



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación del potencial de radón en suelos edificables de la
ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Santiago Cervera Sáenz de Santa María.

DIRECTORES: Arturo González Gil
Ana Ogando Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación del potencial de radón en suelos edificables de la
ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Debido a los efectos perjudiciales del gas radón sobre la salud, es fundamental conocer su comportamiento en el subsuelo y su posible migración hacia el interior de las edificaciones. En este contexto, la caracterización del radón en el gas del suelo es clave para la evaluación preventiva del riesgo en zonas edificables.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio de la concentración de radón en el gas del suelo en el recinto de la Escuela Naval Militar, mediante una campaña de mediciones con el equipo RTM 1688-2 en distintos puntos del terreno, según la norma UNE-EN ISO 11665-11:2019. A partir de los datos obtenidos, se ha analizado la distribución espacial de las concentraciones y su relación con las características geológicas y geotécnicas, estimando además el potencial de radón mediante el *Radon Index*.

Los resultados muestran variabilidad en las concentraciones y un predominio de zonas con potencial alto de radón, asociado principalmente a la naturaleza granítica del terreno. El análisis temporal en un punto fijo indica que las variaciones no presentan relación clara con las variables meteorológicas.

Este trabajo contribuye a mejorar el conocimiento del comportamiento del radón en el subsuelo del área de estudio y resalta la importancia de considerar factores geológicos en la evaluación del riesgo.

PALABRAS CLAVE

Radón, concentración en suelo, Radon Index, permeabilidad del terreno, potencial de radón.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores del Trabajo de Fin de Grado, Arturo González Gil y Ana Ogando Martínez por su orientación, disponibilidad y apoyo a lo largo de todo el desarrollo de este, así como por los conocimientos transmitidos durante este proceso.

Asimismo, quiero agradecer al Centro Universitario de la Defensa (CUD) y a la Escuela Naval Militar (ENM) la formación recibida a lo largo de estos años, así como las facilidades proporcionadas para la realización de este trabajo, tanto por la adaptación ofrecida como por el acceso a los materiales y recursos necesarios para su desarrollo.

De igual manera, deseo agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, comprensión y confianza, que han sido fundamentales a lo largo de esta etapa y en la consecución de este trabajo.

Quiero hacer una mención especial a mi novia, por su apoyo constante y por haber sido un sustento diario durante todo este proceso.

Por último, me gustaría agradecer a mi grupo de amigos, y en especial a aquellos con los que comparto camareta y estudio -Álvaro Fernández Valverde, Rafael Liaño Mock y Manuel Luaces Cebreiro-, por haber contribuido a crear un ambiente de trabajo y compañerismo esencial durante la realización de este TFG.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos.....	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos.....	11
1.3 Metodología y estructura de la memoria	11
2 Estado del arte	12
2.1 El gas radón	12
2.1.1 Origen y su cadena de desintegración	12
2.1.2 Presencia del radón en suelos y rocas graníticas	13
2.1.3 Emanación del radón desde los granos minerales	14
2.1.4 Transporte por difusión y convección	15
2.1.5 Influencia de la porosidad, permeabilidad y humedad del suelo	15
2.1.6 Importancia del radón como problema de salud pública.....	16
2.2 Potencial de radón del terreno	17
2.2.1 Definición de radón en el suelo	17
2.2.2 Relación entre concentración de radón en el suelo y la permeabilidad del terreno	17
2.2.3 Diferencia y relación entre concentración de radón en interiores y concentración de radón del suelo como parámetro predictivo	18
2.2.4 Transferencia del radón desde el suelo a edificios	20
2.2.5 Factores geológicos: litología y contenido en uranio	21
2.2.6 Factores meteorológicos influyentes	21
2.2.7 Importancia para la planificación y protección radiológica	22
2.3 Marco normativo y criterios de referencia	22
2.3.1 Normativa europea y española	22
2.3.2 Elaboración de mapas de suelo y clasificación según el potencial de radón	23
2.3.3 Limitaciones de la normativa frente a la variabilidad real del terreno	24
2.4 Procedimientos e instrumentación de medida de radón	24
2.4.1 Generalidades de medidas de radón	24
2.4.2 Sistemas de medida de radón en el suelo	25
2.4.3 Sistemas de monitorización activa y pasiva para la determinación del potencial de radón en el terreno	25
2.4.4 Procedimiento estandarizado de medición de radón en el suelo	27

3	Materiales y métodos	28
3.1	Descripción del área de estudio	28
3.1.1	Contexto geológico y geográfico	28
3.1.2	Características geotécnicas del suelo en la ENM	31
3.1.3	Determinación de la línea de costa del área ganada al mar	33
3.2	Elección de los puntos de muestreo	36
3.2.1	Criterios de selección de los puntos de muestreo	36
3.2.2	Selección del punto de muestreo fijo	37
3.3	Equipo de medida	38
3.3.1	Monitor de radón RTM 1688-2	38
3.3.2	Equipamiento auxiliar	39
3.4	Procedimiento experimental de medición	42
3.4.1	Procedimiento de medición	42
3.4.2	Mediciones específicas en el patio de aulas	46
3.5	Toma de datos	47
3.5.1	Determinación del tiempo de estabilización de la medición	47
3.5.2	Conclusiones	54
3.6	Campaña de mediciones	54
3.6.1	Puntos de medición y distribución temporal de la campaña	54
3.6.2	Punto de medición fijo	56
4	Resultados	58
4.1	Resultados de concentración de radón en suelo	58
4.1.1	División de la zona de estudio	58
4.1.2	Resultados de las mediciones	59
4.1.3	Análisis de la zona Z1	61
4.1.4	Análisis de la zona Z2	63
4.1.5	Análisis de la zona Z3	64
4.1.6	Análisis de la zona Z4	65
4.1.7	Análisis global de las concentraciones	67
4.1.8	Influencia de las condiciones ambientales	72
4.2	Estimación de la permeabilidad del suelo	77
4.2.1	Caracterización del terreno por zonas	77
4.2.2	Clasificación de la permeabilidad	78
4.3	Determinación del Radon Index	79
4.3.1	Parámetros utilizados para el cálculo	79
4.3.2	Clasificación del Radon Index	80

4.4 Variación temporal de la concentración de radón en un mismo punto	81
4.4.1 Resultados de las mediciones	81
4.4.2 Evolución diaria de la concentración de radón	81
4.4.3 Análisis de variables relevantes	84
5 Conclusiones y líneas futuras	88
5.1 Conclusiones.....	88
5.2 Líneas futuras	89
6 Bibliografía.....	90
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	92
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	93
Anexo III: Declaración sobre el uso responsable de herramientas de inteligencia artificial.....	94
Anexo IV: Fichas de campo	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Principales vías de entrada del gas radón en el interior de los edificios desde el subsuelo, incluyendo fisuras en la solera, muros en contacto con el terreno, conducciones y espacios de cámara de aire [6].	9
Figura 1-2 Mapa del potencial de radón en España (CSN), donde se muestra la distribución de las concentraciones estimadas en función de la geología, destacando las zonas con mayor probabilidad de presentar niveles elevados.	9
Figura 1-3 Mapa geológico de España.	10
Figura 1-4 Presencia de radón en viviendas[7].	10
Figura 2-1 Cadena de desintegración del Uranio [4].	12
Figura 2-2 Mapa de zonificación por municipio del radón [13].	14
Figura 2-3 Procesos de emanación y exhalación del radón [15].	18
Figura 2-4 Zonas de alto potencial de radón en el noroeste de la Península Ibérica [21].	19
Figura 2-5 Vías de inmisión del gas radón en edificaciones [17].	20
Figura 2-6 Equipo AlphaGUARD [24].	26
Figura 2-7 - RTM-1688-2[5].	26
Figura 3-1 Ubicación ENM (Google earth).	29
Figura 3-2 Ortofotografía actual (PNOA) y fotografía aérea del vuelo americano 1956–1957 de la Escuela Naval Militar de Marín [25].	30
Figura 3-3 Marco geológico regional [26].	30
Figura 3-4 Ubicación estudios geotécnicos. (Google earth).	31
Figura 3-5 Plano histórico de la ría de Pontevedra y del entorno de Marín (1862).	34
Figura 3-6 Comparación entre la línea de costa representada en el plano histórico de 1862 y la línea de costa actual en el área de la ENM.	35
Figura 3-7 Estimación de la posición de la línea de costa original sobre cartografía actual de la ENM, a partir del análisis cartográfico histórico y la información geotécnica disponible (Google earth).	35
Figura 3-8 Ubicación de las mediciones en la ENM (Google earth).	37
Figura 3-9 Punto de muestreo fijo ENM (Google earth).	38
Figura 3-10 Monitor de radón RTM 1688-2.	39
Figura 3-11 Filtro de partículas.	40
Figura 3-12 Separador de condensados con válvula de flotador.	41
Figura 3-13 Tubos de conexión.	41
Figura 3-14 Pantalla intervalos RTM 1688-2.	42
Figura 3-15 Sonda de muestreo y pica.	42
Figura 3-16 Elemento de protección frente a impactos.	43
Figura 3-17 Sonda introducida en el terreno.	43
Figura 3-18 Varilla metálica introducida en la sonda.	44

Figura 3-19 Conexión entre sonda y RTM 1688-2 mediante tubos.....	44
Figura 3-20 Pantalla RTM 1688-2.	45
Figura 3-21 Pantallas de nivel de concentración y datos ambientales del RTM 1688-2.	45
Figura 3-22 Tapón modificado en patio el de aulas ENM.	46
Figura 3-23 Patio de aulas ENM (Google Earth).....	47
Figura 3-24 Variación temporal de la concentración de radón y su error asociado.....	48
Figura 3-25 Edificio investigación CUD-ENM (Google Earth).	49
Figura 3-26 Variación temporal de la concentración de radón y su error asociado.....	49
Figura 3-27 Palo de señales ENM (Google Earth).	50
Figura 3-28 Variación temporal de la concentración de radón y su error asociado.....	51
Figura 3-29 Jardines inferiores de la cuesta al cuartel Méndez Núñez (Google Earth).....	51
Figura 3-30 Expresión de la geometría para el cálculo del tiempo de purga.....	52
Figura 4-1 División de la zona de estudio por zonas.	59
Figura 4-2 Concentraciones de radón de la campaña.	61
Figura 4-3 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z1.	62
Figura 4-4 Diagrama de cajas y bigotes Z1.	63
Figura 4-5 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z2.	63
Figura 4-6 Diagrama de cajas y bigotes Z2.	64
Figura 4-7 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z3.	65
Figura 4-8 Diagrama de cajas y bigotes Z3.	65
Figura 4-9 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z3.	66
Figura 4-10 Diagrama de cajas y bigotes Z4.	67
Figura 4-11 Concentración de radón en las zonas.	68
Figura 4-12 Diagrama de cajas y bigotes de las zonas.	68
Figura 4-13 Clasificación de los puntos de muestreo según su concentración de radón.	69
Figura 4-14 Histograma de frecuencias de las concentraciones de radón según los intervalos de clasificación establecidos.....	70
Figura 4-15 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z1.	70
Figura 4-16 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z2.	71
Figura 4-17 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z3.....	71
Figura 4-18 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z4.....	72
Figura 4-19 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la HR del aire.....	74
Figura 4-20 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la presión atmosférica.....	74
Figura 4-21 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la altura de la marea.....	75
Figura 4-22 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la temperatura del terreno.	75
Figura 4-23 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la HR del terreno.	76

Figura 4-24 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la presión del terreno.	76
Figura 4-25 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 10/03/2026.	82
Figura 4-26 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 11/03/2026.	83
Figura 4-27 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 12/03/2026.	83
Figura 4-28 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 16/03/2026.	84
Figura 4-29 Relación entre la concentración de radón y la temperatura.	85
Figura 4-30 Relación entre la concentración de radón y la presión atmosférica.	86
Figura 4-31 Relación entre la concentración de radón y la humedad relativa.	86
Figura 4-32 Relación entre la concentración de radón y la altura de la marea.	87
Figura 4-33 Relación entre la concentración de radón y hora de la toma de datos.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Características estudios geotécnicos ENM.....	33
Tabla 3-2 Distribución temporal de la campaña.	56
Tabla 3-3 Distribución temporal de la campaña en un mismo punto.	57
Tabla 4-1 Valores de concentración de radón de la campaña.....	60
Tabla 4-2 Concentración de radón Z1.....	61
Tabla 4-3 Concentración de radón Z2.....	63
Tabla 4-4 Concentración de radón Z3.....	64
Tabla 4-5 Concentración de radón Z4.....	66
Tabla 4-6 Estadísticas de las mediciones.....	67
Tabla 4-7 análisis estadístico descriptivo de las variables.	73
Tabla 4-9 Tipo de terreno dominante en las zonas de la ENM.....	78
Tabla 4-10 Estimación de permeabilidades.	78
Tabla 4-11 Estimación de la permeabilidad del suelo en las distintas zonas del área de estudio en función del tipo de terreno dominante.....	79
Tabla 4-12 Valores del tercer cuartil de la concentración de radón (cA75) y clasificación de la permeabilidad del terreno por zonas.	80
Tabla 4-13 Clasificación del Radon Index en función de la concentración de radón en el gas del suelo (cA) y la permeabilidad del terreno.	80
Tabla 4-14 Determinación del <i>Radon Index</i>	80
Tabla 4-15 Variación temporal de la concentración de radón en un mismo punto (P16).....	81
Tabla 4-16 Concentraciones de radón en un mismo punto día 10/03/2026.....	82
Tabla 4-17 Concentraciones de radón en un mismo punto día 11/03/2026.....	82
Tabla 4-18 Concentraciones de radón en un mismo punto día 12/03/2026.....	83
Tabla 4-19 Concentraciones de radón en un mismo punto día 16/03/2026.....	84
Tabla 4-20 Concentración de las mediciones con sus respectivas variables meteorológicas.....	85

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El radón (Rn-222) es un gas noble radiactivo de origen natural que se genera de manera continua en la cadena de desintegración del uranio-238, presente de forma habitual en la corteza terrestre. Su formación se produce a partir del radio-226, elemento sólido que, al desintegrarse, libera radón en forma gaseosa, permitiendo su migración a través de los poros y fisuras del terreno. Debido a su carácter incoloro, inodoro e insípido, su presencia resulta imperceptible para el ser humano, lo que dificulta la detección de exposiciones prolongadas sin instrumentación específica [1].

Desde el punto de vista sanitario, la exposición al radón en ambientes interiores y a sus descendientes de vida corta constituye una de las principales fuentes de radiación ionizante de origen natural para la población [2]. La inhalación de estos productos de desintegración, que se adhieren a partículas en suspensión, puede provocar daños en el tejido pulmonar tras exposiciones prolongadas [3]. Por este motivo, organismos internacionales y autoridades nacionales han establecido niveles de referencia a partir de los cuales se considera necesaria la adopción de medidas correctoras. En España, en consonancia con la Directiva 2013/59/EURATOM [4], se fija un nivel de referencia de 300 Bq/m^3 para la concentración media anual en el interior de edificios, valor a partir del cual deben implementarse actuaciones destinadas a reducir la exposición [5].

El Plan Nacional frente al Radón establece el marco estratégico para la gestión del riesgo asociado a este gas en España, contemplando actuaciones en el ámbito normativo, sanitario y técnico. Entre sus líneas de actuación se incluye la promoción de mediciones en edificios existentes, la incorporación de requisitos constructivos en nuevas edificaciones y la elaboración de mapas de potencial de radón. No obstante, aunque el plan reconoce la importancia del terreno como fuente principal del gas, no establece una obligatoriedad generalizada de realizar mediciones directas en el suelo antes de la edificación, centrándose en la concentración interior como indicador de referencia para la adopción de medidas [5].

El radón presente en el interior de los edificios puede tener distintos orígenes, incluyendo fisuras en la solera, muros en contacto con el terreno, conducciones y espacios de cámara de aire, como se muestra en la Figura 1-1. Puede proceder del agua de origen subterráneo utilizada en determinados usos, liberándose al aire durante su consumo; puede también emitirse en pequeña proporción desde determinados materiales de construcción que contienen radionucleidos naturales; sin embargo, la contribución mayoritaria proviene del subsuelo sobre el que se asienta la edificación. El gas generado en el terreno puede migrar hacia el interior a través de grietas, juntas y discontinuidades en contacto con el suelo, siendo este mecanismo el responsable del porcentaje más significativo de las concentraciones interiores registradas [6].

Vías posibles de entrada a los edificios

El radón procede del subsuelo sobre el que se edifica la casa cuando las rocas son ricas en uranio, como es el caso de Galicia. Sin embargo, el procedente de la piedra de las paredes no supone más del 20 % del total existente en una casa

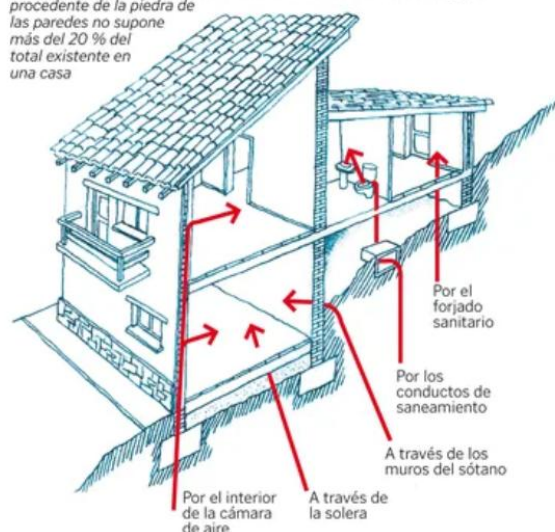


Figura 1-1 Principales vías de entrada del gas radón en el interior de los edificios desde el subsuelo [6].

La concentración de radón en el interior de un edificio está estrechamente vinculada a la naturaleza del terreno sobre el que se asienta. No obstante, este nivel depende de una interacción compleja de factores: la permeabilidad y fracturación del sustrato, las soluciones constructivas empleadas, los sistemas de ventilación y los diferenciales de presión entre el suelo y el habitáculo. Esta correlación se evidencia al contrastar el mapa de potencial de radón de España (Figura 1-2) con el mapa geológico nacional (Figura 1-3), donde las áreas de mayor riesgo coinciden con afloramientos graníticos. Por ello, si bien la medición en interiores es un pilar de la protección sanitaria, su análisis aislado es insuficiente para comprender el origen del gas o predecir su comportamiento en futuras obras. Resulta imprescindible, por tanto, un enfoque integrado que combine el estudio geológico con las variables constructivas y ambientales."

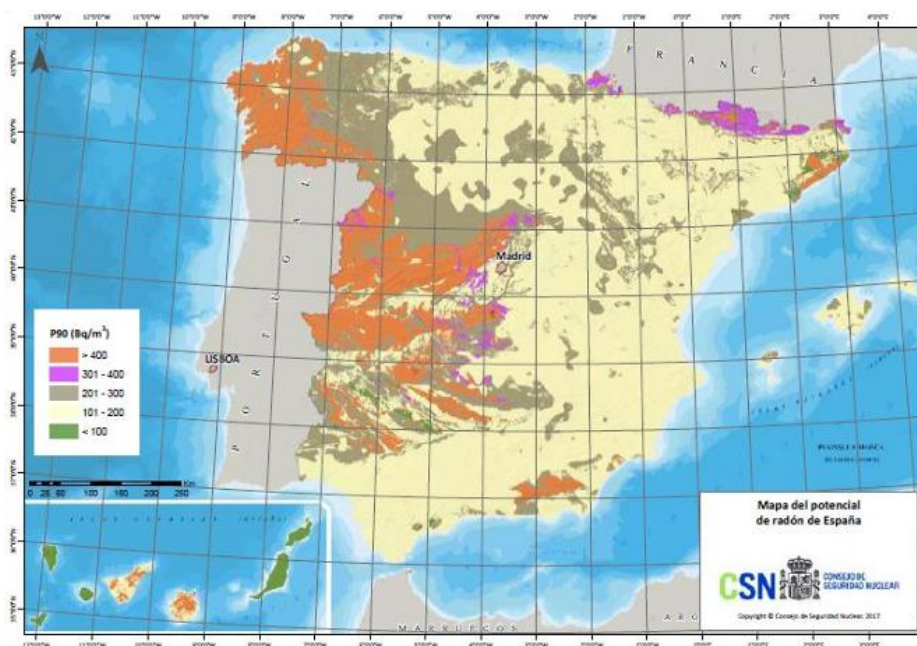


Figura 1-2 Mapa del potencial de radón en España (CSN) [7].

