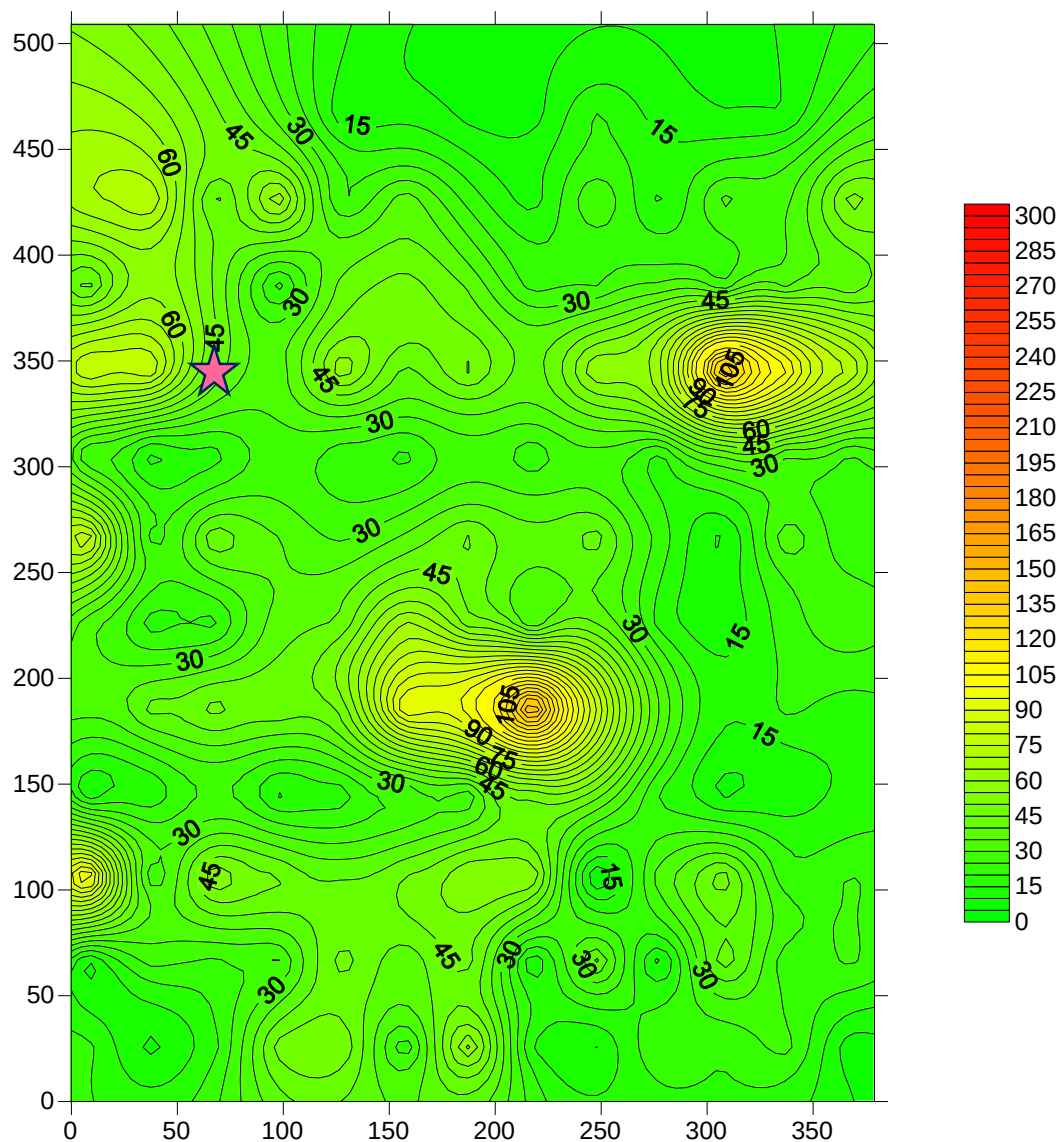


Figura 4-18 Mapa de curvas de nivel de tasa absoluta de exhalación de radón del despacho 110. Mostrándose el punto de referencia mediante la estrella - Surfer