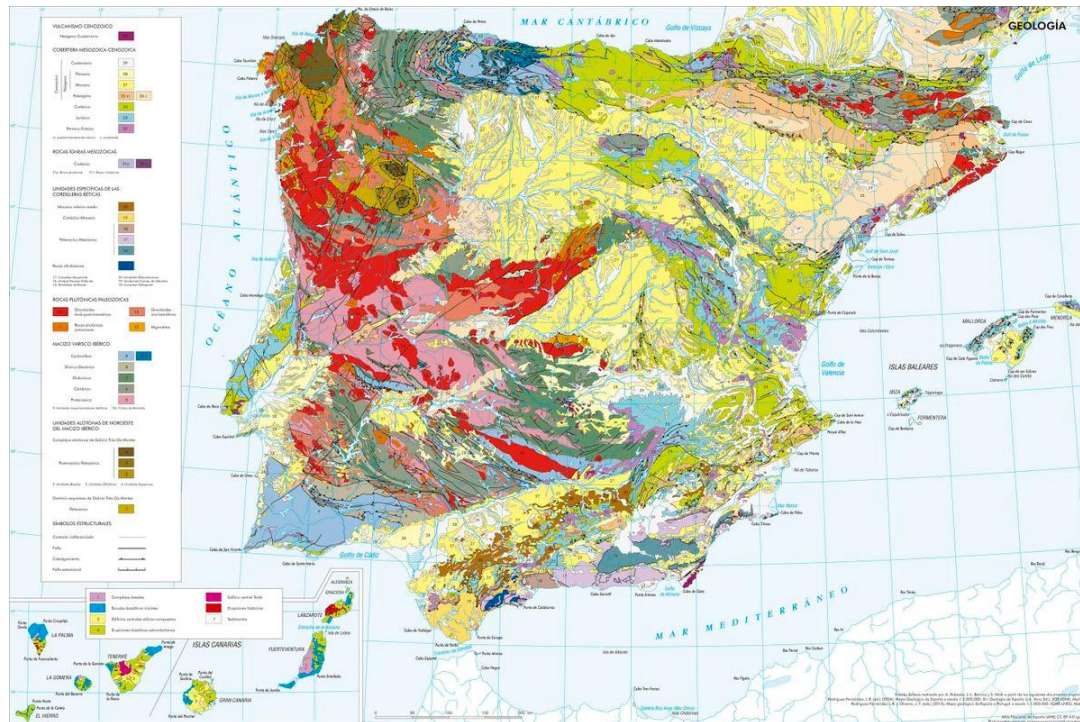


Figura 1-3 Mapa geológico de España [8].

El interés por abordar este estudio en la Escuela Naval Militar se justifica, en primer lugar, por su localización en una zona con potencial significativo de exposición al radón, tal y como se aprecia en la Figura 1-4, donde se observa una elevada proporción de áreas con concentraciones superiores a 200 Bq/m³. Esta circunstancia, ligada a las características geológicas del entorno, hace necesario evaluar con mayor detalle el comportamiento de este gas en las instalaciones. Además, estudios previos han evidenciado la presencia de radón en varios edificios de la ENM, lo que refuerza la necesidad de profundizar en su análisis. Por otro lado, este trabajo cobra especial relevancia en el contexto actual, dado que se prevé la ampliación de la Escuela y la construcción de nuevas edificaciones, lo que hace imprescindible disponer de información rigurosa que permita incorporar medidas preventivas y garantizar la seguridad radiológica desde la fase de diseño.

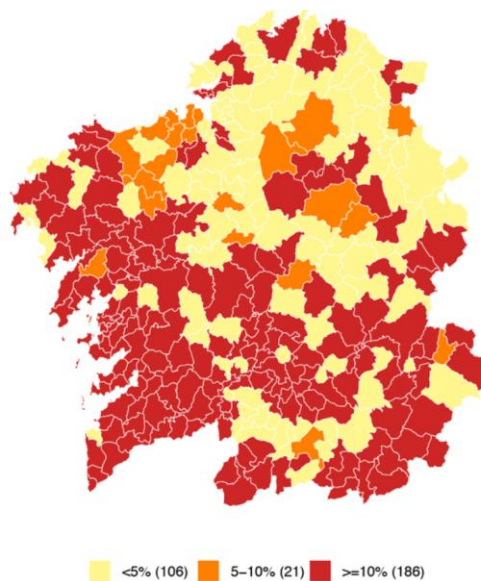


Figura 1-4 Presencia de radón en Galicia [9].

1.2 Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es la caracterización de la concentración de radón en el gas del suelo en el recinto de la Escuela Naval Militar (ENM), con el fin de evaluar su comportamiento y estimar el potencial de radón del terreno. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un mapeo de la concentración de radón en el gas del suelo en diferentes puntos representativos, zonas edificables y el entorno de edificios existentes de la ENM mediante mediciones in situ.
2. Analizar las características geológicas y geotécnicas del terreno a partir de la información disponible, con el fin de comprender su influencia en la presencia y movilidad del radón.
3. Clasificar las concentraciones de radón obtenidas en el suelo en función de su nivel, facilitando su interpretación.
4. Estimar la permeabilidad del terreno en los distintos puntos de estudio a partir del tipo de suelo identificado.
5. Determinar el potencial de radón del terreno mediante la aplicación de métodos estandarizados.
6. Estudiar la posible relación entre la concentración de radón y las variables meteorológicas registradas durante las mediciones.

La consecución de estos objetivos permitirá mejorar el conocimiento del comportamiento del radón en el subsuelo de la ENM y contribuir a la evaluación del riesgo asociado, proporcionando una base para la futura implementación de medidas de prevención en edificaciones tanto existentes como futuras.

1.3 Metodología y estructura de la memoria

En el presente apartado se expone de forma general la estructura y metodología seguida para la realización de este Trabajo de Fin de Grado, sirviendo además como guía del desarrollo de esta memoria.

En el Capítulo 2 se describen los fundamentos teóricos relacionados con el gas radón, incluyendo su origen, mecanismos de generación y transporte en el subsuelo, así como su entrada en el interior de los edificios. Asimismo, se abordan las principales técnicas de medición, la normativa vigente y procedimientos estandarizados de medición de concentración de radón en el gas del suelo y de la determinación del potencial de radón, a través de un análisis de la bibliografía existente sobre la materia.

En el Capítulo 3 se detallan los equipos de medida utilizados, así como la metodología empleada para la adquisición de datos. También se describen los criterios de selección de los puntos de muestreo y el procedimiento seguido durante la campaña de mediciones.

En el Capítulo 4 se presentan y analizan los resultados obtenidos, incluyendo la distribución espacial de la concentración de radón en el gas del suelo en el recinto de la ENM, su clasificación en distintos niveles y la estimación del potencial de radón. Asimismo, se estudia la variación temporal de la concentración en un punto fijo y su posible relación con las variables meteorológicas.

Finalmente, en el Capítulo 5 se recogen las principales conclusiones derivadas del estudio, así como posibles líneas futuras de investigación orientadas a profundizar en el conocimiento del comportamiento del radón en el subsuelo y su relación con la concentración medida en el interior de los edificios.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El gas radón

2.1.1 Origen y su cadena de desintegración

El radón (Rn-222) es un gas noble radiactivo de origen natural que se genera en el subsuelo como consecuencia de la desintegración del radio-226, perteneciente a la serie radiactiva del uranio-238. Como se observa en la Figura 2-1, el radón constituye una etapa intermedia dentro de una cadena de transformaciones nucleares que comienza en el uranio-238 y finaliza en el plomo estable (Pb-206). En este proceso se suceden múltiples radionucleidos emisores alfa y beta, entre ellos torio, actinio, radio y finalmente radón, cuya naturaleza gaseosa le confiere la capacidad de abandonar la matriz mineral y migrar a través del medio poroso del terreno. Esta posición intermedia en la cadena de desintegración explica su generación continua en la corteza terrestre y su relevancia desde el punto de vista radiológico [1].

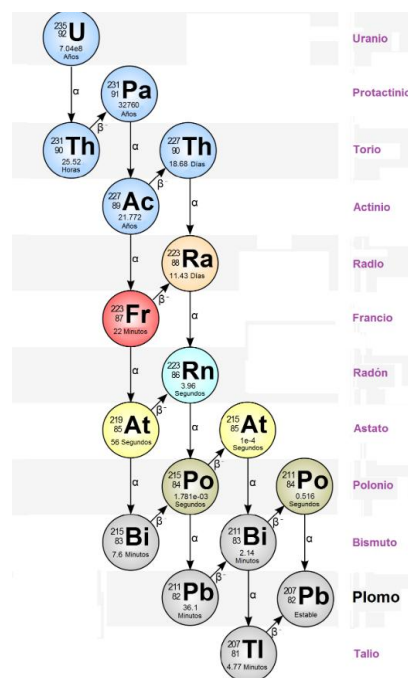


Figura 2-1 Cadena de desintegración del Uranio [4].

El isótopo Rn-222 posee una vida media de 3,82 días, lo que le confiere suficiente estabilidad para desplazarse desde su punto de generación en el interior de los granos minerales hasta los poros del suelo

y, eventualmente, alcanzar la superficie o penetrar en edificaciones. Tras su formación, el radón continúa su cadena de desintegración generando descendientes sólidos de vida corta, principalmente Po-218, Pb-214, Bi-214 y Po-214, los cuales son emisores alfa y beta y tienen especial relevancia desde el punto de vista radiológico [10].

Desde el punto de vista físico, el radón es un gas incoloro, inodoro e insípido, lo que dificulta su detección sin instrumentación específica. Al tratarse de un gas noble, no reacciona químicamente con otros elementos del entorno, por lo que su movilidad en el suelo depende fundamentalmente de procesos físicos como la difusión y la convección. Su capacidad de acumulación en espacios confinados se debe tanto a su generación continua en el terreno como a su limitada ventilación en determinados ambientes[6].

En el ámbito de la medición radiométrica, la determinación de la concentración de radón se basa habitualmente en la detección de sus descendientes de vida corta, especialmente el Po-218 y el Po-214, mediante espectrometría alfa. Este principio de medida permite cuantificar la actividad del gas a partir del recuento de partículas alfa emitidas por dichos radionucleidos en equilibrio con el radón presente en la cámara de detección [11].

2.1.2 Presencia del radón en suelos y rocas graníticas

El radón se encuentra de forma natural en el subsuelo como consecuencia de la desintegración del radio presente en los minerales que contienen uranio. Una vez generado en el interior de los granos minerales, el gas puede liberarse hacia los poros del suelo y acumularse en el aire intersticial, constituyendo lo que se denomina radón en gas del suelo. La concentración alcanzada depende tanto del contenido en uranio del material geológico como de la capacidad del terreno para permitir su migración [12].

La distribución del uranio en la corteza terrestre no es homogénea, siendo más elevada en determinadas litologías ígneas y metamórficas, especialmente en rocas graníticas, granodioritas y gneises. Estas formaciones presentan concentraciones superiores de uranio y radio en comparación con materiales sedimentarios comunes, lo que favorece una mayor producción de radón. En consecuencia, las áreas asentadas sobre macizos graníticos suelen asociarse a niveles elevados de radón en el suelo y, potencialmente, en edificaciones [13].

La experiencia española en el diseño de campañas de medición ha puesto de manifiesto la fuerte relación existente entre litología y probabilidad de superar niveles elevados de radón en interiores. Los estudios basados en información geogénica han demostrado que determinadas unidades litoestratigráficas presentan una mayor proporción de viviendas con concentraciones superiores a 300 Bq/m³, lo que refuerza la importancia de la geología como parámetro predictor del riesgo [13].

En el contexto del noroeste peninsular, la abundancia de formaciones graníticas y metamórficas convierte a esta región en un área de especial interés desde el punto de vista del radón. Como se aprecia en la Figura 2-2, correspondiente a la cartografía nacional de zonas con mayor probabilidad de presentar concentraciones elevadas, amplias áreas del noroeste, incluida Galicia, aparecen clasificadas como territorios prioritarios de actuación. Esta distribución espacial guarda una estrecha relación con la geología dominante, caracterizada por macizos graníticos y estructuras fracturadas que favorecen tanto la generación de radón, por su contenido en uranio, como su migración a través del medio poroso del terreno. En este escenario, la caracterización del potencial de radón del suelo adquiere un valor preventivo relevante en suelos edificables situados en estas zonas [14].

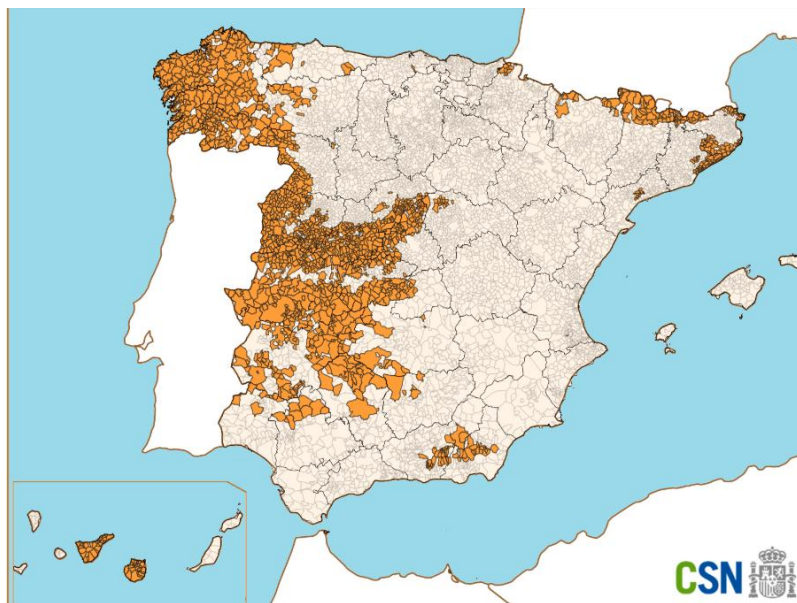


Figura 2-2 Mapa de zonificación por municipio del radón [15].

Además del contenido en uranio, las características físicas del suelo derivado de estas rocas, como la granulometría, la porosidad y la fracturación, influyen directamente en la acumulación de radón en el aire del suelo. Suelos desarrollados sobre granitos alterados suelen presentar estructuras que facilitan la circulación de gases, incrementando la probabilidad de que el radón alcance concentraciones elevadas en el subsuelo inmediato a las edificaciones [16].

2.1.3 Emanación del radón desde los granos minerales

El proceso de emanación del radón constituye la etapa inicial en la presencia de este gas en el suelo. Cuando el radio se desintegra, el átomo de radón resultante puede permanecer atrapado en la estructura cristalina del mineral o bien escapar hacia los poros del suelo si la desintegración ocurre en proximidad a la superficie del grano [12].

La fracción de radón que consigue liberarse desde el grano mineral hacia el espacio poroso se denomina coeficiente o factor de emanación. Este parámetro depende de características como el tamaño de grano, la micro fracturación, la presencia de agua en los poros y la distribución del radio en la matriz mineral. Materiales con mayor superficie específica o con estructuras más alteradas tienden a presentar mayores factores de emanación [16].

La humedad del suelo desempeña un papel relevante en el proceso de emanación. La presencia de agua en los poros puede facilitar la liberación del radón al reducir la probabilidad de que el átomo retroceda y vuelva a quedar atrapado en la matriz sólida tras el retroceso nuclear producido en la desintegración. Sin embargo, un grado de saturación elevado puede posteriormente limitar el transporte gaseoso del radón, afectando a su acumulación y migración [16].

En terrenos graníticos y metamórficos, donde el contenido en uranio y radio suele ser mayor, la producción de radón es más intensa, lo que incrementa la cantidad potencial de gas disponible para su emanación. No obstante, la concentración final en el suelo dependerá no solo de la tasa de generación, sino también de la eficiencia con la que el radón pueda liberarse y acumularse en el sistema poroso del terreno [17].

La emanación representa, por tanto, el vínculo entre la geología y la presencia efectiva de radón en el aire del suelo. El proceso se inicia en el interior de la roca con la desintegración del uranio y del radio, generando radón que, si logra escapar de la matriz mineral, puede incorporarse al sistema poroso del terreno y migrar hacia la superficie. Una vez liberado, el gas puede dispersarse en la atmósfera o penetrar en edificaciones a través de fisuras y discontinuidades estructurales, contribuyendo finalmente a la

exposición por inhalación cuando sus descendientes radiactivos se depositan en el aparato respiratorio. Sin este proceso de liberación inicial desde el grano mineral, el radón no podría incorporarse al medio poroso ni participar en los mecanismos de transporte posteriores, lo que pone de manifiesto que la comprensión de la emanación resulta esencial para interpretar la concentración medida en el suelo y su implicación en el riesgo radiológico asociado a edificaciones [12].

2.1.4 Transporte por difusión y convección

Una vez que el radón ha emanado desde los granos minerales hacia el espacio poroso del suelo, su desplazamiento en el medio se produce fundamentalmente mediante dos mecanismos físicos: la difusión y la convección. La difusión es un proceso pasivo impulsado por gradientes de concentración, por el cual el gas se desplaza desde zonas con mayor concentración hacia regiones con menor concentración, atravesando la red de poros interconectados del terreno. Este mecanismo resulta especialmente relevante en suelos de baja permeabilidad, donde el movimiento del aire es limitado y el transporte advectivo es reducido [16].

La difusión del radón está condicionada por parámetros como la porosidad efectiva, la tortuosidad del medio poroso y el grado de saturación del suelo. A mayor conectividad entre poros y menor contenido de agua, mayor será el coeficiente de difusión efectivo del gas. Por el contrario, suelos con elevada fracción fina o alta humedad reducen la movilidad difusiva, limitando el alcance del radón antes de su desintegración [16].

El transporte convectivo o advectivo, por su parte, se produce cuando existen gradientes de presión que generan un flujo de aire en el interior del suelo. Este mecanismo puede ser significativamente más eficiente que la difusión y es el principal responsable de la entrada de radón en edificaciones. Diferencias de presión entre el interior del edificio y el terreno subyacente, así como variaciones meteorológicas externas, pueden inducir un flujo dirigido de gas que arrastra el radón hacia zonas de menor presión [3].

La permeabilidad del terreno desempeña un papel clave en el transporte convectivo, ya que determina la facilidad con la que el gas puede desplazarse a través del medio poroso. Terrenos con alta permeabilidad permiten mayores tasas de flujo bajo un mismo gradiente de presión, incrementando la probabilidad de que el radón alcance la superficie o penetre en edificaciones. Esta interacción entre concentración y permeabilidad justifica que ambos parámetros se consideren conjuntamente en la evaluación del potencial de radón del suelo [18], [19].

Además, las condiciones meteorológicas, como las variaciones de presión atmosférica y temperatura, pueden modificar temporalmente los gradientes de presión entre el suelo y la atmósfera, influyendo en la intensidad del transporte convectivo. Estas fluctuaciones contribuyen a la variabilidad temporal de las concentraciones medidas en el suelo y en interiores, aspecto que debe tenerse en cuenta en la interpretación de campañas de medición [12].

2.1.5 Influencia de la porosidad, permeabilidad y humedad del suelo

La porosidad del suelo define el volumen de espacios vacíos disponibles para el almacenamiento y circulación de gases en el medio poroso. Una mayor porosidad implica, en principio, una mayor capacidad para albergar radón en fase gaseosa; sin embargo, no solo es relevante la cantidad de poros, sino también su grado de interconexión. La porosidad efectiva, es decir, aquella que permite el flujo continuo de gas, condiciona directamente la acumulación y el transporte del radón en el subsuelo [16].