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

En este TFG se han caracterizado los principales focos de inmisión de gas radón en el suelo del despacho 114 y 110 del edificio de CUD-ENM. Para ello, se ha realizado un mapeo de la superficie del suelo de ambos despachos con el fin de determinar la tasa de exhalación de radón. Su cálculo se ha basado en la norma UNE-EN ISO 11665-7. A partir de los datos obtenidos y su posterior análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Se ha comprobado que el despacho 114 tiene una tasa de exhalación mayor que la del despacho 110. Presentando una tasa media de 37,71 mBq/m²·s en el despacho 144 y 29,49 mBq/m²·s en el despacho 114. Siendo en ambos casos superior a la tasa media mundial, 20 mBq/m²·s.
2. Ambos despachos al estar influenciados por los mismos factores meteorológicos, presentar los mismos materiales de construcción, pero tener tasas de exhalación tan diferentes lleva a pensar que el subsuelo de ambos despachos es diferente, ya sea por su composición o morfología.
3. En el despacho 114 existen zonas cuya tasa relativa de inmisión de radón es superior a la del resto de la superficie del suelo. Por ello, a partir del mapeo de tasa de exhalación de radón realizado, se concluye la posible existencia de discontinuidades en el terreno, localizadas en la zona próxima a la puerta y la zona próxima al despacho 112 y al patio de aulas.
4. En el despacho 110 también existen zonas cuya tasa relativa de inmisión de radón es superior a la del resto de la superficie del suelo. Por ellos, a partir del mapeo de tasa de exhalación de radón realizado, se concluye la posible existencia de discontinuidades en el terreno, localizadas en la zona céntrica del despacho y en la zona próxima al despacho 112 y el patio de aulas.
5. Se ha establecido una correlación entre ambos despachos que permite conocer la tasa de exhalación de gas radón de ambos a partir de la medición de un único punto de la superficie del suelo, ya sea del despacho 114 o del despacho 110. Esto resulta útil para el estudio de medidas de mitigación mediante simulaciones.
6. Se han establecido las bases para el desarrollo de una metodología que permita conocer la tasa media de inmisión de radón en un lugar cerrado a partir de la medición de una serie de puntos del suelo, sin necesidad de tener que realizar un mapeo completo de toda la superficie.

Existen ciertas limitaciones como son el tiempo de medición y el área total medida, pero las conclusiones obtenidas en el presente apartado contribuyen a alcanzar un conocimiento más preciso del comportamiento del gas radón en los despachos de la planta baja del CUD con el fin de implementar las medidas de mitigación óptimas.

5.2 Líneas futuras

Además de establecerse una correlación entre ambos despachos que permite conocer la tasa de exhalación de gas radón de ambos despachos a partir de la medición de un único punto de la superficie de alguno de ellos. Esto puede servir como precedente a líneas futuras para el resto de despachos del CUD.

Los resultados de este Trabajo de Fin de Grado sirven de motivación para llevar a cabo las siguientes líneas futuras:

1. Realizar un estudio para correlacionar la tasa de exhalación de gas radón del suelo con las variables meteorológicas que afectan a esta zona. Permitiendo así estimar o predecir la tasa de inmisión de radón a los despachos del CUD en cualquier momento.
2. Volver a mapear ambos despachos con el fin de corroborar las conclusiones obtenidas. Pero esta vez empleando otras cámaras de acumulación que permitan medir la tasa de exhalación de un mayor porcentaje del suelo.
3. Realizar un análisis geológico de la zona del CUD que permita conocer el subsuelo al ser la principal fuente de radón en edificios.
4. Desarrollar una metodología basada en algún método estadístico que permita conocer la tasa de exhalación de radón en un determinado lugar a partir de la toma de un par de mediciones.
5. Estudiar el caudal de aire necesario para contrarrestar la tasa de inmisión media del gas radón en el interior de los despachos del CUD partiendo de las condiciones meteorológicas reinantes en ese momento. Con el fin conseguir que la concentración de gas radón presente en los despachos del CUD no superen la máxima permitida realizando únicamente una serie de ajustes en la ventilación de los despachos.
6. Realizar investigaciones en otros arsenales o dependencias de la Armada cuya concentración de radón supera la permitida, 300 Bq/m^3 , con el objetivo de conocer si se debe a una elevada tasa de inmisión de radón o a otros factores. Esto permitiría aplicar las medidas de mitigación más idóneas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Zeeb, F. Shannoun, y Organización Mundial de la Salud, *Manual de la OMS sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2015. Accedido: 27 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/161913>
- [2] «Gas Radón: El enemigo en CASA», *Control y gestión de obras*, 30 de octubre de 2018. <https://controlygestiondeobras.es/gas-radon/> Accedido: 27 de enero de 2022.
- [3] B. Frutos Vázquez, F. Martín-Consuegra Ávila, M. Olaya Adán, y C. Sainz Fernández, *Técnicas de ventilación como medida de rehabilitación frente a la inmisión de gas radón en edificios y su repercusión en la eficiencia energética*. 2014. Accedido: 25 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5748>
- [4] «Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios». Accedido: 28 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.20+Protecci%C3%B3n+frente+a+la+inmisi%C3%B3n+de+gas+rad%C3%B3n+en+edificios>
- [5] «Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013». Accedido: 25 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>
- [6] «Cartografía del potencial de radón de España.pdf». Accedido: 27 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04.41+Cartograf%C3%ADa+del+potencial+de+rad%C3%B3n+de+Espa%C3%B1a>
- [7] G. Muñoz Yébenes, «Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar», Centro Universitario de la Defensa de Marín, TFG, may 2019. Accedido: 1 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/284>
- [8] Á. García Denia «Medición de la concentración de radón en el Centro Universitario de la Defensa y propuesta de medidas de mitigación», Centro Universitario de la Defensa de Marín, TFG, abr. 2020. Accedido: 1 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/353>
- [9] C. Lázaro Benavides, «Evaluación de los factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores», Centro Universitario de la Defensa de Marín, TFG, abr. 2021. Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/434>
- [10] JDomingo, «Elemento 86». <http://cbrn.es/> Accedido: 15 de febrero de 2022.
- [11] M. Fuente Lastra, «Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos.», sep. 2016, Accedido: 6 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/9385>
- [12] «NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud». Accedido: 15 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_533.pdf/7409d594-3bdd-4a3e-bdac-50c8246d306f