La permeabilidad, por su parte, representa la facilidad con la que un fluido puede desplazarse a través del terreno bajo la acción de un gradiente de presión. En el caso del radón, una permeabilidad elevada favorece el transporte convectivo desde el subsuelo hacia la superficie o hacia el interior de edificaciones. Por ello, la permeabilidad se considera un parámetro decisivo en la evaluación del riesgo asociado al radón, especialmente cuando se combina con la concentración medida en el gas del suelo [18], [19].

La humedad del suelo ejerce una influencia dual sobre el comportamiento del radón. Por un lado, una cierta presencia de agua en los poros puede incrementar el factor de emanación, al facilitar la liberación del radón desde los granos minerales hacia el medio poroso. Por otro lado, cuando el grado de saturación aumenta de forma significativa, el agua reduce la fracción de poros disponibles para el flujo gaseoso, disminuyendo tanto la difusión como la convección del radón [16].

En suelos derivados de rocas graníticas alteradas, donde la estructura puede presentar fracturación y una granulometría variable, la combinación de alta porosidad y elevada permeabilidad puede generar condiciones favorables para la migración del radón. No obstante, variaciones locales en la compactación o en el contenido de finos pueden modificar sustancialmente estas propiedades, introduciendo heterogeneidad en la distribución espacial del gas [17].

La interacción entre porosidad, permeabilidad y humedad explica en gran medida la variabilidad observada en las concentraciones de radón en el suelo, incluso dentro de una misma unidad geológica. Por ello, la interpretación de los resultados de medición debe considerar no solo la litología, sino también las condiciones físicas del terreno en el momento de la campaña, especialmente cuando se trata de suelos destinados a edificación [14].

2.1.6 Importancia del radón como problema de salud pública

El radón constituye la principal fuente de exposición a radiación ionizante de origen natural para la población general a nivel mundial. Según las evaluaciones realizadas por el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), la contribución del radón y sus descendientes a la dosis efectiva anual supera ampliamente a la procedente de otras fuentes naturales, como la radiación cósmica o los radionucleidos presentes en alimentos y agua. Esta circunstancia sitúa al radón como un elemento prioritario dentro de las estrategias de protección radiológica frente a fuentes naturales [12].

Desde el punto de vista epidemiológico, la exposición prolongada a concentraciones elevadas de radón en interiores se asocia a un incremento significativo del riesgo de cáncer de pulmón. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) reconoce al radón como la segunda causa de cáncer de pulmón tras el tabaquismo, estableciendo modelos de riesgo basados en estudios de cohortes expuestas y en análisis combinados de estudios residenciales. La probabilidad de desarrollar cáncer aumenta de forma aproximadamente lineal con la concentración media de radón a largo plazo [10].

La Organización Mundial de la Salud (OMS)[20] ha subrayado la necesidad de implementar políticas nacionales de control del radón, recomendando la adopción de niveles de referencia en viviendas y lugares de trabajo. El carácter incoloro, inodoro e insípido del gas dificulta su percepción sin instrumentación específica, lo que implica que la exposición puede producirse de manera inadvertida durante largos periodos de tiempo. Esta característica convierte al radón en un riesgo ambiental silencioso que requiere estrategias sistemáticas de identificación y mitigación [21].

En el ámbito europeo y nacional, la creciente evidencia científica sobre los efectos del radón ha motivado la incorporación de niveles de referencia en la normativa de protección radiológica. La fijación de valores de actuación, junto con el desarrollo de planes nacionales contra el radón, responde a la necesidad de reducir la exposición de la población, especialmente en zonas con mayor potencial geogénico. Estas medidas reflejan el reconocimiento institucional del radón como problema de salud pública relevante y prevenible[5].

La consideración del radón como riesgo sanitario no se limita al ámbito interior, sino que implica también la evaluación del terreno como fuente primaria del gas. Dado que la principal vía de entrada del radón en edificios es el suelo subyacente, la caracterización del potencial de radón en suelos edificables adquiere un papel fundamental dentro de las estrategias preventivas. De este modo, la medición en el terreno no solo tiene un interés geológico, sino que se integra dentro de un enfoque de protección radiológica orientado a minimizar la exposición futura de los ocupantes [10].

2.2 Potencial de radón del terreno

2.2.1 Definición de radón en el suelo

El radón en el suelo se define como la concentración de radón presente en el aire intersticial que ocupa los poros del terreno, resultado de la emanación del gas desde los granos minerales que contienen radio-226. Esta concentración, expresada habitualmente en Bq/m³ de gas del suelo, representa la actividad volumétrica del radón en la fase gaseosa del medio poroso y constituye la fuente primaria del gas que puede incorporarse al interior de las edificaciones. La mayor parte del radón que se acumula en los edificios procede del terreno subyacente, penetrando a través de grietas en soleras, juntas constructivas y pasos de instalaciones, mientras que otras fuentes como materiales de construcción o agua suelen tener una contribución secundaria. Esta representación esquemática refuerza la importancia de la caracterización del radón en el suelo como parámetro clave para evaluar el riesgo en suelos edificables [16].

El proceso que da lugar a la presencia de radón en el suelo comienza con la desintegración del radio en el interior de los minerales. Una fracción del radón generado consigue escapar del grano mineral hacia el espacio poroso, fenómeno conocido como emanación. Una vez en los poros, el gas puede acumularse y desplazarse en función de las propiedades físicas del terreno, estableciendo un equilibrio dinámico entre producción, transporte y desintegración [12].

La concentración de radón en el suelo no depende únicamente del contenido en uranio del material geológico, sino también de la permeabilidad del terreno, que condiciona la facilidad con la que el gas puede migrar. Por este motivo, algunos modelos de evaluación del riesgo combinan la concentración medida en el gas del suelo con la permeabilidad para estimar el denominado potencial de radón del terreno, integrando generación y capacidad de transporte en un único parámetro [18], [19].

Es importante diferenciar la concentración de radón en el suelo de la concentración en aire interior. Mientras que esta última está influenciada por factores constructivos, ventilación y hábitos de uso del edificio, la concentración en el suelo refleja de forma más directa la capacidad intrínseca del terreno para actuar como fuente de radón. Por ello, el radón en el suelo se considera un parámetro geogénico más estable y representativo del potencial natural del emplazamiento [17].

Aunque el radón puede encontrarse también en agua subterránea y en determinados materiales de construcción, la principal vía de entrada en edificaciones es el terreno subyacente. La diferencia de presión entre el interior del edificio y el suelo favorece el flujo del gas desde el subsuelo hacia los espacios habitables, lo que sitúa al suelo como el origen predominante del problema en la mayoría de los casos residenciales [3].

En consecuencia, la medición de la concentración de radón en el suelo adquiere un valor preventivo en suelos edificables, ya que permite evaluar la fuente primaria antes de la construcción. Esta aproximación facilita la adopción de medidas de diseño adecuadas en función del potencial identificado, integrando la caracterización geogénica dentro de la planificación radiológica y constructiva [10].

2.2.2 Relación entre concentración de radón en el suelo y la permeabilidad del terreno

La concentración de radón en el gas del suelo está directamente influenciada por las propiedades físicas del terreno, siendo la permeabilidad uno de los parámetros más determinantes. Como se observa en la Figura 2-3, el proceso comienza con la emanación del radón desde los granos minerales hacia los poros del suelo y continúa con su transporte a través del medio poroso, principalmente por difusión y, en determinadas condiciones, por convección. La permeabilidad describe la capacidad del suelo para permitir el flujo de gases a través de esa red interconectada de poros y fracturas, expresándose habitualmente en m² cuando se determina mediante mediciones directas in situ. Un terreno con elevada permeabilidad facilita el desplazamiento del radón hacia capas superiores y potencialmente hacia el interior de edificaciones, mientras que factores como la humedad, el tamaño de grano o la composición

del suelo, también representados en la figura, modulan tanto la emanación como el transporte del gas [18], [19].

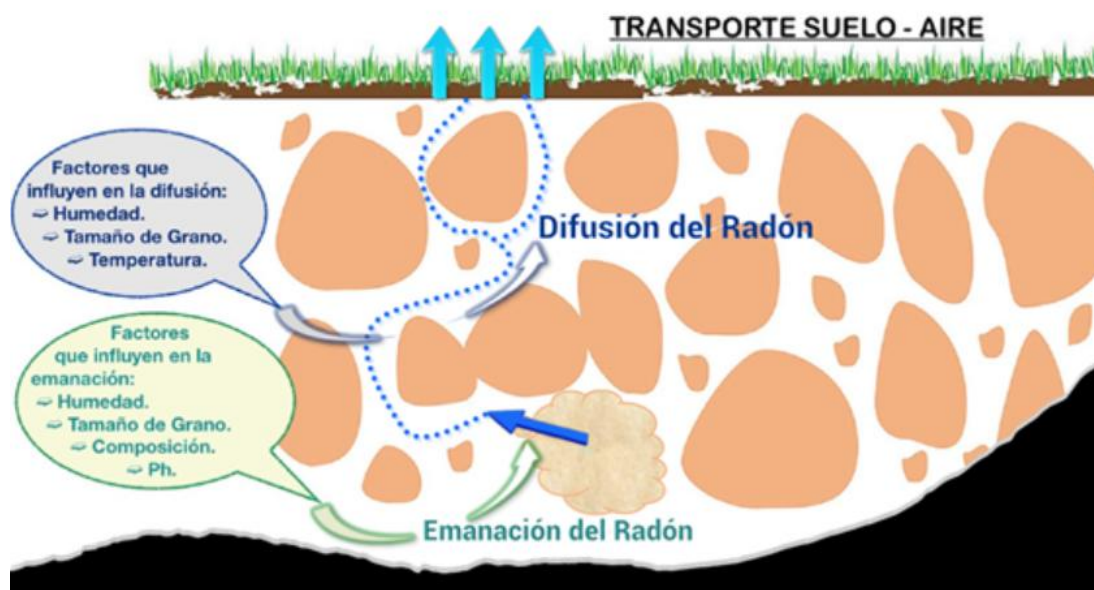


Figura 2-3 Procesos de emanación y exhalación del radón [15].

No obstante, una elevada concentración de radón en el suelo no implica necesariamente un mayor riesgo si el terreno presenta una permeabilidad muy baja, ya que el gas puede quedar parcialmente retenido en los poros sin alcanzar fácilmente la superficie. Por el contrario, terrenos con concentraciones moderadas pero alta permeabilidad, pueden permitir un flujo significativo de radón hacia el interior de los edificios debido a diferencias de presión entre el subsuelo y el ambiente interior. Esta interacción entre generación y transporte explica la necesidad de considerar ambos factores conjuntamente [17].

Desde el punto de vista físico, la permeabilidad está relacionada con la granulometría, la porosidad efectiva y el grado de fracturación del terreno. Suelos derivados de granitos alterados, con estructuras más abiertas o fracturadas, tienden a presentar mayores valores de permeabilidad que materiales arcillosos compactos, lo que influye directamente en el mecanismo de transporte del radón. Por ello, la caracterización del terreno no debe limitarse a la medición de la concentración, sino que debe incorporar el análisis de sus propiedades geotécnicas [16].

En el contexto de la evaluación de suelos edificables, la consideración conjunta de concentración y permeabilidad permite estimar con mayor precisión el potencial de radón del emplazamiento. Esta aproximación resulta especialmente relevante en áreas con litologías graníticas, donde la combinación de contenido en uranio y elevada permeabilidad puede generar condiciones favorables para la migración del radón hacia las futuras edificaciones [14].

2.2.3 Diferencia y relación entre concentración de radón en interiores y concentración de radón del suelo como parámetro predictivo

La concentración de radón en interiores representa el resultado final de un conjunto de procesos que incluyen la generación del gas en el terreno, su transporte hacia la edificación y su acumulación en espacios habitables. A diferencia de la concentración en el suelo, que depende principalmente de factores geológicos y geotécnicos, la concentración en el interior de los edificios está fuertemente influenciada por características constructivas, tasas de ventilación, estanqueidad de la envolvente y hábitos de ocupación [3].

Desde el punto de vista radiológico, el riesgo para la salud está directamente asociado a la concentración media anual en interiores, ya que es en este entorno donde se produce la inhalación de los descendientes de vida corta del radón. Sin embargo, esta concentración interior no refleja únicamente la

capacidad del terreno para generar radón, sino también las condiciones específicas del edificio, lo que introduce una variabilidad adicional que puede dificultar la interpretación geogénica del fenómeno [10].

Diversos estudios europeos han analizado la relación estadística entre la concentración de radón en el gas del suelo y la concentración medida en edificios situados sobre el mismo emplazamiento. Estos trabajos muestran que existe una correlación general entre ambos parámetros, aunque no siempre lineal, ya que intervienen factores como la permeabilidad, la presencia de fisuras y la diferencia de presión entre el interior y el subsuelo como ya hemos comentado anteriormente. La medición en el suelo permite, por tanto, estimar el potencial geogénico, mientras que la medición en interiores cuantifica el efecto combinado de fuente y edificio [17].

En este contexto, el radón en el suelo se considera un parámetro predictivo porque caracteriza la fuente primaria del gas antes de que intervengan las variables constructivas. A diferencia de la medición en interiores, que puede variar significativamente con el tiempo y con las condiciones de ventilación, la concentración en el suelo presenta una mayor estabilidad relativa y está más directamente vinculada a la naturaleza del terreno. Esta característica lo convierte en una herramienta útil para la evaluación preventiva en suelos edificables [18], [19].

Aunque el radón puede encontrarse también en agua subterránea y en materiales de construcción, su contribución a la concentración en interiores suele ser secundaria en comparación con la aportación procedente del terreno. La principal vía de entrada del gas es el flujo desde el suelo a través de fisuras, juntas de construcción y pasos de instalaciones, impulsado por gradientes de presión. Por ello, la caracterización del radón en el suelo permite abordar el problema en su origen, facilitando la adopción de soluciones constructivas adaptadas al potencial identificado [3].

En consecuencia, mientras que la medición en interiores es imprescindible para evaluar la exposición real de los ocupantes, la medición en el suelo adquiere un valor estratégico en la fase previa a la construcción. Como se aprecia en la Figura 2-4, amplias zonas del noroeste peninsular aparecen clasificadas como áreas de alto riesgo, lo que evidencia la existencia de territorios donde el potencial geogénico del terreno es especialmente elevado. En estos contextos, la determinación del potencial de radón del suelo permite anticipar el riesgo antes de la edificación y diseñar medidas constructivas preventivas proporcionales al nivel identificado, integrando así la protección radiológica dentro de la planificación de suelos edificables y reduciendo la probabilidad de superar los niveles de referencia en interiores[5].

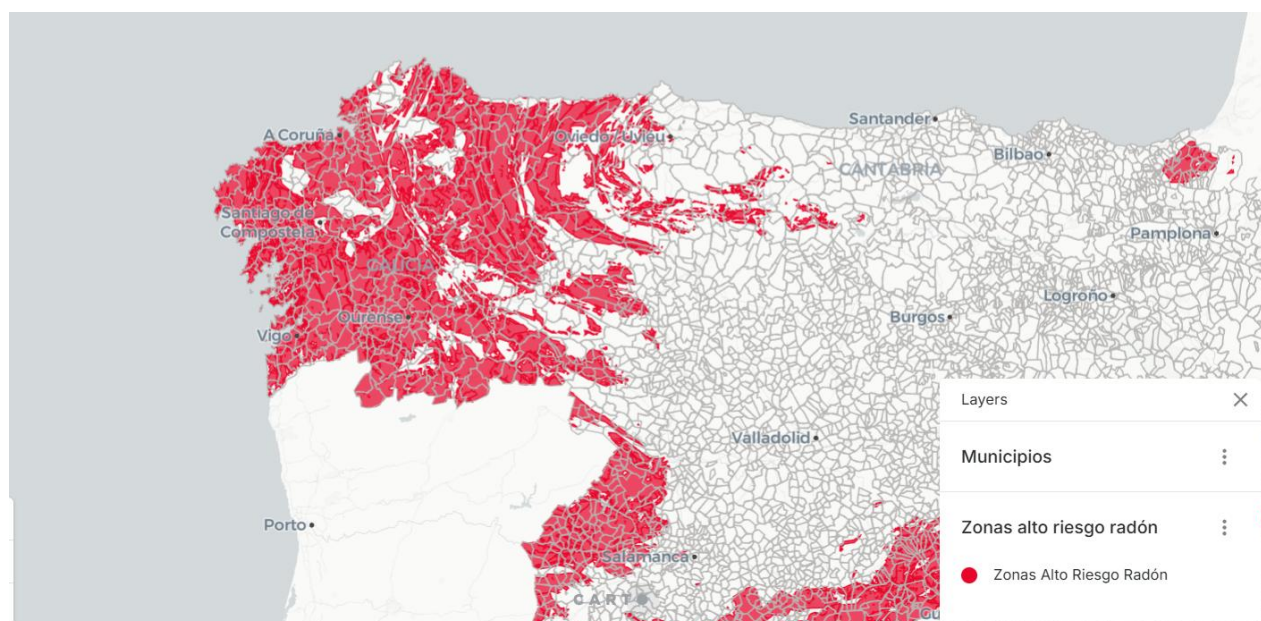


Figura 2-4 Zonas de alto potencial de radón en el noroeste de la Península Ibérica [22].

2.2.4 Transferencia del radón desde el suelo a edificios

El radón presente en el suelo puede penetrar en las edificaciones a través de diversos mecanismos asociados a diferencias de presión entre el interior del edificio y el terreno subyacente. Como se muestra en la Figura 2-5, el gas asciende desde el subsuelo aprovechando fisuras en la solera, juntas de dilatación, encuentros entre elementos estructurales, pasos de instalaciones, cámaras de aire o huecos de escaleras, constituyendo múltiples vías potenciales de entrada. En condiciones habituales, los edificios presentan una ligera depresión respecto al suelo debido a efectos térmicos, ventilación y funcionamiento de instalaciones, lo que favorece el flujo convectivo del gas desde el subsuelo hacia el interior. Este fenómeno, conocido como efecto chimenea o *stack effect*, constituye uno de los principales impulsores de la entrada de radón, al generar un gradiente de presión que facilita la migración del gas hacia los espacios habitables [3].

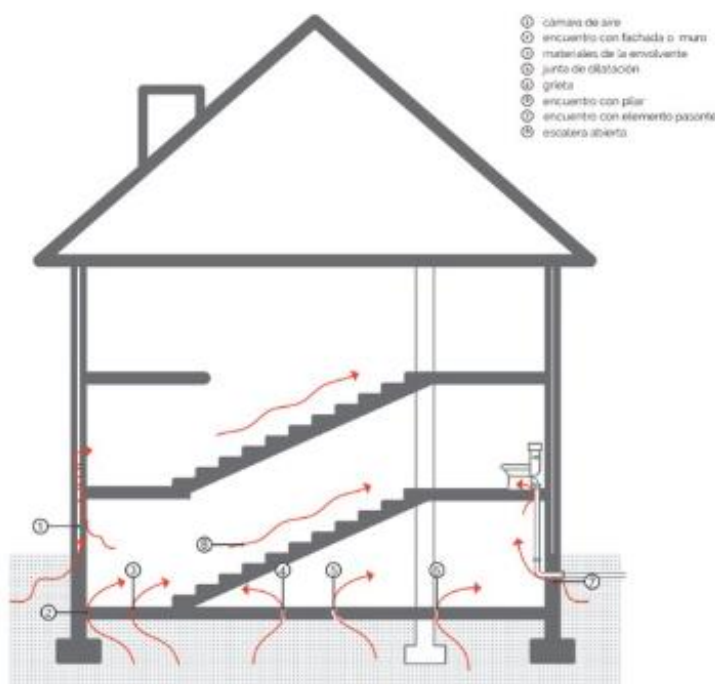


Figura 2-5 Vías de inmisión del gas radón en edificaciones [17].

Las vías de entrada más comunes incluyen fisuras en soleras y cimentaciones, juntas constructivas, pasos de instalaciones, cámaras sanitarias mal ventiladas y contactos imperfectos entre el terreno y la estructura del edificio. La magnitud del flujo dependerá tanto de la concentración de radón en el suelo como de la permeabilidad del terreno y de la estanqueidad de la envolvente constructiva. Por tanto, el riesgo en interiores es el resultado de la interacción entre la fuente geogénica y las características del edificio [10].

Desde el punto de vista preventivo, la caracterización del radón en el suelo permite anticipar la probabilidad de que se produzcan concentraciones elevadas en edificaciones futuras. En aquellos terrenos clasificados como de mayor potencial, pueden adoptarse medidas constructivas específicas, tales como barreras antirradón, láminas impermeables al gas o sistemas de despresurización del subsuelo, reduciendo la entrada del radón antes de que alcance los espacios habitables[5].

Los modelos que combinan concentración de radón en el suelo y permeabilidad del terreno, como el desarrollado en la República Checa, permiten clasificar el riesgo de parcelas edificables en categorías que orientan la adopción de soluciones técnicas proporcionales. Esta aproximación vincula directamente la evaluación geogénica del terreno con el diseño constructivo, integrando la protección radiológica en la fase previa a la edificación [18], [19].

En consecuencia, el conocimiento de la cantidad de radón presente en el suelo no solo tiene valor descriptivo, sino que constituye una herramienta de planificación y prevención en suelos edificables. La

determinación del potencial de radón del terreno permite reducir la incertidumbre asociada al comportamiento futuro del edificio y adoptar medidas de protección adaptadas al nivel de riesgo identificado [17].

2.2.5 Factores geológicos: litología y contenido en uranio

La litología constituye uno de los factores primarios que condicionan la presencia y concentración de radón en el suelo, dado que determina el contenido en uranio y radio de las formaciones geológicas. El uranio-238, distribuido de manera natural en la corteza terrestre, es el origen último del radón a través de su cadena de desintegración. Por tanto, las variaciones en la composición mineralógica del terreno influyen directamente en la tasa de generación del gas [12].

Las rocas ígneas ácidas, especialmente granitos y granodioritas, suelen presentar concentraciones superiores de uranio en comparación con materiales sedimentarios comunes. Del mismo modo, determinadas rocas metamórficas como gneises o migmatitas pueden mostrar contenidos elevados de radionucleidos naturales. Esta característica explica que las áreas desarrolladas sobre macizos graníticos se asocien frecuentemente a mayores concentraciones de radón tanto en el suelo como en edificaciones [17].

En el ámbito español, la utilización de información litoestratigráfica en el diseño de campañas de medición ha permitido identificar unidades geológicas con mayor probabilidad de superar niveles de referencia en interiores. Los estudios basados en esta aproximación evidencian que la geología es un indicador eficaz para la clasificación preliminar del riesgo, reforzando la relación entre tipo de roca y potencial de generación de radón [13].

El contenido en uranio no es homogéneo incluso dentro de una misma litología, pudiendo variar en función de procesos de alteración hidrotermal, fracturación o concentración diferencial de minerales portadores de radio. Estas variaciones locales pueden generar diferencias significativas en la concentración de radón en el suelo a escala de parcela, lo que introduce heterogeneidad espacial dentro de una misma unidad cartográfica [14].

En regiones como el noroeste peninsular, caracterizadas por la abundancia de rocas graníticas y metamórficas, el control litológico adquiere especial relevancia en la evaluación del potencial de radón en suelos edificables. La combinación de elevado contenido en uranio y condiciones estructurales favorables puede dar lugar a terrenos con mayor capacidad de generación y liberación de radón, lo que justifica la necesidad de su caracterización específica en emplazamientos concretos [17].

2.2.6 Factores meteorológicos influyentes

Además de los factores geológicos, las condiciones meteorológicas pueden llegar a influir en la variabilidad temporal de la concentración de radón en el suelo. Las fluctuaciones de presión atmosférica pueden modificar los gradientes de presión entre el subsuelo y la superficie, favoreciendo o dificultando el flujo convectivo del gas. Descensos bruscos de presión atmosférica pueden incrementar temporalmente la emisión de radón desde el suelo, al reducir la resistencia al flujo hacia capas superiores [12].

La temperatura también desempeña un papel relevante en el comportamiento del radón. Diferencias térmicas entre el interior del suelo y la atmósfera pueden generar movimientos convectivos que influyen en la migración del gas. Asimismo, las variaciones estacionales pueden alterar las condiciones de ventilación natural en edificaciones, modificando indirectamente la concentración interior sin que necesariamente varíe de forma proporcional la generación geogénica del radón en el terreno [3].

Las precipitaciones afectan principalmente al grado de saturación del suelo y, por tanto, a la fracción de poros disponibles para el transporte gaseoso. Un incremento en la humedad puede reducir la permeabilidad efectiva para el flujo de gas, limitando temporalmente el transporte convectivo, aunque al mismo tiempo puede favorecer el proceso de emanación. Esta interacción compleja puede dar lugar a variaciones en la concentración de radón en el suelo asociadas a episodios de lluvia [16].

La influencia conjunta de presión, temperatura y humedad contribuye a la variabilidad temporal observada en campañas de medición de radón en suelo. Estudios de intercomparación han evidenciado que las concentraciones pueden experimentar oscilaciones en función de las condiciones ambientales durante el periodo de muestreo, lo que resalta la importancia de considerar el contexto meteorológico en la interpretación de resultados [23].

En consecuencia, aunque el potencial geogénico del terreno constituye un factor relativamente estable, la concentración medida en un momento concreto puede reflejar condiciones ambientales transitorias. Esta circunstancia debe tenerse en cuenta en la planificación de estudios en suelos edificables, especialmente cuando se pretende comparar resultados obtenidos en distintas campañas o estaciones del año [14].

2.2.7 Importancia para la planificación y protección radiológica

La incorporación del estudio del radón en el suelo dentro de los procesos de planificación territorial y urbanística permite integrar la protección radiológica en fases tempranas del desarrollo constructivo. Desde un enfoque preventivo, la identificación de terrenos con mayor potencial geogénico facilita la adopción de medidas técnicas proporcionadas al nivel de riesgo, evitando intervenciones correctoras posteriores que suelen resultar más complejas y costosas [10].

Los programas nacionales de acción frente al radón contemplan la necesidad de identificar zonas prioritarias y promover medidas de mitigación en edificios existentes; sin embargo, la planificación previa basada en la caracterización del terreno permite actuar de forma más eficiente. Este enfoque refuerza el principio de optimización en protección radiológica, orientado a mantener las exposiciones tan bajas como razonablemente sea posible[5].

La evaluación del potencial de radón en suelos edificables contribuye además a la toma de decisiones técnicas en el diseño de cimentaciones, sistemas de ventilación del subsuelo y barreras antirradón. Cuando el riesgo se identifica antes de la construcción, las soluciones pueden incorporarse de manera integrada en el proyecto arquitectónico, reduciendo la probabilidad de superar niveles de referencia en el futuro [3].

En aquellos países donde la clasificación del terreno forma parte del procedimiento previo a la edificación, el vínculo entre planificación y protección radiológica se establece de forma explícita. La asignación de categorías de riesgo en función del potencial de radón del suelo permite definir requisitos constructivos mínimos adaptados a cada situación, asegurando un enfoque sistemático de prevención [18], [19].

Desde una perspectiva estratégica, la integración del estudio del radón en suelo dentro de la planificación territorial refuerza la gestión del riesgo a largo plazo, al actuar sobre la fuente primaria del gas. En regiones con litologías favorables a la generación de radón, esta aproximación resulta especialmente relevante para garantizar que el desarrollo urbanístico se realice bajo criterios de seguridad radiológica, minimizando la exposición futura de la población [14].

2.3 Marco normativo y criterios de referencia

2.3.1 Normativa europea y española

La regulación del radón en el ámbito europeo se consolidó con la aprobación de la Directiva 2013/59/Euratom, por la que se establecen normas básicas de seguridad para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. Esta directiva introdujo la obligación para los Estados miembros de establecer niveles de referencia para la concentración de radón en recintos cerrados y de desarrollar planes nacionales destinados a gestionar el riesgo asociado a este gas, reconociendo explícitamente su impacto sanitario [10].

En aplicación de dicha directiva, los Estados miembros deben fijar un nivel de referencia nacional que no supere los 300 Bq/m³ como concentración media anual en viviendas y lugares de trabajo. Este

valor no constituye un límite de seguridad absoluto, sino un nivel a partir del cual deben adoptarse medidas correctoras para reducir la exposición. La adopción de este criterio responde a la evidencia científica acumulada sobre el incremento del riesgo de cáncer de pulmón asociado a concentraciones prolongadas superiores a dicho umbral [3].

En España, la transposición del marco europeo se ha materializado mediante el desarrollo del Plan Nacional contra el Radón, que establece líneas estratégicas de actuación orientadas a la identificación de zonas prioritarias, la medición en edificios y la implantación de medidas correctoras cuando se superan los niveles de referencia. Este plan constituye el instrumento básico de planificación estatal en materia de radón y articula la coordinación entre administraciones públicas [5].

Además del ámbito de protección radiológica general, la normativa española ha incorporado criterios específicos en el sector de la edificación. En zonas clasificadas como de mayor potencial de radón, se establecen exigencias constructivas destinadas a limitar la entrada del gas desde el terreno, tales como barreras antirradón o sistemas de ventilación del subsuelo. Estas medidas evidencian que el marco normativo reconoce al terreno como la principal fuente de radón en edificios y orienta las actuaciones preventivas hacia el control de la transferencia suelo-edificación[5].

No obstante, la normativa española centra sus obligaciones principalmente en la medición en interiores y en la adopción de medidas correctoras cuando se superan los niveles de referencia, mientras que la medición sistemática del radón en el suelo no se establece como requisito obligatorio general para la clasificación del territorio. Esta circunstancia introduce un debate técnico sobre la utilidad de la caracterización directa del terreno frente a la zonificación basada en modelos geogénicos y campañas de medición en edificios [13].

2.3.2 *Elaboración de mapas de suelo y clasificación según el potencial de radón*

La elaboración de mapas de radón constituye una herramienta fundamental para identificar áreas con mayor probabilidad de presentar concentraciones elevadas en edificios. En muchos países europeos, la zonificación se basa en la integración de información geológica, mediciones de radón en interiores y, en algunos casos, determinaciones de radón en gas del suelo. Este enfoque permite estimar el denominado potencial geogénico de radón, entendido como la capacidad intrínseca del terreno para generar y liberar radón hacia la superficie [14].

En España, los mapas actualmente empleados para la identificación de zonas prioritarias se han desarrollado principalmente a partir de campañas de medición en viviendas, combinadas con información litológica y datos procedentes del Mapa de Radiación Natural (MARNA)[24]. La experiencia española en el diseño de estas campañas ha demostrado que la litoestratigrafía constituye un indicador eficaz para predecir la probabilidad de superar determinados niveles de concentración en interiores, aunque la medición directa de radón en el suelo no se ha establecido como procedimiento sistemático obligatorio para la clasificación territorial [13].

En contraste, países como la República Checa han desarrollado metodologías específicas basadas en la medición directa del radón en gas del suelo y en la determinación de la permeabilidad del terreno para clasificar el riesgo asociado a parcelas edificables. El denominado Radon Index (RI) se calcula combinando la concentración de radón en el suelo y la permeabilidad, permitiendo clasificar los terrenos en categorías de bajo, medio o alto riesgo. Este sistema se emplea tanto en estudios de radon risk mapping como en la evaluación previa de parcelas destinadas a edificación [18], [19].

La metodología de potencial de radón (RP) introduce el concepto de Radon Potential (RP), definido matemáticamente a partir de la concentración de radón en suelo (cA) y la permeabilidad (k), estableciendo umbrales cuantitativos que permiten asignar una categoría de riesgo. Esta aproximación considera simultáneamente la capacidad de generación y la facilidad de transporte del gas, proporcionando una caracterización más directamente vinculada al comportamiento del terreno como fuente primaria del radón [18], [19].

La comparación entre ambos enfoques evidencia diferencias metodológicas relevantes: mientras que en España la zonificación se apoya mayoritariamente en resultados de mediciones en interiores y modelos geogénicos, en otros países europeos se incorpora la medición sistemática del radón en el suelo como herramienta directa de clasificación del riesgo en parcelas concretas. Esta diferencia resulta especialmente significativa en el contexto de suelos edificables, donde la caracterización previa del terreno puede facilitar la adopción de medidas constructivas preventivas ajustadas al nivel de riesgo identificado [17].

2.3.3 Limitaciones de la normativa frente a la variabilidad real del terreno

La zonificación del radón a escala regional o nacional se basa habitualmente en unidades geológicas amplias o en datos estadísticos agregados de concentraciones en interiores. Sin embargo, la heterogeneidad natural del terreno implica que dentro de una misma unidad cartográfica pueden existir variaciones significativas en el contenido en uranio, en el grado de fracturación y en las propiedades físicas del suelo, lo que puede traducirse en diferencias notables en la generación y migración del radón a escala local [14].

Los estudios europeos sobre potencial geogénico han puesto de manifiesto que la variabilidad espacial del radón puede ser elevada incluso dentro de áreas clasificadas bajo la misma categoría de riesgo. Factores como cambios litológicos locales, alteración del granito, presencia de fallas o variaciones en la permeabilidad pueden modificar sustancialmente el comportamiento del gas. Esta circunstancia limita la capacidad predictiva de los mapas cuando se pretende evaluar una parcela concreta destinada a edificación [17].

En el caso español, como ya se ha comentado, la normativa establece niveles de referencia en interiores y define zonas prioritarias de actuación, pero no impone con carácter general la obligación de medir el radón en el suelo antes de edificar. La clasificación territorial se apoya fundamentalmente en datos de concentración en viviendas y en modelos geogénicos, lo que puede no reflejar con precisión la variabilidad específica de un solar determinado[5].

Frente a este enfoque, metodologías como la desarrollada en la República Checa contemplan la evaluación directa del terreno mediante mediciones de concentración de radón en gas del suelo y determinación de la permeabilidad, permitiendo clasificar el riesgo a escala de parcela. Esta aproximación reduce la incertidumbre asociada a la extrapolación cartográfica y facilita la adopción de medidas constructivas proporcionales al nivel de riesgo identificado [18], [19].

Desde el punto de vista técnico, la variabilidad temporal también introduce incertidumbre adicional, ya que las concentraciones de radón en el suelo pueden verse influenciadas por factores como la humedad o las condiciones meteorológicas. Esta combinación de variabilidad espacial y temporal refuerza la necesidad de interpretar los mapas como herramientas orientativas y no como sustitutos de estudios in situ cuando se pretende caracterizar el potencial de radón en suelos edificables concretos [23].

2.4 Procedimientos e instrumentación de medida de radón

2.4.1 Generalidades de medidas de radón

La medición del radón puede realizarse mediante diferentes técnicas en función del medio de estudio, aire interior, gas del suelo o agua, y del objetivo de la campaña. En términos generales, los métodos se clasifican en técnicas pasivas y activas. Las técnicas pasivas no requieren alimentación eléctrica durante el periodo de exposición y suelen emplearse para determinar concentraciones medias a largo plazo, mientras que las técnicas activas utilizan dispositivos electrónicos que permiten la lectura en tiempo real y el registro continuo de datos [3].

En el ámbito de la medición en interiores, uno de los métodos más extendidos es el uso de detectores sólidos de trazas nucleares (por ejemplo, CR-39), que integran la concentración durante periodos

prolongados y posteriormente se analizan en laboratorio. Estos dispositivos resultan adecuados para la evaluación de la exposición media anual, aunque no permiten obtener información inmediata ni estudiar variaciones temporales de corta duración [3].

Las técnicas activas emplean monitores electrónicos basados en principios como la espectrometría alfa o la ionización en cámara cerrada. Estos equipos permiten medir concentraciones en intervalos ajustables, registrar parámetros ambientales asociados y obtener resultados con menor incertidumbre estadística cuando se seleccionan tiempos de integración adecuados. Además, posibilitan el análisis de la evolución temporal de la concentración, aspecto relevante en estudios de diagnóstico o investigación [11].

2.4.2 Sistemas de medida de radón en el suelo

En el caso específico del radón en el suelo, las mediciones se realizan habitualmente mediante sondas introducidas a una determinada profundidad, conectadas a dispositivos de aspiración que extraen el gas del subsuelo hacia el detector. Este procedimiento permite determinar la concentración en el aire intersticial del terreno y, en determinados métodos, evaluar simultáneamente la permeabilidad del suelo. La medición en suelo requiere considerar factores como la profundidad de muestreo, el sellado del punto de extracción y la estabilidad de las condiciones ambientales durante el ensayo [23].

En función del procedimiento empleado para la extracción del gas, pueden distinguirse distintos métodos de muestreo del radón en suelo. La documentación técnica contempla, en primer lugar, el muestreo activo continuo, en el que la sonda se conecta directamente al equipo de medida y el gas es aspirado de forma constante mediante una bomba integrada en el monitor. Este sistema permite obtener una evolución temporal de la concentración y es especialmente adecuado para estudios de caracterización puntual en campo. Por otro lado, también se describe el muestreo activo puntual, basado en la extracción de un volumen definido de gas mediante una jeringuilla o una bomba manual, que posteriormente se introduce en la cámara de detección. Este método permite un mayor control del volumen muestreado, aunque requiere una manipulación adicional del sistema. Finalmente, la normativa contempla el muestreo pasivo, en el que el detector se instala en el interior de un tubo previamente introducido en el terreno y el gas penetra por difusión, sin necesidad de succión mecánica. Cada uno de estos métodos presenta particularidades en cuanto a estabilidad, control del volumen extraído y representatividad de la muestra, por lo que su elección depende del objetivo del estudio y de las condiciones del terreno [11].

En términos de aplicabilidad, la elección del método depende del objetivo del estudio. Mientras que las técnicas pasivas resultan adecuadas para evaluar la exposición crónica en interiores, los monitores electrónicos activos ofrecen mayor versatilidad en estudios de suelo, investigaciones geofísicas y campañas donde se requiere un control detallado del tiempo de integración y de la incertidumbre asociada a la medida [11].

2.4.3 Sistemas de monitorización activa y pasiva para la determinación del potencial de radón en el terreno

Los equipos de medición de radón pueden clasificarse, de manera general, en detectores pasivos y monitores activos electrónicos. Los detectores pasivos, como los basados en trazas nucleares (CR-39), presentan la ventaja de su bajo coste, simplicidad operativa y capacidad para integrar concentraciones durante largos periodos, lo que los hace adecuados para la determinación de concentraciones medias anuales en interiores. Sin embargo, no permiten obtener resultados inmediatos ni analizar la variabilidad temporal, ya que requieren un procesamiento posterior en laboratorio [3].

Los monitores activos electrónicos, como los basados en cámaras de ionización o en espectrometría alfa entre ellos equipos comerciales como “ALPHAGUARD”, mostrado en la Figura 2-6 o dispositivos desarrollados por “SARAD”, como el mostrado en la Figura 2-7, permiten la medición en tiempo real y el registro continuo de datos. Estos sistemas incorporan cámaras de detección sensibles a las partículas

alfa emitidas por los descendientes del radón y suelen integrar bombas de muestreo, sensores ambientales y sistemas de almacenamiento digital, lo que posibilita ajustar el intervalo de integración y reducir la incertidumbre estadística mediante el aumento del tiempo de medida. Su versatilidad facilita una interpretación más detallada del comportamiento temporal del radón y su relación con variables ambientales. No obstante, presentan un coste superior al de los detectores pasivos y requieren alimentación eléctrica, mantenimiento y calibraciones periódicas para garantizar la trazabilidad y la fiabilidad metrológica de las mediciones [11].



Figura 2-6 Equipo AlphaGUARD [25].



Figura 2-7 - RTM-1688-2[5].

En la medición de radón en el suelo, los equipos activos resultan especialmente adecuados, ya que permiten controlar el proceso de muestreo mediante bombas integradas y ajustar el tiempo de integración para reducir la incertidumbre estadística. Además, algunos sistemas permiten combinar la determinación de concentración con la evaluación de la permeabilidad del terreno, proporcionando una caracterización más completa del potencial geogénico [18], [19].