- [13] «Guia_de_rehabilitacion_frente_al_radon.pdf». Accedido: 8 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.codigotecnico.org/pdf/GuiasyOtros/GuiaRadon/Guia_de_rehabilitacion_frente_al_radon.pdf
- [14] J. D. Appleton, «Radon in Air and Water», en *Essentials of Medical Geology: Revised Edition*, O. Selinus, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 239-277. doi: 10.1007/978-94-007-4375-5_11.
- [15] «Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues», 6 de septiembre de 2016. <https://www.iaea.org/publications/10369/measurement-and-calculation-of-radon-releases-from-norm-residues>. Accedido: 8 de febrero de 2022).
- [16] «Measurement and Calculation of Radon Releases from Uranium Mill Tailing». Accedido: 15 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/000/24000769.pdf
- [17] M. A. Sabater, «Desarrollo de una metodología para medir la exhalación de radón mediante la utilización de detectores de trazas».
- [18] A. Fernández Villar, «El mapa español de radón: análisis de factores indicativos del riesgo de exposición al radón», jul. 2017, Accedido: 27 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/11553>
- [19] M. Neznal, M. Neznal, M. Matolín, I. Barnet, y J. Miksova, «The new method for assessing the radon risk of building sites».
- [20] B. Frutos Vázquez «Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones». Accedido: 8 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/22535>
- [21] C. J. Guevara Pillaca, «Medición de radón 222 en Lima Metropolitana utilizando tres tipos de monitores con detectores de trazas nucleares», *Pontif. Univ. Católica Perú*, jul. 2019, Accedido: 7 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14626>
- [22] «DB-HS Salubridad». Accedido: 15 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf>
- [23] «UNE-EN ISO 11665-7_2016.pdf». Accedido: 2 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://piramidenormativa.sne.es/Repositorio/UNE/UNE-EN%20ISO%2011665-7_2016.pdf
- [24] A. Otero-Pazos, I. Fernández-Ibáñez, A. J. Piñón-Pazos, J. L. Calvo-Rolle, y J. Giz-Novo, «Estudio, medida y mitigación de la concentración de radón en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidade da Coruña», *Inf. Constr.*, vol. 69, n.º 547, Art. n.º 547, sep. 2017, doi: 10.3989/ic.16.101.
- [25] «Anexo Técnico-Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes». Accedido: 29 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://igvs.xunta.gal/ipecos-opencms-portlet/export/sites/default/PortalVivenda/Biblioteca/Lexislacion/Calidade/RADON_ANEXO_TE_CNICO_V1_es_20190307_indice.pdf
- [26] «Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes». Accedido: 15 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: http://igvs.xunta.gal/ipecos-opencms-portlet/export/sites/default/PortalVivenda/Biblioteca/Lexislacion/Calidade/RADON_GUIA_V1_es_20190308.pdf
- [27] «MapasIGME-Portal de cartografía del IGME: Mapa Geológico de España». <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geologico200Hoja.aspx?language=es&id=16>. Accedido: 28 de febrero de 2022.
- [28] «Mapa16_G200.pdf». Accedido: 28 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/geologico200/pdfs/Mapa16_G200.pdf
- [29] R. Cole y P. Proulx, «Phospholipase D activity of gram-negative bacteria», *J. Bacteriol.*, vol. 124, n.º 3, pp. 1148-1152, dic. 1975, doi: 10.1128/jb.124.3.1148-1152.1975.