En el caso de la medición en interiores, tanto técnicas pasivas como activas pueden ser apropiadas dependiendo del objetivo del estudio. Las técnicas pasivas son recomendadas para la evaluación de la exposición media anual, mientras que los monitores activos son preferibles cuando se requiere diagnosticar la eficacia de medidas correctoras, estudiar variaciones horarias o identificar rutas de entrada del gas [3].

La medición de radón en agua requiere técnicas específicas de desgasificación o transferencia a fase gaseosa, lo que introduce una etapa adicional en el procedimiento analítico. Aunque la presencia de radón disuelto puede contribuir a la concentración en interiores, su impacto suele ser menor que el derivado del flujo desde el suelo, por lo que su evaluación suele limitarse a contextos específicos como abastecimientos subterráneos [3].

Desde el punto de vista de la fiabilidad en la evaluación del potencial geogénico, la medición directa en el suelo presenta la ventaja de caracterizar la fuente primaria del radón, reduciendo la influencia de factores constructivos o de ventilación que afectan a las mediciones en interiores. Por ello, cuando el objetivo es determinar la capacidad intrínseca del terreno para generar y transportar radón, los equipos diseñados para medición en suelo ofrecen una aproximación más representativa del comportamiento geológico del emplazamiento [17].

2.4.4 *Procedimiento estandarizado de medición de radón en el suelo*

La norma *UNE-EN ISO 11665-11:2019* define los métodos para la determinación de la concentración de radón-222 en el gas del suelo. Esta norma describe los procedimientos de muestreo del gas presente en los poros del terreno mediante mediciones realizadas in situ a diferentes profundidades bajo la superficie, estableciendo los requisitos necesarios para obtener resultados representativos y comparables. Asimismo, recoge las condiciones que deben cumplir los sistemas de muestreo, así como las recomendaciones relativas al control de las condiciones de medición, la correcta definición de la profundidad de muestreo y la obtención de muestras representativas del gas presente en el suelo.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

En este apartado se describe el área de estudio con el fin de contextualizar las mediciones realizadas. El objeto de estudio es la Escuela Naval Militar (ENM), principal centro de formación de oficiales de la Armada Española, donde se desarrolla una actividad continua con presencia de alumnos, personal docente, militar y civil. Esta ocupación constante convierte sus instalaciones en un entorno especialmente adecuado para analizar la presencia y distribución del gas radón en espacios habitados.

La ENM se localiza en Marín (Pontevedra), en la comunidad autónoma de Galicia, y ocupa un recinto de aproximadamente 30 hectáreas que alberga diversos edificios e infraestructuras destinadas a la formación y actividad militar. La elevada ocupación diaria, que supera las 1.000 personas, junto con las condiciones climáticas de tipo oceánico —caracterizadas por alta humedad, temperaturas suaves y abundantes precipitaciones—, constituyen factores relevantes a tener en cuenta en el desarrollo del estudio y en la interpretación de sus resultados.

3.1.1 Contexto geológico y geográfico

La ENM se encuentra situada en el municipio de Marín, en la margen sur de la ría de Pontevedra, una de las principales rías que forman parte del conjunto de las Rías Baixas de Galicia. Estas rías constituyen amplios estuarios formados por la inundación marina de antiguos valles fluviales, resultado de la evolución geológica del litoral gallego y de las variaciones del nivel del mar ocurridas a lo largo del tiempo geológico. Este proceso ha dado lugar a paisajes costeros caracterizados por una combinación de relieves rocosos, zonas litorales suavizadas y áreas donde se acumulan sedimentos transportados por los ríos y por la dinámica marina.

En la Figura 3-1 puede observarse la localización de la ENM dentro del entorno de la ría de Pontevedra, lo que permite situar el área de estudio dentro del contexto geográfico y litoral en el que se desarrolla el presente trabajo.

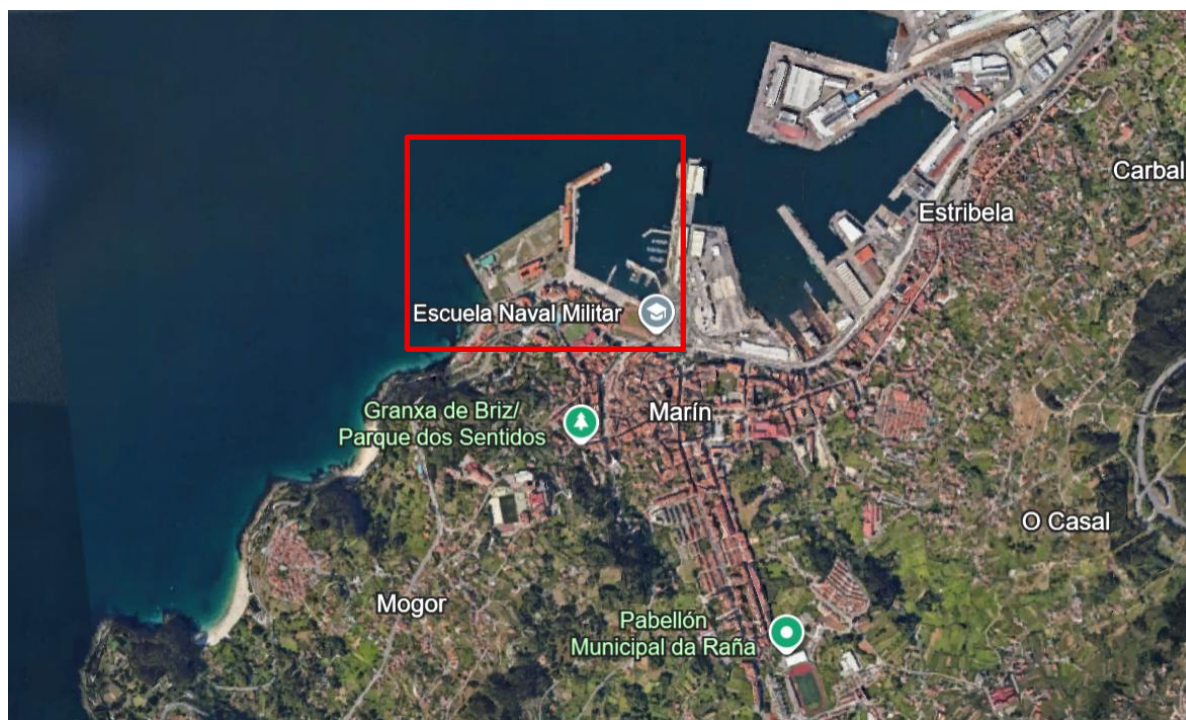


Figura 3-1 Ubicación ENM (Google earth).

En el entorno de la ría de Pontevedra, el relieve se caracteriza por la presencia de pequeñas elevaciones y laderas formadas principalmente por rocas graníticas, muy habituales en el noroeste de la península ibérica. Estas rocas constituyen el basamento geológico predominante de la zona y afloran en numerosos puntos del litoral y de las áreas próximas a la ría. Con el paso del tiempo, los procesos de meteorización y erosión han ido alterando estos materiales, generando suelos derivados de la descomposición del granito y acumulaciones de materiales más finos en las zonas bajas.

La dinámica litoral propia de las rías también ha favorecido la formación de depósitos sedimentarios recientes, especialmente en las áreas más cercanas a la línea de costa. Estos sedimentos proceden tanto del transporte fluvial como de los procesos de sedimentación marina que tienen lugar dentro de la ría. Como consecuencia, el entorno presenta una transición gradual entre zonas donde domina el sustrato rocoso y otras donde aparecen materiales sedimentarios acumulados a lo largo del tiempo.

En el caso concreto del municipio de Marín, la topografía desciende progresivamente desde las zonas interiores hacia la ría, generando una franja litoral donde se concentran gran parte de las infraestructuras urbanas, portuarias y militares. Esta configuración geomorfológica ha condicionado históricamente el desarrollo del municipio, favoreciendo la ocupación de las áreas más próximas al mar y la transformación progresiva del terreno para adaptarlo a las necesidades de las diferentes actividades desarrolladas en la zona.

Además de los procesos naturales, el entorno litoral de Marín ha experimentado importantes modificaciones antrópicas, como se puede observar en la Figura 3-2, especialmente durante el desarrollo de infraestructuras portuarias y militares a lo largo del siglo XX. En muchas áreas próximas a la ría se han realizado obras de relleno y acondicionamiento del terreno con el objetivo de ganar superficie al mar o estabilizar zonas destinadas a nuevas construcciones. Estas intervenciones han generado una alternancia entre sectores que conservan las características naturales del terreno y otros donde predominan materiales aportados artificialmente.



Figura 3-2 Ortofotografía actual (PNOA) y fotografía aérea del vuelo americano 1956–1957 de la Escuela Naval Militar de Marín [26].

Este contexto geológico general puede observarse de forma esquemática en la Figura 3-3, donde se muestra el marco geológico regional del entorno de la ría de Pontevedra y las principales unidades geológicas presentes en la zona.

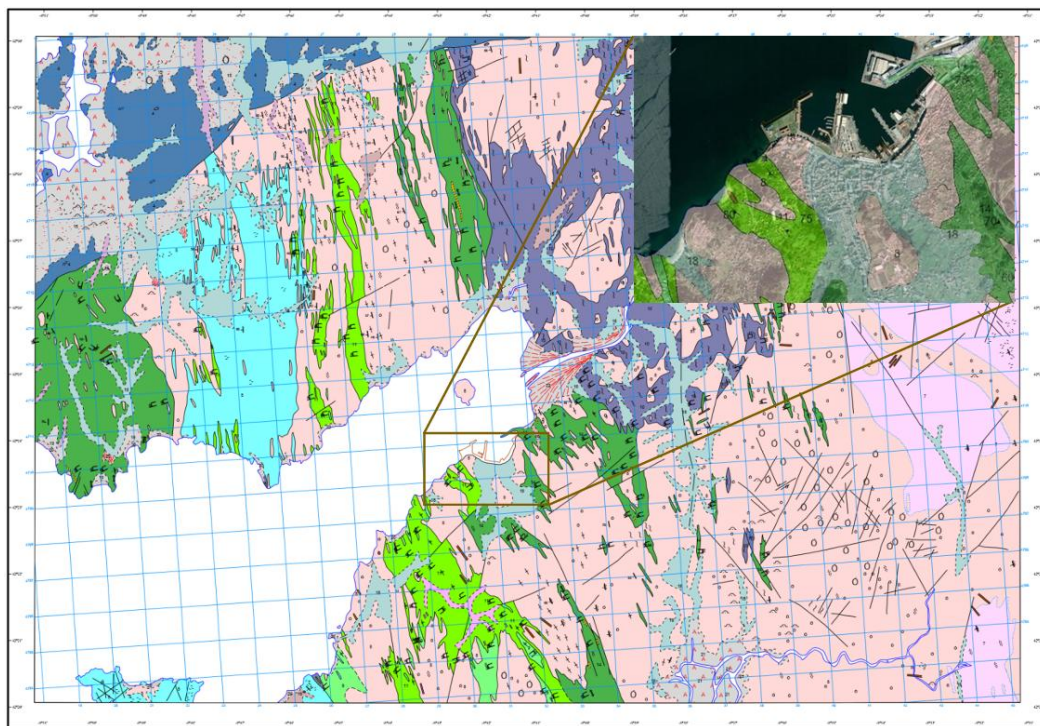


Figura 3-3 Marco geológico regional [27].

Desde el punto de vista geológico y geotécnico, esta combinación de sustrato rocoso granítico, materiales alterados derivados de su meteorización y depósitos sedimentarios recientes constituye un rasgo característico del entorno de la ría de Pontevedra. La presencia de fracturación en el macizo rocoso, junto con la existencia de suelos y sedimentos superficiales de distinta naturaleza, puede influir en diversos procesos relacionados con la circulación de fluidos y gases en el subsuelo.

En este contexto, las características geológicas del terreno adquieren especial relevancia en estudios relacionados con la presencia de radón, ya que factores como la naturaleza de las rocas, su grado de

fracturación o la permeabilidad de los suelos pueden favorecer el movimiento de este gas desde el subsuelo hacia el interior de los edificios. Por ello, resulta necesario comprender previamente el contexto geológico general del entorno antes de analizar con mayor detalle las características específicas del terreno sobre el que se asienta el recinto de la ENM.

3.1.2 Características geotécnicas del suelo en la ENM

Con el fin de caracterizar las condiciones geotécnicas del terreno en el emplazamiento de la ENM, se han tomado como base los cuatro estudios geotécnicos realizados recientemente en la zona (E1, E2, E3 Y E4) como se muestra en la Figura 3-4. A partir de la información recogida en dichos informes se procede al análisis de las diferentes unidades de suelo identificadas en el ámbito de estudio, atendiendo a su composición y características geotécnicas. Asimismo, se estudiará la presencia y profundidad del nivel freático, así como la posible aparición de niveles de roca y su localización dentro del perfil del terreno. Este análisis permitirá obtener una visión general de la configuración del subsuelo en el emplazamiento de la ENM a partir de los datos disponibles en los estudios geotécnicos.

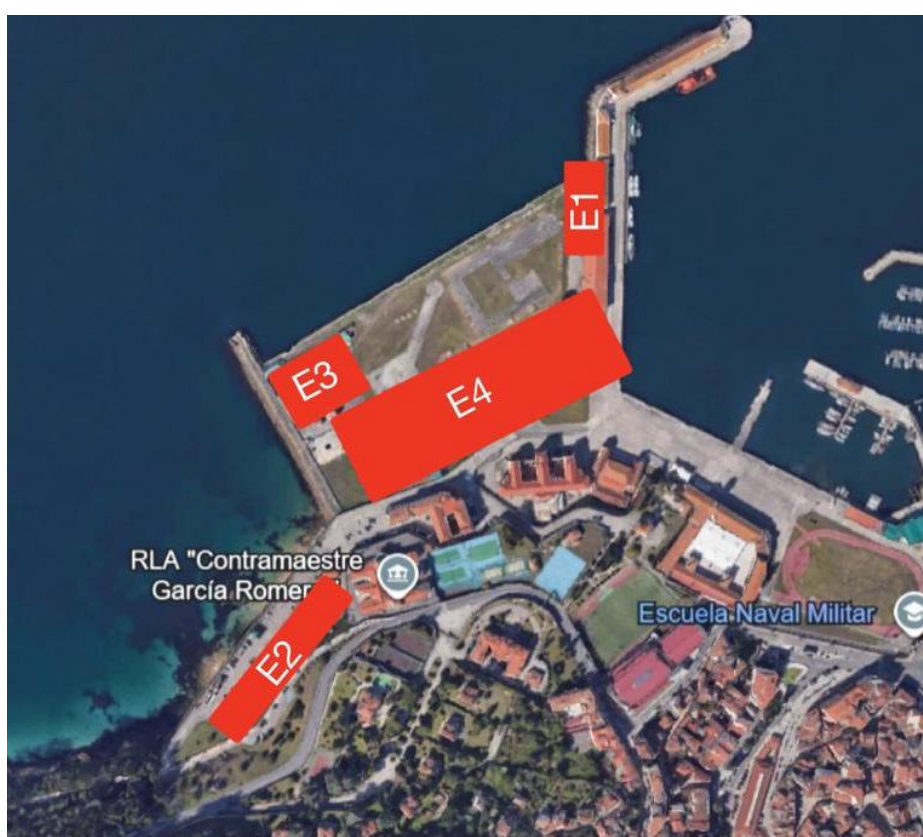


Figura 3-4 Ubicación estudios geotécnicos. (Google earth).

El estudio geotécnico realizado para el edificio de investigación del CUD (E1), identifica una secuencia estratigráfica formada por tres niveles principales. En superficie aparece un relleno antrópico de aproximadamente 12 m de espesor, constituido por escollera y materiales granulares con bolos de naturaleza granítica o gnéisica. Por debajo de este nivel se localizan sedimentos cuaternarios asociados a la dinámica sedimentaria de la ría de Pontevedra, formados principalmente por arenas medias a finas de composición silíceas con carácter limoso, con espesores comprendidos aproximadamente entre 2 y 4 m según los sondeos realizados. A partir de profundidades cercanas a 14,6–16,1 m se alcanza el sustrato granítico de alteración, correspondiente a un granito alcalino muy meteorizado que se presenta en forma de arenas limosas derivadas de la descomposición del macizo granítico original. En cuanto a las condiciones hidrogeológicas, el estudio indica la presencia de nivel freático influenciado directamente por las mareas, observándose en el piezómetro instalado en el sondeo S-2 oscilaciones entre 2,90 m y 1,10 m de profundidad durante periodos de mareas muertas. Asimismo, se señala que durante episodios

de mareas vivas la zona puede quedar parcialmente inundada, lo que evidencia una fuerte interacción entre el agua subterránea y el régimen mareal de la ría.

En el estudio realizado en el barrio industrial (E2) se describe una disposición del subsuelo que responde igualmente a la combinación de procesos naturales y transformaciones antrópicas propias del entorno litoral. En superficie se dispone un nivel de rellenos heterogéneos, formado principalmente por arenas, gravas y restos de materiales de construcción, resultado de las actuaciones de urbanización y acondicionamiento de la zona. Bajo estos rellenos aparecen depósitos cuaternarios constituidos fundamentalmente por arenas, vinculados a los procesos sedimentarios del entorno de la ría. A mayor profundidad se identifican suelos residuales derivados de la alteración del macizo granítico, que constituyen la transición hacia el basamento rocoso. Finalmente, el estudio reconoce el sustrato formado por granitos y paragneises, materiales característicos del basamento geológico regional. Desde el punto de vista hidrogeológico, se señala igualmente la presencia de nivel freático en el terreno, condicionado por la proximidad al mar y por la influencia del régimen de mareas, detectándose agua durante la ejecución de los sondeos realizados.

En el caso del estudio geotécnico correspondiente al área de *CEMEDEM* (E3), la investigación del subsuelo vuelve a reflejar una configuración típica de las zonas litorales transformadas del entorno de la ría de Pontevedra. En superficie se identifican rellenos antrópicos compuestos principalmente por arenas y gravas, asociados a las actuaciones de acondicionamiento del terreno necesarias para la implantación de las instalaciones existentes. Por debajo de estos rellenos se desarrollan depósitos cuaternarios de naturaleza predominantemente arenosa, vinculados a los procesos sedimentarios del medio estuarino. A mayor profundidad se alcanza el sustrato rocoso granítico, que forma parte del basamento geológico característico de la zona de Marín. Desde el punto de vista hidrogeológico, el estudio indica la presencia de agua subterránea, cuya posición se encuentra condicionada por la proximidad al litoral y por la influencia del régimen mareal de la ría.

Por último, el estudio geotécnico correspondiente a la zona entre el centro de adiestramiento de seguridad interior (CASI) y el muelle Almirante Francisco Vierna (E4), presenta una configuración del subsuelo similar a la observada en los otros sectores analizados dentro del recinto de la ENM. En superficie se disponen rellenos antrópicos formados por materiales heterogéneos, principalmente arenas y gravas, asociados a las actuaciones de acondicionamiento del terreno realizadas en la zona. Bajo este nivel se desarrollan depósitos sedimentarios cuaternarios de naturaleza predominantemente arenosa, relacionados con los procesos de sedimentación propios del entorno litoral de la ría de Pontevedra. A mayor profundidad se alcanza el sustrato rocoso granítico, que constituye el basamento geológico predominante en el entorno de Marín. En cuanto a las condiciones hidrogeológicas, el estudio confirma la presencia de nivel freático influenciado por la proximidad al mar y por el régimen de mareas, lo que pone de manifiesto la interacción existente entre el sistema de aguas subterráneas y el medio estuarino en el entorno.

En la Tabla 3-1 se encuentra resumida la información de los estudios geotécnicos con sus características principales.

Características	E1	E2	E3	E4
Tipo de suelo	Relleno antrópico granular con bolos (≈ 12 m), sobre sedimentos cuaternarios arenosos con fracción limosa.	Rellenos antrópicos heterogéneos con arenas y gravas, sobre depósitos cuaternarios arenosos.	Relleno antrópico de arenas y zahorras con fragmentos graníticos ($\approx 0-11,5$ m).	Rellenos antrópicos heterogéneos con arenas dragadas y gravas ($\approx 3,7-7,6$ m).
Profundidad y tipo de roca	Granito alcalino muy meteorizado a partir de $\approx 14-16$ m.	Granitos y metasedimentos (paragneises/micaesquistos) bajo niveles de alteración.	Granito leucocrático de grano grueso (dos micas) a $\approx 9-11,5$ m.	Granito alterado (grado III-II) alcanzado entre $\approx 7-11$ m.
Nivel freático	Oscila aprox. entre 1,1 y 2,9 m, condicionado por mareas.	No detectado en sondeos, pero influenciado por escorrentía y mareas.	Asociado al agua marina, aprox. 3,7–4,0 m.	Nivel piezométrico registrado aprox. 4–5 m.

Tabla 3-1 Características estudios geotécnicos ENM.

En conjunto, los diferentes estudios geotécnicos analizados ponen de manifiesto una configuración del subsuelo relativamente homogénea dentro del entorno de la ENM. En todos los casos se observa la presencia de rellenos antrópicos en superficie, generados durante las distintas fases de acondicionamiento y urbanización del recinto. Bajo estos niveles aparecen depósitos cuaternarios de carácter predominantemente arenoso, asociados a los procesos sedimentarios propios del medio estuarino de la ría de Pontevedra. A mayor profundidad se alcanza el basamento rocoso constituido principalmente por granitos que forman parte del sustrato geológico característico del litoral de Marín. Asimismo, los distintos estudios coinciden en señalar la presencia de nivel freático influenciado por la proximidad al mar y por el régimen de mareas, lo que refleja la estrecha relación existente entre las aguas subterráneas del subsuelo y la dinámica hidrológica de la ría.

3.1.3 Determinación de la línea de costa del área ganada al mar

Con el fin de complementar la información aportada por los estudios geotécnicos disponibles y mejorar la interpretación del terreno en el área de estudio, se ha realizado un análisis cartográfico histórico del entorno de la ENM. Para ello se ha empleado un plano histórico de la ría de Pontevedra y del núcleo de Marín correspondiente al año 1862, el cual se muestra en la Figura 3-5, el cual permite observar la configuración de la línea de costa en una etapa anterior al desarrollo urbano y a las obras de relleno realizadas posteriormente en la zona.



Figura 3-5 Plano histórico de la ría de Pontevedra y del entorno de Marín (1862).

A partir del análisis de este documento histórico se ha comparado la posición de la línea de costa representada en dicho plano con la línea de costa actual. Esta comparación permite identificar las zonas donde el terreno ha sido modificado mediante rellenos antrópicos y aquellas áreas que corresponden al terreno natural original.

Para realizar esta comparación se ha superpuesto un plano actual del área de estudio sobre el plano histórico de 1862, tomando como referencia elementos geográficos reconocibles y relativamente estables, como la configuración general de la costa y determinados accidentes del terreno, entre los que destaca la Isla de Tambo, cuya posición constituye un punto de referencia claro para la alineación de ambos documentos cartográficos. Una vez alineados ambos planos, se han trazado, como se muestra en la Figura 3-6, sobre el plano las dos líneas de costa: la línea de costa histórica, representada en color rojo, y la línea de costa actual, representada en color negro.

El espacio comprendido entre ambas líneas ha sido sombreado en color rojo con el objetivo de resaltar las zonas que han sido ganadas al mar mediante rellenos a lo largo del tiempo.

Esta delimitación permite identificar de forma aproximada qué sectores del recinto de la ENM se sitúan sobre terreno natural y cuáles corresponden a terrenos ganados al mar. Esta información resulta de especial interés para la interpretación geotécnica del área de estudio, especialmente en aquellos sectores donde no se dispone de estudios geotécnicos directos, ya que proporciona un criterio adicional para estimar la naturaleza del subsuelo presente.

Asimismo, los resultados obtenidos a partir de este análisis cartográfico contrastan con la información proporcionada por los estudios geotécnicos disponibles en el recinto, ya que en las zonas donde se han realizado sondeos y se ha identificado mayoritariamente relleno antrópico, estas coinciden en gran medida con las áreas delimitadas como terreno ganado al mar mediante la comparación cartográfica. Esta coincidencia refuerza la interpretación realizada y aporta una mayor fiabilidad a la delimitación propuesta entre terreno natural y terreno ganado al mar.

3.2 Elección de los puntos de muestreo

En este apartado se describe el proceso seguido para la selección de los puntos de muestreo en los que se realizaron las mediciones de radón en el gas del suelo dentro del recinto de la Escuela Naval Militar. La elección de estos puntos se llevó a cabo teniendo en cuenta diferentes factores relacionados con las características del terreno, la distribución de las infraestructuras del recinto y la información disponible procedente de distintos estudios geotécnicos realizados en la zona. A continuación, se presentan los principales criterios considerados para la selección de los puntos de medida, así como la información obtenida a partir de los estudios geológicos y geotécnicos analizados.

3.2.1 Criterios de selección de los puntos de muestreo

La selección de los puntos de muestreo en los que se realizaron las mediciones de radón en el gas del suelo se llevó a cabo teniendo en cuenta diversos criterios relacionados tanto con las características del terreno como con las condiciones prácticas necesarias para la realización de las mediciones. El objetivo fue definir un conjunto de puntos representativos dentro del recinto de la ENM que permitiera obtener una visión general del comportamiento del radón en el subsuelo de la zona de estudio.

Uno de los criterios principales considerados para la elección de los puntos de medición fue la disponibilidad de información geológica y geotécnica del terreno. Para determinadas zonas del recinto se dispone de estudios geotécnicos realizados con motivo de la construcción o reforma de diferentes edificios e infraestructuras como se muestra en la Tabla 3-1. Esta información resulta especialmente útil en el contexto del presente trabajo, ya que las características geológicas del terreno pueden influir de forma significativa en la generación, movilidad y acumulación del radón en el suelo.

Asimismo, se tuvieron en cuenta criterios relacionados con la distribución de las infraestructuras y los diferentes usos del recinto. Se procuró realizar mediciones en zonas de distintas áreas de la ENM, incluyendo espacios próximos a edificios docentes, zonas administrativas, áreas deportivas y otras zonas de uso habitual dentro del centro. También se consideraron aquellas áreas donde existe la posibilidad de que se desarrollen nuevas infraestructuras o edificaciones en el futuro, con el objetivo de disponer de información previa sobre el comportamiento del radón en el subsuelo de dichas zonas.

Otro factor importante en la selección de los puntos fue la viabilidad técnica de la medición, condicionada por las características del sistema de muestreo empleado. El método utilizado requiere la introducción de una sonda en el terreno, hasta una profundidad aproximada de un metro por lo que fue necesario seleccionar ubicaciones donde el suelo permitiera la inserción de la sonda mediante percusión. Asimismo, se prestó especial atención a la posible presencia de infraestructuras enterradas, como redes de tuberías, conducciones eléctricas o sistemas de drenaje, con el fin de evitar daños en las instalaciones existentes y garantizar la seguridad durante la realización de las mediciones. En aquellas zonas donde el pavimento impedía el acceso directo al suelo, solo fue posible realizar mediciones cuando existían perforaciones o accesos previos al subsuelo.

Además, se tuvieron en cuenta criterios relacionados con las características naturales del terreno. En particular, se prestó atención a aquellas zonas donde el suelo presentaba afloramientos rocosos o materiales naturales poco alterados, ya que este tipo de terrenos, especialmente cuando están asociados a litologías graníticas o rocas ricas en minerales radiactivos, pueden presentar un mayor potencial de generación de radón. La inclusión de este tipo de áreas en la campaña de mediciones permitió evaluar el comportamiento del radón en diferentes contextos geológicos dentro del recinto.

Finalmente, también se consideraron criterios de accesibilidad y seguridad, procurando seleccionar puntos donde las mediciones pudieran realizarse sin interferir con las actividades habituales del centro y garantizando al mismo tiempo la estabilidad del equipo durante el proceso de medición.

La combinación de todos estos factores permitió definir una red de puntos de medición de 33 medidas distribuidas en diferentes zonas del recinto de la ENM como se muestra en la Figura 3-8.

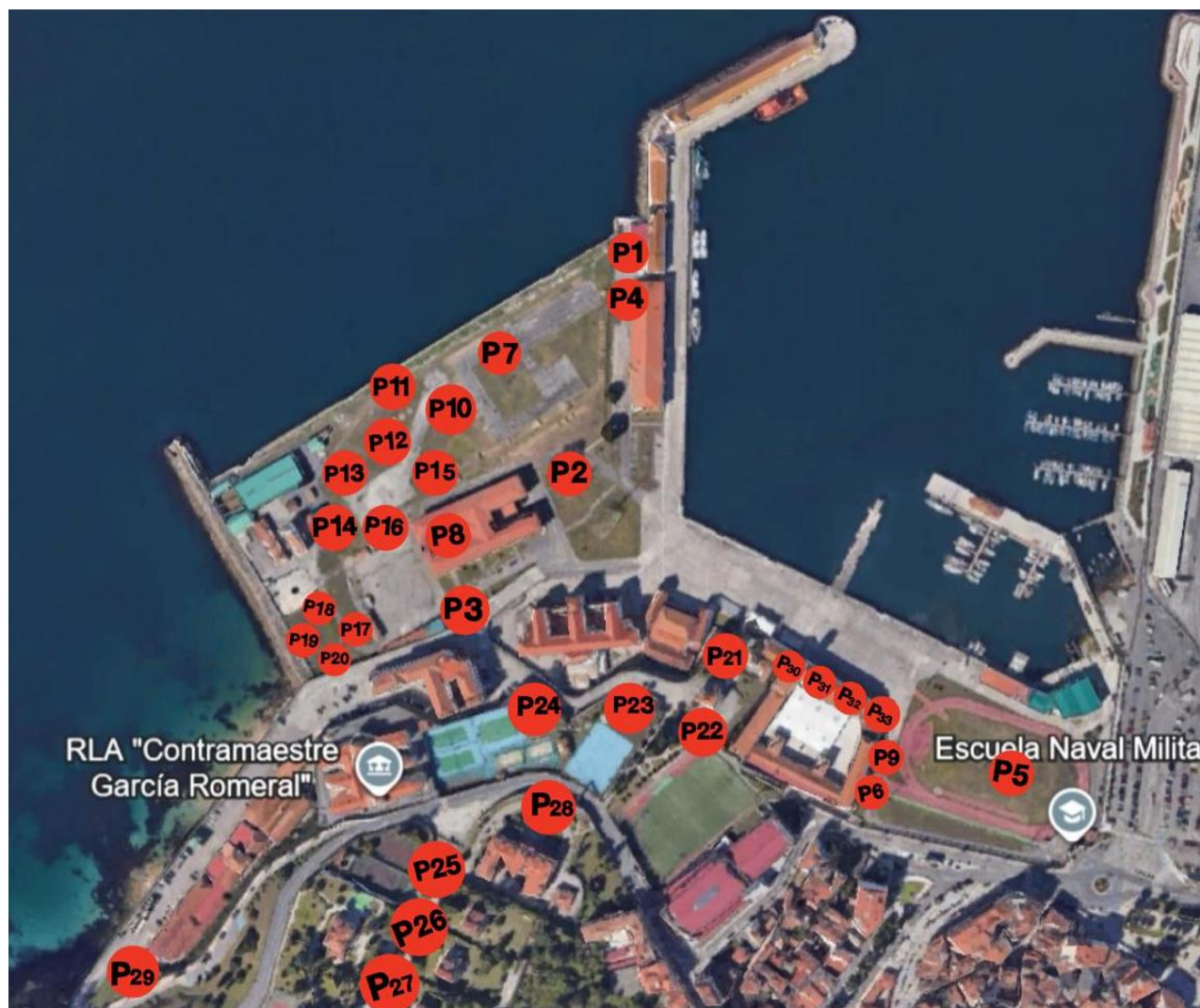


Figura 3-8 Ubicación de las mediciones en la ENM (Google earth).

3.2.2 Selección del punto de muestreo fijo

El punto de muestreo seleccionado, el cual se muestra en la Figura 3-9, se eligió con el objetivo de realizar mediciones repetidas durante varios días en una misma ubicación, con el fin de analizar la variación de la concentración de radón en función de distintos parámetros meteorológicos. La realización de medidas en un punto fijo permite estudiar la evolución temporal de la concentración y su posible relación con variables como la presión atmosférica, la temperatura o las condiciones meteorológicas del entorno.

Para la elección del punto se tuvieron en cuenta varios criterios. En primer lugar, se seleccionó una ubicación en la que previamente se habían registrado concentraciones relativamente altas de radón, como se muestra en el Anexo IV: Fichas de campo en el cual se muestran cada una de las fichas de campo pertenecientes a cada punto de medición, lo que facilita la detección de variaciones y permite obtener resultados más representativos del fenómeno estudiado. Asimismo, se escogió un punto próximo a la costa, con el objetivo de poder analizar la posible influencia de las condiciones meteorológicas propias de las zonas litorales, como la humedad o los cambios asociados a la dinámica atmosférica marina.

Durante los días en los que se realizaron las mediciones en este punto, la sonda permanecía introducida en el suelo de forma continua para mantener constantes las condiciones del punto de muestreo. En los periodos en los que no se estaba realizando una medición, la sonda se mantenía estancueizada, con el fin de evitar la entrada de humedad que pudiera alterar el funcionamiento del equipo o afectar a los resultados obtenidos.

Con el objetivo de analizar la variación de la concentración de radón bajo condiciones meteorológicas lo más diferentes posible a lo largo del día, se realizaron cuatro mediciones diarias, aproximadamente a las 09:00, 14:00, 17:00 y 21:00 horas. Este reparto temporal permite registrar medidas en distintos momentos del día, asociados a posibles cambios en parámetros meteorológicos.



Figura 3-9 Punto de muestreo fijo ENM (Google earth).

3.3 Equipo de medida

Para la realización de este trabajo se seleccionó el monitor de radón RTM 1688-2, adecuado para la realización de campañas de medición de radón en suelos. La elección del equipo se realizó teniendo en cuenta su adecuación a los procedimientos establecidos en la norma *UNE-EN ISO 11665-11*, así como su capacidad para realizar mediciones fiables de la concentración de radón en el gas del suelo bajo condiciones de campo. Asimismo, se tuvo en cuenta la disponibilidad del equipo en el CUD, lo que permitió su utilización en el desarrollo del presente estudio. De este modo, el sistema de medición empleado permite aplicar los criterios metodológicos definidos en la normativa y obtener resultados representativos del comportamiento del radón en el área de estudio.

3.3.1 Monitor de radón RTM 1688-2

El equipo principal utilizado para la realización de las mediciones, como se puede observar en la Figura 3-10, es el monitor de radón RTM 1688-2, desarrollado por la empresa *SARAD GmbH*. Este dispositivo está diseñado para la determinación de la concentración de actividad de radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) en diferentes medios, incluyendo aire ambiental, aire del suelo y muestras de agua. El equipo emplea un método de medición basado en espectroscopia alfa, lo que permite obtener mediciones rápidas y con alta sensibilidad incluso a bajas concentraciones de radón.

La determinación de la concentración de radón se realiza en una cámara de medición situada en el interior del equipo. El gas que contiene radón es introducido en esta cámara, donde tiene lugar el proceso de detección. En este volumen de medición se producen las desintegraciones radiactivas del radón y de sus descendientes, cuyas emisiones son posteriormente registradas por el detector del sistema. Este tipo de cámara de medición es utilizado en los dispositivos RTM de *SARAD* para la determinación de la concentración de radón mediante técnicas espectrométricas.

El sistema de detección del RTM 1688-2 se basa en un detector semiconductor sobre el cual se depositan los descendientes de corta vida del radón generados durante su desintegración. Estos descendientes emiten partículas alfa, que son detectadas por el semiconductor. A partir de la energía de

estas emisiones alfa es posible identificar los distintos radionucleidos y determinar la concentración de radón mediante técnicas de espectroscopia alfa.

El equipo dispone además de una bomba interna, que permite hacer circular el gas a través del sistema de medición. Esta bomba posibilita la extracción del gas desde el punto de muestreo y su transporte hasta la cámara de medición del detector, permitiendo así la realización de mediciones continuas de la concentración de radón.



Figura 3-10 Monitor de radón RTM 1688-2.

3.3.2 Equipamiento auxiliar

En este apartado se describe el material auxiliar empleado durante la realización de las mediciones. Se presenta de forma general el conjunto de elementos utilizados y su función, con el objetivo de facilitar la comprensión del procedimiento de muestreo y el desarrollo del trabajo de campo.

3.3.2.1 Sonda de muestreo de gas del suelo

La extracción del gas del suelo se realiza mediante una sonda de muestreo diseñada para la toma de muestras de gas presente en los poros del terreno. Esta sonda consiste en un tubo metálico fabricado en acero galvanizado, con una longitud total de 1,15 m y un diámetro interno de 8 mm, dimensiones que permiten su introducción en el terreno y el posterior transporte del gas del suelo hasta el sistema de medición.

Las mediciones realizadas en este trabajo se llevaron a cabo a una profundidad aproximada de 1 m, valor que se encuentra por encima de la profundidad mínima recomendada para este tipo de mediciones. Según las recomendaciones metodológicas recogidas en la normativa *UNE-EN ISO 11665-11*, la toma de muestras de gas del suelo debe realizarse a una profundidad suficiente para evitar la dilución de la muestra con aire atmosférico, recomendándose generalmente profundidades iguales o superiores a 0,8 m para obtener muestras representativas del gas presente en el subsuelo.

El sistema de muestreo empleado incluye, además de la propia sonda, otros elementos auxiliares utilizados durante el proceso de instalación en el terreno. Entre estos elementos se encuentran una pica metálica situada en el extremo inferior de la sonda, que facilita su penetración en el suelo, y una varilla metálica, utilizada durante el proceso de instalación del sistema de muestreo.

3.3.2.2 Filtro de partículas

En la línea de entrada del gas al equipo se instala un filtro de partículas como el de la Figura 3-11, cuya función es evitar la entrada de partículas sólidas y aerosoles presentes en el gas del suelo al interior del sistema de medición. Este elemento se coloca en el circuito de muestreo, entre la sonda de extracción y la entrada del monitor de radón, actuando como sistema de protección del equipo.

El filtro utilizado consiste en un filtro de membrana en formato disco, montado en una carcasa plástica que permite su conexión directa al circuito de muestreo mediante los tubos de transporte de gas. La membrana del filtro retiene partículas de polvo, sedimentos finos y otros materiales sólidos que pueden ser arrastrados durante el proceso de aspiración del gas del suelo.

La presencia de este filtro resulta especialmente importante en las mediciones de gas del suelo, ya que durante la aspiración pueden incorporarse pequeñas partículas procedentes del terreno que podrían afectar al correcto funcionamiento del sistema de medición o contaminar los componentes internos del detector. Por este motivo, el filtro de partículas se utiliza como elemento de protección dentro del circuito de muestreo del gas antes de su entrada en el monitor de radón.



Figura 3-11 Filtro de partículas.

3.3.2.3 Separador de condensados con válvula de flotador

En el circuito de muestreo del sistema se incorpora un separador de condensados con válvula de flotador como el de la Figura 3-12, cuya función es evitar la entrada de agua líquida en el monitor de radón durante el proceso de aspiración del gas del suelo. Este dispositivo forma parte del sistema de protección del equipo y se instala en la línea de entrada del gas antes de su llegada al monitor de radón. El separador utilizado presenta unas dimensiones aproximadas de 4 cm de altura y 4,5 cm de diámetro interno.

Durante las mediciones de radón en gas del suelo, especialmente en terrenos húmedos o en condiciones ambientales con elevada humedad, existe la posibilidad de que pequeñas cantidades de agua sean aspiradas junto con el gas procedente del terreno. El separador de condensados permite retener esta agua en su interior, evitando que alcance los componentes internos del sistema de medición.

El dispositivo dispone en su parte superior de una válvula de flotador, que actúa como mecanismo de seguridad. Cuando el nivel de agua acumulada en el interior del separador aumenta y alcanza una determinada altura, el flotador se eleva y cierra el paso del gas en el circuito de muestreo, deteniendo la aspiración. De este modo se impide que el agua continúe avanzando hacia el monitor de radón, protegiendo el equipo frente a posibles daños derivados de la entrada de líquido en el sistema.