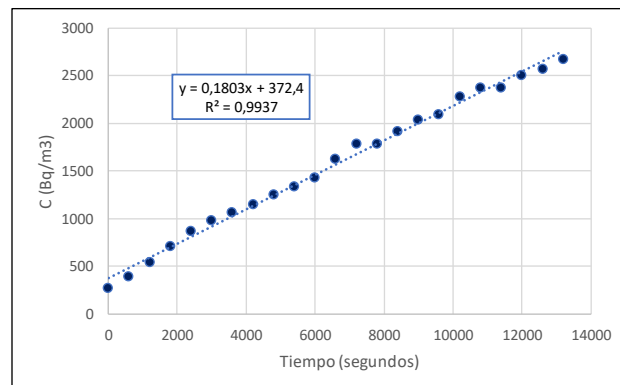
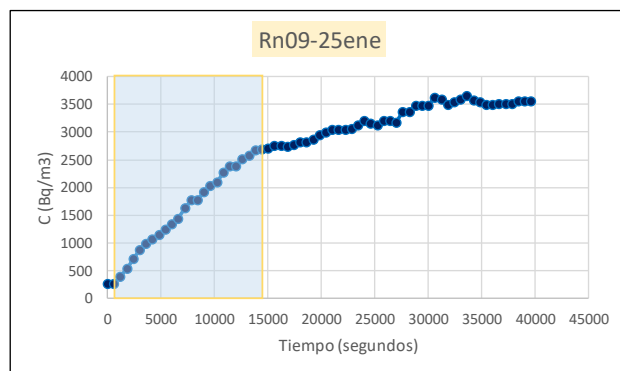
- [30] L. B. Mekler, «On the problem of oncogene of tumour viruses», *Acta Virol.*, vol. 19, n.º 6, pp. 501-508, nov. 1975.
- [31] «ISO 11665-7:2012 Measurement of radioactivity in the environment». https://infostore.saiglobal.com/en-gb/standards/iso-11665-7-2012-r2018--600297_saig_iso_iso_1374389/. Accedido: 8 de marzo de 2022.
- [32] «Surfer® | 2D & 3D mapping, modeling & analysis software for scientists and engineers». <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>. Accedido: 13 de marzo de 2022.

ANEXO I: ELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LA CÁMARA DE ACUMULACIÓN

Day & time	Rn09 (Bq/m3)	Time (s)
25/01/2022 15:00	268	0
25/01/2022 15:10	268	600
25/01/2022 15:20	387	1200
25/01/2022 15:30	538	1800
25/01/2022 15:40	708	2400
25/01/2022 15:50	867	3000
25/01/2022 16:00	977	3600
25/01/2022 16:10	1063	4200
25/01/2022 16:20	1150	4800
25/01/2022 16:30	1246	5400
25/01/2022 16:40	1329	6000
25/01/2022 16:50	1426	6600
25/01/2022 17:00	1626	7200
25/01/2022 17:10	1778	7800
25/01/2022 17:20	1778	8400
25/01/2022 17:30	1909	9000
25/01/2022 17:40	2035	9600
25/01/2022 17:50	2093	10200
25/01/2022 18:00	2274	10800
25/01/2022 18:10	2374	11400
25/01/2022 18:20	2374	12000
25/01/2022 18:30	2503	12600
25/01/2022 18:40	2570	13200
25/01/2022 18:50	2668	13800
25/01/2022 19:00	2683	14400
25/01/2022 19:10	2707	15000
25/01/2022 19:20	2749	15600
25/01/2022 19:30	2749	16200
25/01/2022 19:40	2732	16800
25/01/2022 19:50	2769	17400
25/01/2022 20:00	2807	18000
25/01/2022 20:10	2816	18600
25/01/2022 20:20	2860	19200
25/01/2022 20:30	2935	19800
25/01/2022 20:40	2990	20400
25/01/2022 20:50	3033	21000
25/01/2022 21:00	3046	21600
25/01/2022 21:10	3046	22200
25/01/2022 21:20	3061	22800
25/01/2022 21:30	3124	23400
25/01/2022 21:40	3199	24000
25/01/2022 21:50	3146	24600
25/01/2022 22:00	3113	25200
25/01/2022 22:10	3199	25800
25/01/2022 22:20	3199	26400
25/01/2022 22:30	3171	27000