Figura 3-12 Separador de condensados con válvula de flotador.

3.3.2.4 Tubos de conexión

El sistema de muestreo incorpora varios tubos de conexión como los de la Figura 3-13, cuya función es transportar el gas extraído del suelo desde la sonda de muestreo hasta el monitor de radón a través de los diferentes elementos del circuito. Estos conductos permiten establecer la conexión entre los distintos componentes del sistema de medición, como la sonda de muestreo, el filtro de partículas, el separador de condensados y la entrada del equipo.

En el sistema utilizado se emplean dos tubos de pequeño diámetro, cada uno de ellos con una longitud de 24 cm y un diámetro interior de 3 mm, que se utilizan para realizar las conexiones entre los distintos dispositivos situados en las proximidades del equipo. Además, el sistema incorpora un tubo de mayor longitud, con 1,56 m de longitud y un diámetro interior de 6 mm, que permite conectar la sonda de muestreo instalada en el suelo con el resto del circuito de muestreo.

Estos tubos forman parte del circuito de transporte del gas y permiten conducir la muestra desde el punto de extracción hasta el sistema de detección del monitor de radón, manteniendo la continuidad del flujo de gas a lo largo del sistema de medición.



Figura 3-13 Tubos de conexión.

3.4 Procedimiento experimental de medición

3.4.1 Procedimiento de medición

En este apartado se describe de forma detallada el procedimiento seguido para la realización de las mediciones, presentando las distintas etapas que componen el proceso experimental. Para ello, se expone de manera secuencial cada una de las fases del procedimiento de medición, con el objetivo de facilitar la comprensión del método empleado y garantizar la reproducibilidad de las mediciones realizadas en el presente estudio.

En primer lugar, se procede a la selección del punto de medición. Una vez elegido el lugar donde se realizará la medición, se registran en la ficha de campo los principales datos asociados a la toma de muestras. Entre la información anotada se incluyen la fecha de la medición, las coordenadas geográficas del punto de muestreo, la altitud, la hora de inicio y finalización de la medición, el tipo de suelo, el estado del suelo y las condiciones meteorológicas en el momento de la medición.

A continuación, se realiza la configuración del monitor de radón RTM 1688-2. Para ello, se mantiene pulsado el botón “TOGGLE” durante 6 segundos, lo que permite acceder al menú de configuración del intervalo de medición como se muestra en la Figura 3-14. Una vez en esta pantalla, mediante pulsaciones cortas del mismo botón es posible seleccionar el intervalo de medición deseado entre las opciones disponibles (1, 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos). Tras seleccionar el intervalo adecuado, se vuelve a mantener pulsado el botón “TOGGLE” durante aproximadamente 6 segundos para confirmar la configuración seleccionada.



Figura 3-14 Pantalla intervalos RTM 1688-2.

Una vez configurado el equipo, se procede a la instalación de la sonda de muestreo en el terreno. Para ello, se coloca previamente una pica metálica, como la que se muestra en la Figura 3-15, en el extremo inferior de la sonda, cuya función es facilitar la penetración de esta en el suelo y evitar la entrada de tierra en el interior del conducto durante el proceso de instalación.



Figura 3-15 Sonda de muestreo y pica.

El proceso de introducción de la sonda en el terreno se realiza mediante percusiones con un martillo. Para evitar posibles daños en el extremo superior de la sonda durante este procedimiento, se utiliza una funda protectora metálica como la que se muestra en la Figura 3-16, que se coloca en la parte superior de la misma. Esta pieza actúa como elemento de protección frente a los impactos producidos durante la percusión, permitiendo transmitir la fuerza necesaria para la penetración de la sonda en el suelo sin comprometer la integridad del tubo de muestreo.



Figura 3-16 Elemento de protección frente a impactos.

Mediante este procedimiento, la sonda se introduce progresivamente en el terreno hasta alcanzar una profundidad aproximada de 0,8–1 m, como se muestra en la Figura 3-17, que corresponde con la profundidad de muestreo utilizada en este estudio. Este intervalo de profundidad se encuentra dentro de los valores recomendados para la medición de radón en gas del suelo, ya que permite obtener muestras representativas del gas presente en los poros del terreno minimizando la posible influencia del aire atmosférico.



Figura 3-17 Sonda introducida en el terreno.

Una vez que la sonda ha sido introducida en el terreno con la pica metálica en su extremo inferior, se procede a la creación de la cavidad de muestreo en el suelo. Para ello, se introduce por el interior de la sonda una varilla metálica como la que podemos observar en la Figura 3-18, cuyo objetivo es alcanzar la pica situada en el extremo inferior de la misma.

Una vez que la varilla entra en contacto con la pica, se aplica una pequeña percusión, lo que permite separar la pica de la sonda. Como resultado de esta operación, se genera una pequeña cavidad en el terreno en la zona inferior de la sonda.



Figura 3-18 Varilla metálica introducida en la sonda.

Esta cavidad actúa como zona de captación del gas del suelo, permitiendo que el equipo pueda aspirar el aire presente en los poros del terreno a través de la sonda durante el proceso de medición. De este modo, se facilita la obtención de una muestra representativa del gas del suelo para la posterior determinación de la concentración de radón.

Una vez generada la cavidad de muestreo en el extremo inferior de la sonda, se procede a la conexión del sistema de medición como se observa en la Figura 3-19. Para ello, se conecta la sonda de muestreo al monitor de radón mediante el circuito de tubos de conexión, incorporando en la línea de entrada del gas los elementos de protección del sistema, como el filtro de partículas y el separador de condensados con válvula de flotador. Este montaje permite establecer un circuito continuo para el transporte del gas del suelo desde el punto de captación hasta el interior del equipo de medición.



Figura 3-19 Conexión entre sonda y RTM 1688-2 mediante tubos.

Una vez establecido el circuito de muestreo y conectados todos los componentes del sistema, se procede a encender el equipo y ponerlo en funcionamiento no sin antes registrar las condiciones meteorológicas del momento. Estos datos se obtienen a través de la plataforma oficial METEOGALICIA, concretamente de la estación meteorológica cercana a la ENM, e incluyen parámetros como la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la humedad relativa y la altura de la marea. El registro de estas variables permite disponer de información complementaria del estado

ambiental durante el muestreo, la cual resulta de utilidad para el análisis e interpretación posterior de los resultados obtenidos. Una vez anotados estos datos, se realiza una pulsación corta del botón “TOGGLE” del monitor de radón, lo que permite acceder a la pantalla de medición del dispositivo como se muestra en la Figura 3-20. En dicha pantalla se muestra el tiempo restante necesario para la obtención del primer resultado, correspondiente al intervalo de medición previamente configurado. Durante este periodo inicial, el equipo comienza a aspirar el gas del suelo a través del circuito de muestreo y a iniciar el proceso de detección del radón presente en la muestra.



Figura 3-20 Pantalla RTM 1688-2.

Una vez finalizado el tiempo de espera correspondiente al primer intervalo de medición, el equipo comienza a mostrar los resultados de forma periódica, registrando nuevos valores cada intervalo previamente configurado. Mediante pulsaciones cortas del botón “TOGGLE” es posible desplazarse por las distintas pantallas de visualización del dispositivo, donde se muestran los valores de concentración de radón y torón, así como las concentraciones medias calculadas por el equipo, según se muestra en la Figura 3-21. Además, el monitor permite consultar los datos ambientales registrados durante la medición, entre los que se incluyen la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa.



Figura 3-21 Pantallas de nivel de concentración y datos ambientales del RTM 1688-2.

Una vez obtenidos los valores correspondientes al número de intervalos de medición establecido, se procede a finalizar la medición y registrar los resultados obtenidos en la ficha de campo correspondiente. De este modo, se dispone de un registro completo de las condiciones en las que se ha realizado la medición y de los valores obtenidos, permitiendo posteriormente su análisis e interpretación dentro del conjunto de mediciones realizadas en el área de estudio.

3.4.2 Mediciones específicas en el patio de aulas

De forma adicional a la campaña general de mediciones realizada en el recinto de la ENM, se llevaron a cabo cuatro mediciones específicas en el patio de aulas. Aprovechando una serie de perforaciones existentes en el pavimento de esta zona. Estas perforaciones fueron realizadas previamente con la intención de realizar medidas y estudios de este tipo.

Las perforaciones presentan una profundidad de 1,18 m y un diámetro de 25 mm, y se encuentran distribuidas en diferentes puntos del patio de aulas. Cada una de ellas se encuentra cerrada mediante un tapón de protección, diseñado para evitar la entrada de suciedad o agua en el interior del orificio cuando no se están realizando mediciones.

Con el fin de poder utilizar estas perforaciones como puntos de muestreo del gas del suelo, uno de los tapones fue modificado y adaptado para permitir la conexión directa con el sistema de medición utilizado en este trabajo como se puede observar en la Figura 3-22. Esta adaptación consistió en la incorporación de un racor que permite conectar el tubo de aspiración del sistema de medición al interior del orificio, garantizando al mismo tiempo una conexión estanca que evita la entrada de aire exterior durante la medición. De esta forma, el gas presente en el interior de la perforación puede ser aspirado directamente por el sistema de medición y conducido hasta el monitor de radón. La ubicación se muestra en la Figura 3-23



Figura 3-22 Tapón modificado en patio el de aulas ENM.

Este tipo de medición presenta un interés particular dentro del estudio, ya que las perforaciones permiten acceder al gas presente bajo la losa de pavimento del edificio, proporcionando información sobre la concentración de radón existente en el subsuelo inmediatamente inferior a una zona edificada. El patio de aulas constituye además una de las áreas con mayor actividad dentro de la ENM, ya que en este edificio se desarrollan gran parte de las actividades docentes del centro, albergando aulas utilizadas por los alumnos, despachos del profesorado del CUD, así como diferentes dependencias administrativas relacionadas con la actividad académica [28].

La realización de mediciones en este entorno permite, por tanto, obtener información de interés sobre la presencia de radón en el subsuelo bajo un edificio de uso docente, lo que resulta especialmente relevante desde el punto de vista de la evaluación del potencial de entrada de radón en espacios habitados.



Figura 3-23 Patio de aulas ENM (Google Earth).

3.5 Toma de datos

Antes de iniciar la campaña de mediciones fue necesario definir adecuadamente los parámetros de adquisición de datos del sistema de medición. En particular, se analizó el intervalo temporal entre registros consecutivos debido a que es un factor determinante y el tiempo necesario desde el inicio de la medición para que los valores obtenidos pudieran considerarse representativos del gas del suelo.

3.5.1 Determinación del tiempo de estabilización de la medición

Durante los primeros instantes tras el inicio de la medición, el sistema contiene todavía aire residual presente en el circuito de muestreo (sonda, tubos de conexión, filtro y volumen interno del equipo), lo que puede afectar a los valores iniciales registrados. Además, el detector necesita acumular suficiente estadística de eventos para reducir la incertidumbre asociada a la medición. Por este motivo, se realizó un análisis previo con el objetivo de estimar el tiempo mínimo necesario para que el sistema alcanzase condiciones de medición estables, combinando tres enfoques diferentes: observación experimental mediante mediciones de alta resolución temporal, estimación teórica del tiempo de purga del circuito y contraste con las especificaciones técnicas del fabricante del equipo. Estos enfoques se explican a continuación.

3.5.1.1 Método 1: Análisis experimental mediante mediciones con intervalos de 1 minuto

Antes de comenzar la campaña sistemática de medición de radón en suelo, se realizó una fase preliminar de ensayos con el objetivo de analizar el comportamiento inicial del equipo RTM 1688-2 y determinar experimentalmente el tiempo necesario para que la señal de concentración de radón se estabilice tras el inicio de cada medición.

Cuando se introduce la sonda en el terreno y se inicia el bombeo del sistema, el circuito interno del equipo contiene inicialmente aire residual procedente del exterior o de mediciones anteriores. Durante los primeros minutos de funcionamiento este aire debe ser evacuado progresivamente por la bomba del equipo hasta que el sistema comienza a analizar exclusivamente el gas procedente del suelo a la profundidad de medida. Este proceso se conoce como fase de purgado o estabilización del sistema.

Si se interpretasen directamente los valores obtenidos durante esta fase inicial, se estaría analizando una mezcla de aire residual y gas del suelo, lo que daría lugar a concentraciones no representativas y a

errores estadísticos elevados. Por este motivo resulta necesario determinar un tiempo mínimo de estabilización a partir del cual los valores registrados puedan considerarse fiables.

Con este objetivo se realizaron tres mediciones experimentales de 30 minutos de duración con intervalos de registro de 1 minuto, lo que permitió observar con gran resolución temporal la evolución de la concentración de radón durante los primeros minutos de funcionamiento del sistema.

Las mediciones se realizaron en tres localizaciones diferentes dentro del recinto de la ENM, manteniendo constantes las condiciones de medición (profundidad aproximada de 1 m y configuración del equipo).

La primera medición experimental se realizó el 20 de febrero de 2026 en las inmediaciones del edificio de investigación. En la Figura 3-24 se grafica la evolución temporal de la concentración del radón y del error del equipo empleado. La ubicación se muestra en la Figura 3-25.

Durante los primeros minutos de medición se registraron concentraciones muy bajas acompañadas de errores extremadamente elevados, alcanzando un 99 % de error en el primer intervalo, lo que indica que la señal aún no es estadísticamente representativa del gas del suelo.

A partir de aproximadamente el minuto 5 se observa un incremento significativo de la concentración de radón, superándose los 2900 Bq/m³, mientras que el error descende progresivamente hasta situarse en torno al 25-30 %. Este comportamiento indica que el sistema comienza a analizar gas procedente del suelo tras la purga inicial del circuito.

En los intervalos posteriores las concentraciones oscilan entre aproximadamente 3400 y 7400 Bq/m³, con errores cercanos al 20-30 %, lo que refleja una señal mucho más estable.

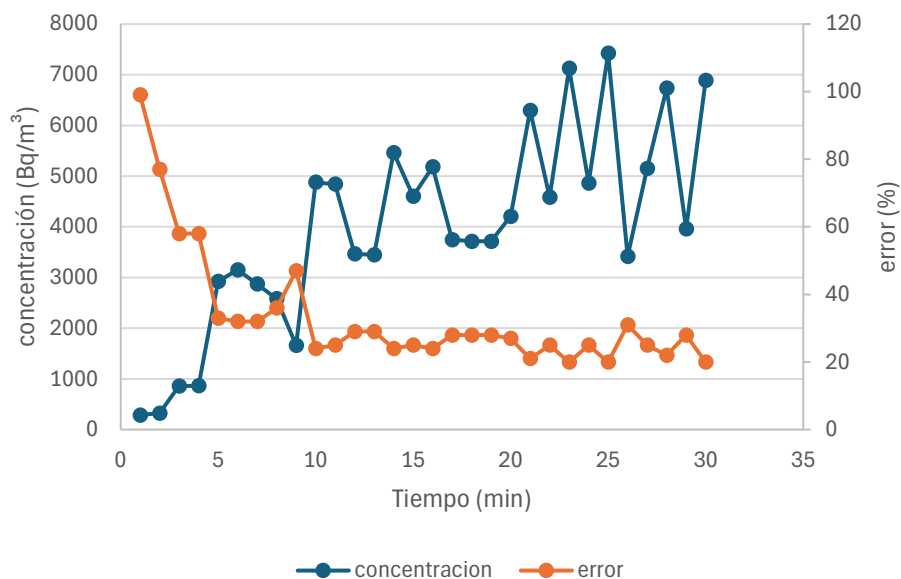


Figura 3-24 Variación temporal de la concentración de radón y su error asociado.

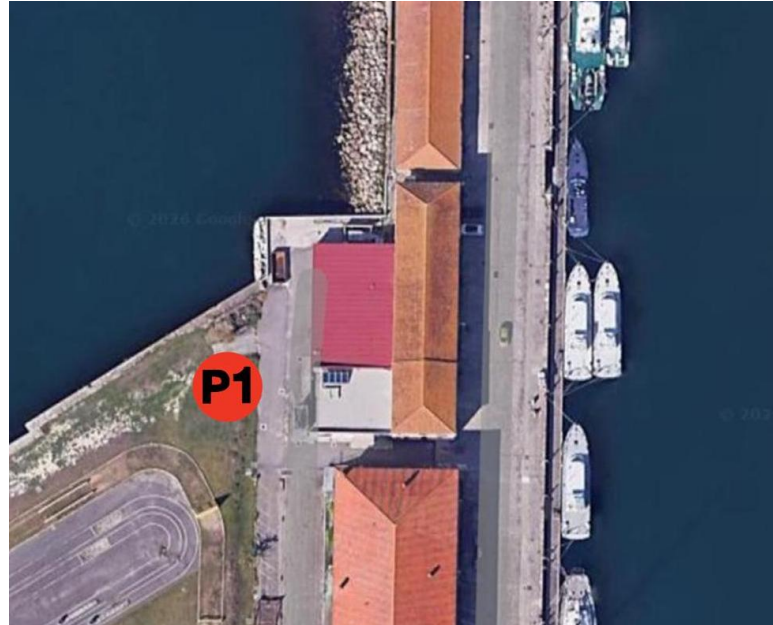


Figura 3-25 Edificio investigación CUD-ENM (Google Earth).

La segunda medición se realizó el 23 de febrero de 2026 en la zona del palo de señales. En la Figura 3-26 se grafica la evolución temporal de la concentración del radón y del error del equipo empleado. La ubicación se muestra en la Figura 3-27.

El comportamiento observado en esta medición es similar al registrado en el ensayo anterior. Durante los primeros minutos las concentraciones registradas son relativamente bajas y el error presenta valores elevados, alcanzando el 58 % en el primer intervalo.

A partir del minuto 4-5 la concentración aumenta rápidamente, superando los 5000 Bq/m³, mientras que el error desciende por debajo del 25 %, lo que indica que el sistema entra en una fase de mayor estabilidad.

Desde aproximadamente el minuto 8 las concentraciones se mantienen mayoritariamente por encima de 6000 Bq/m³, con errores en torno al 20-22 %, lo que confirma que la señal ha alcanzado un régimen estable y representativo del gas del suelo.

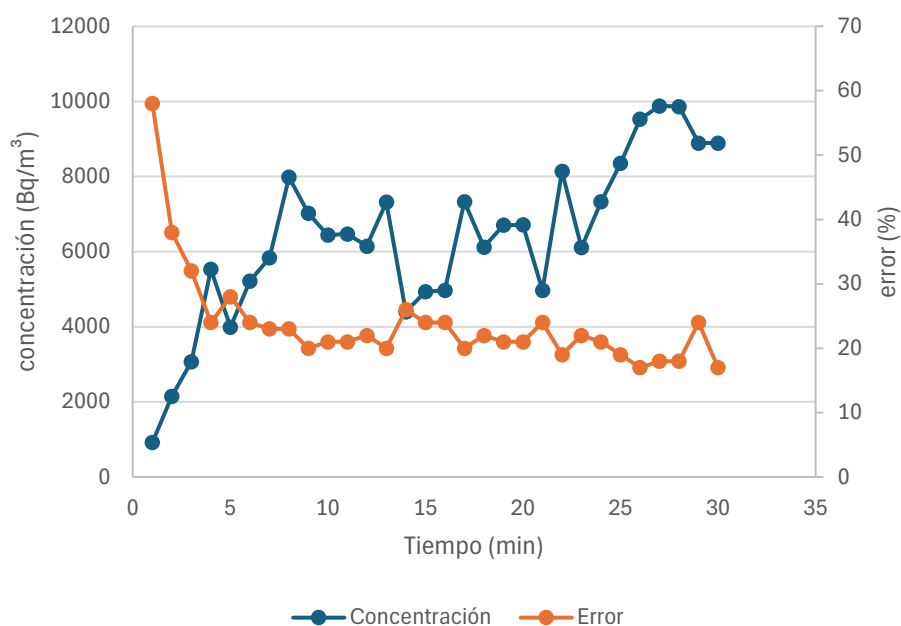


Figura 3-26 Variación temporal de la concentración de radón y su error asociado.