CUBO PEQUEÑO	Diámetro medio=	26,7	cm
	Radio medio=	13,35	cm
	Altura=	18	cm

Área (c.pequeño)=	559,90	cm ²	0,056	m ²
Volumen (c.pequeño)=	10078,24	cm ³	0,010	m ³



P (Bq/m ³)=	0,1803		
Φ=	P*V/S=	0,032454	(Bq/m ² *s)
	Φ=	32,45	(Bq/m ² *s)

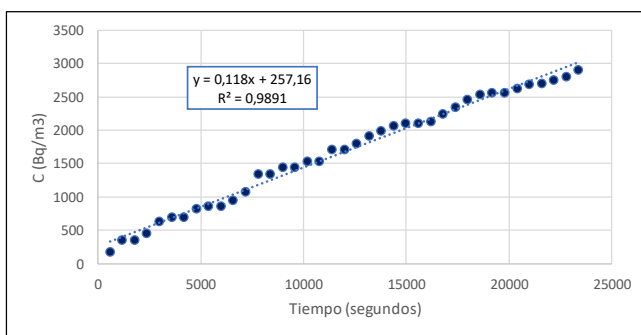
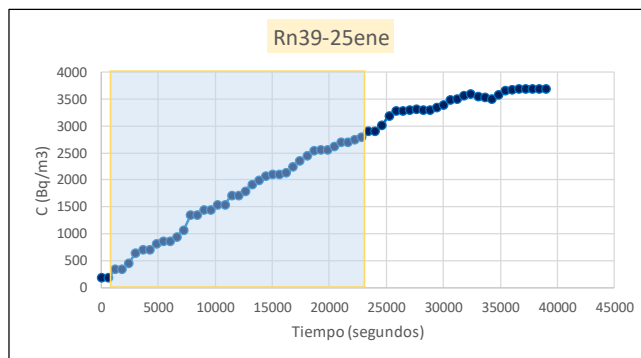
Figura 0-1 Tasa de exhalación de radón en cámara de acumulación de 7,4 litros

CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES FOCOS DE INMISIÓN DE GAS RADÓN EN DESPACHOS DE LA PLANTA BAJA DEL CUD

Day & time	Rn39 (Bq/m3)	Time
25/01/2022 15:03	179	0
25/01/2022 15:13	179	600
25/01/2022 15:23	346	1200
25/01/2022 15:33	346	1800
25/01/2022 15:43	458	2400
25/01/2022 15:53	635	3000
25/01/2022 16:03	699	3600
25/01/2022 16:13	699	4200
25/01/2022 16:23	817	4800
25/01/2022 16:33	863	5400
25/01/2022 16:43	863	6000
25/01/2022 16:53	945	6600
25/01/2022 17:03	1071	7200
25/01/2022 17:13	1343	7800
25/01/2022 17:23	1343	8400
25/01/2022 17:33	1445	9000
25/01/2022 17:43	1445	9600
25/01/2022 17:53	1534	10200
25/01/2022 18:03	1534	10800
25/01/2022 18:13	1714	11400
25/01/2022 18:23	1714	12000
25/01/2022 18:33	1793	12600
25/01/2022 18:43	1917	13200
25/01/2022 18:53	1989	13800
25/01/2022 19:03	2062	14400
25/01/2022 19:13	2099	15000
25/01/2022 19:23	2099	15600
25/01/2022 19:33	2130	16200
25/01/2022 19:43	2245	16800
25/01/2022 19:53	2345	17400
25/01/2022 20:03	2451	18000
25/01/2022 20:13	2538	18600
25/01/2022 20:23	2558	19200
25/01/2022 20:33	2558	19800
25/01/2022 20:43	2625	20400
25/01/2022 20:53	2691	21000
25/01/2022 21:03	2700	21600
25/01/2022 21:13	2753	22200
25/01/2022 21:23	2795	22800
25/01/2022 21:33	2896	23400
25/01/2022 21:43	2896	24000
25/01/2022 21:53	3011	24600
25/01/2022 22:03	3192	25200
25/01/2022 22:13	3273	25800
25/01/2022 22:23	3287	26400
25/01/2022 22:33	3297	27000
25/01/2022 22:43	3310	27600

CUBO GRANDE	Diámetro medio=	37,5	cm
	Radio medio=	18,75	cm
	Altura=	27	cm

Área (c.grande)=	1104,47	cm ²	0,11	m ²
Volumen (c.pequeño)=	29820,59	cm ³	0,03	m ³



P (Bq/m³)=	0,118		
Φ=	P*V/S=	0,03186	(Bq/m²*s)
	Φ=	31,86	(Bq/m²*s)

Figura 0-2 Tasa de exhalación de radón en cámara de acumulación de 22 litros