Figura 3-27 Palo de señales ENM (Google Earth).

La tercera medición se realizó el 24 de febrero de 2026 en los jardines inferiores situados en la cuesta hacia el cuartel Méndez Núñez. En la Figura 3-28 se grafica la evolución temporal de la concentración del radón y del error del equipo empleado. La ubicación se puede ver en la Figura 3-29.

En este caso se vuelve a observar el mismo patrón característico. Durante los primeros minutos se registran concentraciones bajas, entre 307 y aproximadamente 1300 Bq/m³, acompañadas de errores superiores al 50 %, alcanzando nuevamente el 99 % en el primer intervalo.

A partir de aproximadamente el intervalo 8 las concentraciones comienzan a estabilizarse entre 1800 y 2400 Bq/m³, mientras que el error disminuye hasta valores comprendidos entre 35 % y 45 %, lo que indica una mejora significativa en la estabilidad de la medición.

Se observa además un valor anómalo en el intervalo 19, donde la concentración desciende momentáneamente a 304 Bq/m³ con un error del 99 %, lo que sugiere una perturbación puntual del sistema (posible entrada momentánea de aire o inestabilidad del flujo). No obstante, en el intervalo siguiente la señal recupera inmediatamente los valores previos, confirmando que se trata de un evento aislado.

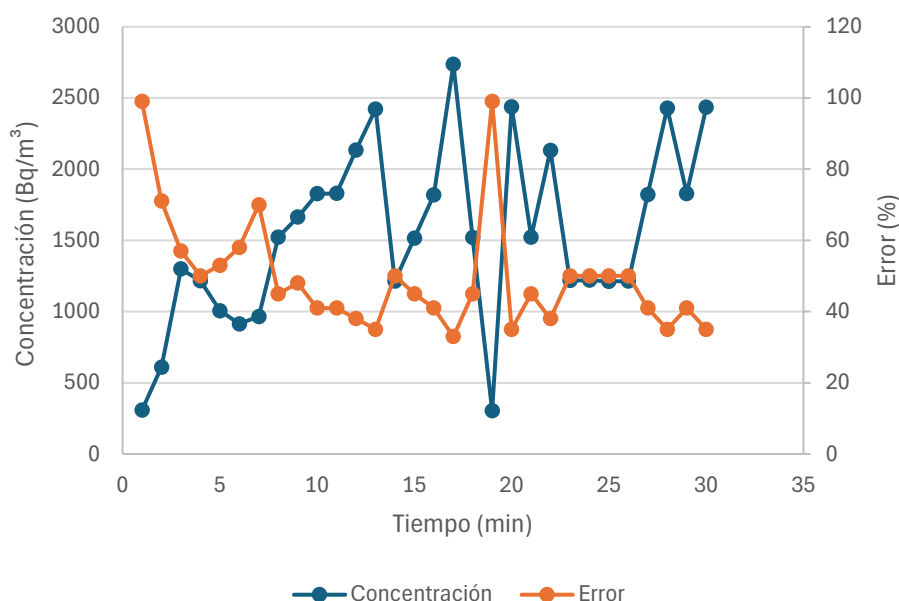


Figura 3-28 Variación temporal de la concentración de radón y su error asociado.



Figura 3-29 Jardines inferiores de la cuesta al cuartel Méndez Núñez (Google Earth).

El análisis conjunto de las tres mediciones preliminares realizadas con intervalos de un minuto permite identificar un patrón muy consistente en la evolución temporal de la señal registrada por el equipo. En los tres ensayos se observa que durante los primeros minutos de medición las concentraciones registradas son relativamente bajas y están acompañadas de errores estadísticos muy elevados, alcanzando valores cercanos al 99 % en los primeros intervalos. Este comportamiento indica que, en esta fase inicial, el sistema todavía no está analizando exclusivamente el gas procedente del suelo, sino que la señal está influida por el aire residual presente en el circuito interno del equipo y en la sonda de muestreo.

A medida que avanza la medición se produce un incremento progresivo de las concentraciones registradas, acompañado de una disminución significativa del error estadístico. Esta evolución refleja el proceso de purgado del sistema, mediante el cual el aire contenido inicialmente en el circuito es reemplazado gradualmente por el gas procedente del suelo a la profundidad de muestreo. En las tres mediciones se observa que este proceso tiene lugar durante los primeros minutos del ensayo y que, una vez superada esta fase inicial, la señal comienza a mostrar un comportamiento más estable.

De forma consistente en las tres mediciones analizadas, el momento en el que la concentración empieza a estabilizarse y el error disminuye de manera apreciable se sitúa aproximadamente entre los minutos 5 y 8 desde el inicio de la medición. A partir de este intervalo temporal las concentraciones registradas presentan oscilaciones dentro de un rango relativamente constante y los errores estadísticos se reducen de forma significativa, lo que indica que el sistema ya está analizando gas procedente del suelo de forma representativa.

Por tanto, a partir del análisis experimental de estas tres mediciones preliminares puede concluirse que es necesario considerar un tiempo mínimo de estabilización del sistema comprendido aproximadamente entre 5 y 8 minutos desde el inicio de la medición. Antes de transcurrido este intervalo, los valores registrados pueden estar influenciados por el aire residual del circuito y no reflejar de forma fiable la concentración real de radón en el suelo. En consecuencia, los datos correspondientes a los primeros minutos de medición deben interpretarse con cautela y no considerarse plenamente representativos del gas presente en el terreno.

3.5.1.2 Método 2: Cálculo del tiempo de purga del sistema a partir del volumen interno del circuito

Con el objetivo de complementar el análisis experimental descrito en el apartado anterior, se realizó también una estimación teórica del tiempo necesario para purgar completamente el circuito de muestreo del equipo RTM 1688-2. Este cálculo permite determinar cuánto tiempo debe transcurrir desde el inicio de la medición hasta que el gas presente en el sistema procede exclusivamente del suelo y no del aire residual contenido en los conductos.

El gas extraído del terreno debe atravesar varios elementos antes de alcanzar la cámara de detección del equipo, entre los que se incluyen la barra de inserción en el suelo, los tubos de conexión, el filtro y el propio volumen interno del instrumento. Todo este volumen de gas contenido en el circuito constituye el denominado volumen muerto del sistema, que debe ser renovado por la bomba del equipo antes de que la medición pueda considerarse representativa del gas del suelo.

Para estimar este volumen se ha considerado la configuración exacta del sistema utilizada durante las campañas de campo. El volumen de cada uno de los elementos del circuito se ha calculado mediante la expresión de la Figura 3-30.

$$t = \frac{V}{Q} \cdot F$$

Figura 3-30 Expresión de la geometría para el cálculo del tiempo de purga

- t: Tiempo.
- V: volumen total. El cual está comprendido por el volumen de los tubos, la sonda y el separador de condensados, además de por el volumen interno (Según documentación técnica)[11].
- Q: Caudal (Según documentación técnica)[11].
- F: Factor de renovación.

En primer lugar, se ha calculado el volumen correspondiente a los distintos elementos externos del circuito de muestreo.

Los tubos de conexión de pequeño diámetro, con una longitud aproximada de 24 cm y un diámetro interior de 3 mm, presentan un volumen reducido, aunque su contribución total debe considerarse al existir dos tramos de este tipo.

El tubo principal de conexión, con una longitud aproximada de 1,56 m y un diámetro interior de 6 mm, constituye uno de los elementos de mayor volumen dentro del circuito de muestreo.

A continuación, se considera la sonda metálica, utilizada para alcanzar la profundidad de medida. Esta barra presenta una longitud aproximada de 1,15 m y un diámetro interior de 8 mm, por lo que su volumen interno también contribuye de forma significativa al volumen total del sistema.

Finalmente se incluye el volumen correspondiente al separador de condensados con válvula de flotador. El volumen total resultante de todos estos elementos constituye el volumen muerto externo del sistema de muestreo. Además del volumen correspondiente a los conductos y elementos externos, es necesario considerar también el volumen interno del circuito del propio equipo RTM 1688. Según la documentación técnica del instrumento, el volumen interno del circuito de medida es aproximadamente de 250 cm³[11], valor que debe sumarse al volumen calculado para los elementos externos. Sumando el volumen muerto externo y el volumen interno del equipo se obtiene el volumen total de gas que debe ser renovado por la bomba antes de que el sistema comience a analizar gas procedente exclusivamente del suelo.

Este volumen representa la cantidad total de aire que debe ser desplazada desde el interior del circuito hasta el detector para que la señal registrada refleje únicamente la concentración de radón presente en el terreno.

Una vez conocido el volumen total del circuito, es posible estimar el tiempo necesario para renovar dicho volumen utilizando el caudal de la bomba del equipo en modo “FAST”.

A continuación, se sustituyen los valores en la expresión, No obstante, el proceso de purga del sistema no puede considerarse un desplazamiento perfecto tipo pistón, sino que se produce mediante mezcla progresiva del gas contenido en el circuito. Por este motivo, para garantizar que el gas presente en la cámara de detección procede casi exclusivamente del suelo, es habitual considerar varias renovaciones del volumen total del sistema.

Aplicando el factor de renovación se obtiene que para renovar aproximadamente el 99 % del volumen del sistema, el tiempo estimado se sitúa en torno a 6,6 min y para el caso de las mediciones en el patio de aulas aumenta a 10,7 min teniendo en cuenta que hay que sumarle el volumen del orificio en el suelo.

Este resultado indica que, desde un punto de vista puramente físico, el aire presente inicialmente en el circuito debería haber sido prácticamente sustituido por gas procedente del suelo tras aproximadamente 6–7 minutos de funcionamiento del sistema.

El tiempo de purga estimado a partir del volumen muerto del sistema muestra una buena concordancia con los resultados obtenidos en el análisis experimental descrito en el apartado anterior.

En las tres mediciones preliminares realizadas con intervalos de un minuto se observó que las concentraciones comienzan a estabilizarse aproximadamente entre los minutos 5 y 8, coincidiendo con una reducción significativa del error estadístico y con una mayor estabilidad en los valores registrados.

Esta coincidencia entre el cálculo teórico y las observaciones experimentales refuerza la interpretación de que la fase inicial de la medición está dominada por el proceso de purgado del circuito. Una vez renovado el volumen interno del sistema, el equipo comienza a analizar gas procedente del suelo de forma representativa.

En consecuencia, el cálculo del volumen muerto del circuito confirma que el tiempo mínimo necesario para la purga del sistema se sitúa aproximadamente en el intervalo de 6–7 minutos, valor que resulta coherente con el comportamiento observado en las mediciones experimentales realizadas al inicio del estudio.

3.5.1.3 Método 3: Recomendación del fabricante sobre el tiempo de purga del sistema

Tras realizar el análisis experimental y la estimación teórica del tiempo de purga del sistema, se consultó la documentación técnica del equipo RTM 1688-2 con el fin de contrastar los resultados obtenidos con las recomendaciones proporcionadas por el fabricante.

Según el manual de operación del instrumento, cuando el equipo se utiliza en modo “FAST” para mediciones de radón en aire de suelo, es necesario considerar un tiempo inicial de purgado del sistema antes de interpretar los valores registrados. Durante este periodo inicial la bomba del equipo renueva progresivamente el aire contenido en el circuito interno y en los conductos de muestreo, permitiendo que el gas analizado por el detector proceda realmente del punto de medición.

La documentación del fabricante indica que, en este modo de funcionamiento, debe considerarse un tiempo de purga aproximado de 15 minutos desde el inicio de la medición para asegurar que el sistema se encuentre completamente estabilizado y que las concentraciones registradas sean representativas del gas presente en el suelo. Este tiempo recomendado tiene en cuenta no solo el volumen interno del sistema, sino también el comportamiento real del flujo de aire en el circuito y las condiciones de funcionamiento del equipo.

Por tanto, de acuerdo con las indicaciones del manual del *RTM 1688-2*, los valores registrados durante los primeros minutos de funcionamiento del equipo deben interpretarse con cautela, considerándose que la señal alcanza un régimen completamente estable tras aproximadamente 15 minutos de operación en modo “FAST”.

A la vista de los resultados obtenidos mediante los tres métodos, puede observarse que tanto el análisis experimental como el cálculo teórico del volumen del sistema indican tiempos de estabilización del orden de varios minutos, situados aproximadamente entre 5 y 7 minutos. No obstante, con el fin de garantizar la máxima fiabilidad de las mediciones y siguiendo el criterio más conservador, en este trabajo se ha decidido adoptar el tiempo de purga recomendado por el fabricante, considerando que los datos obtenidos durante los primeros 15 minutos de cada medición no serán utilizados en el análisis de resultados.

De este modo se asegura que los valores finalmente considerados en la campaña de mediciones corresponden a un régimen completamente estabilizado del sistema y representan de forma fiable la concentración de radón presente en el suelo en cada punto de estudio.

3.5.2 Conclusiones

- Con el objetivo de mejorar la fiabilidad de los datos obtenidos, se decidió trabajar con intervalos de 5 minutos, ya que los intervalos de 1 minuto mostraban fluctuaciones constantes en las gráficas que dificultaban la interpretación correcta de las mediciones. El uso de intervalos más largos permite suavizar estas variaciones y obtener valores más representativos de la concentración medida.
- Se tuvieron en cuenta tanto los estudios teóricos y experimentales realizados para el cálculo del volumen muerto del sistema, como la recomendación del fabricante del equipo, que establece un tiempo inicial de estabilización de 15 minutos. Por este motivo, se decidió descartar los primeros 15 minutos de cada medición debido a que era la opción más conservadora no considerándose así completamente fiables los valores previos debido al proceso de renovación del aire dentro del sistema.
- Cada medición se estableció con una duración total de 35 minutos. De este modo, una vez eliminados los tres primeros intervalos correspondientes a los 15 minutos iniciales, se dispone de cuatro intervalos de 5 minutos con datos considerados fiables, lo que permite realizar un análisis más consistente y representativo de las mediciones realizadas.

3.6 Campaña de mediciones

3.6.1 Puntos de medición y distribución temporal de la campaña

Durante el desarrollo de la campaña experimental se realizaron un total de 33 mediciones de radón en gas del suelo como se muestra en la Tabla 3-2, distribuidas en distintos puntos del recinto de la ENM. Los puntos de medición se situaron en diferentes zonas del centro con el objetivo de cubrir una parte

representativa del recinto. Entre las áreas donde se llevaron a cabo las mediciones se incluyen la pista militar y zona del helipuerto, el palo de señales, el edificio de investigación, el cuartel Almirante Francisco Moreno, la zona del Centro de Adiestramiento de Seguridad Interior (CASI), Portocelo, la zona de lavandería, el edificio de radio, las inmediaciones del despacho del Páter, las inmediaciones del BBVA, las inmediaciones de la farmacia, el campo de fútbol, la residencia de oficiales, las casas de los mandos y el patio de aulas. La distribución de los puntos permitió realizar mediciones en distintas áreas funcionales del recinto y obtener una visión general del comportamiento del radón en el gas del suelo dentro de la ENM.

La campaña de mediciones se desarrolló entre los días 20 de febrero y 16 de marzo de 2026. No obstante, el ritmo de realización de las mediciones se vio condicionado en varias ocasiones por las condiciones meteorológicas, ya que la presencia de precipitaciones impedía llevar a cabo las mediciones en condiciones adecuadas. La lluvia puede afectar al proceso de muestreo al alterar el estado del suelo y modificar la circulación del gas en los poros del terreno, además de incrementar el riesgo de entrada de agua en el circuito de aspiración, lo que podría comprometer el correcto funcionamiento del equipo de medición. Por este motivo, las mediciones se realizaron en jornadas sin precipitaciones.

Cada medición tuvo una duración aproximada de entre 30 y 60 minutos, tiempo necesario para completar todas las etapas del proceso de medida. Este periodo incluye el desplazamiento hasta el punto seleccionado, la instalación de la sonda de muestreo y el montaje del sistema de medición, así como el tiempo de funcionamiento del equipo necesario para registrar los distintos intervalos de medición. Durante este proceso se obtienen normalmente alrededor de 35 minutos de mediciones, tras los cuales se procede al registro de los resultados en la ficha de campo correspondiente.

Punto	Fecha	Hora inicio	Hora final
P1	20/02/2026	10:42	11:12
P2	23/02/2026	21:09	21:39
P3	24/02/2026	12:23	12:53
P4	24/02/2026	16:00	16:45
P5	24/02/2026	17:45	18:22
P6	24/02/2026	18:31	19:07
P7	26/02/2026	15:34	16:09
P8	26/02/2026	16:20	16:55
P9	26/02/2026	17:11	17:46
P10	03/03/2026	14:41	15:16
P11	03/03/2026	15:25	16:00
P12	03/03/2026	16:13	16:50
P13	03/03/2026	16:59	17:34
P14	03/03/2026	17:43	18:18
P15	03/03/2026	18:31	19:06
P16	03/03/2026	19:16	19:51
P17	04/03/2026	16:00	16:35
P18	04/03/2026	17:33	18:08
P19	04/03/2026	18:19	18:54
P20	04/03/2026	19:07	19:42
P21	05/03/2026	10:41	11:16
P22	05/03/2026	16:05	16:40
P23	06/03/2026	14:39	15:14
P24	06/03/2026	15:36	16:11
P25	07/03/2026	12:00	12:35
P26	07/03/2026	12:50	13:25
P27	07/03/2026	13:39	14:16
P28	07/03/2026	11:16	11:51
P29	08/03/2026	11:30	12:05
P30	08/03/2026	16:39	17:39
P31	08/03/2026	17:40	18:40
P32	08/03/2026	18:43	19:43
P33	08/03/2026	19:55	20:55

Tabla 3-2 Distribución temporal de la campaña.

3.6.2 Punto de medición fijo

Tal y como se ha indicado en el apartado 3.2.2, se llevó a cabo una campaña de mediciones repetidas en un mismo punto (P16). El objetivo de esta campaña fue analizar la variabilidad temporal de la concentración de radón en el gas del suelo en una misma localización bajo diferentes condiciones ambientales.

Durante esta fase del estudio se realizaron un total de 16 mediciones, distribuidas en distintos días con el fin de observar posibles variaciones en los valores registrados. De este modo, entre el 10/03/2026 y el 16/03/2026 se llevaron a cabo todas las mediciones correspondientes a esta campaña experimental las cuales se muestran en la Tabla 3-3.

Punto	Fecha	Hora inicio	Hora final
P16.1	10/03/2026	09:10	09:45
P16.2	10/03/2026	13:47	14:22
P16.3	10/03/2026	17:00	17:35
P16.4	10/03/2026	21:00	21:35
P16.5	11/03/2026	09:03	09:38
P16.6	11/03/2026	14:00	14:35
P16.7	11/03/2026	17:00	17:35
P16.8	11/03/2026	21:00	21:35
P16.9	12/03/2026	09:00	09:35
P16.10	12/03/2026	14:00	14:35
P16.11	12/03/2026	17:00	17:35
P16.12	12/03/2026	21:00	21:35
P16.13	16/03/2026	10:00	10:35
P16.14	16/03/2026	13:50	14:25
P16.15	16/03/2026	17:00	17:35
P16.16	16/03/2026	21:00	21:35

Tabla 3-3 Distribución temporal de la campaña en un mismo punto.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de concentración de radón en suelo

En este apartado se presentan los resultados de concentración de radón en suelo obtenidos a partir de las mediciones realizadas en los distintos puntos del área de estudio.

4.1.1 División de la zona de estudio

En la Figura 4-1 se muestra la localización de todos los puntos de medición de concentración de radón en suelo realizados en el ámbito de la Escuela Naval Militar. Con el objetivo de facilitar el análisis de los resultados obtenidos, el área de estudio se ha dividido en cuatro zonas diferenciadas: Zona 1 (Z1), Zona 2 (Z2), Zona 3 (Z3) y Zona 4 (Z4).

La delimitación de estas zonas se ha realizado atendiendo a varios criterios. En primer lugar, se han agrupado los puntos de medición que se encuentran espacialmente próximos entre sí, con el fin de analizar áreas relativamente homogéneas. Asimismo, se ha tenido en cuenta la similitud de las características del subsuelo, la altitud aproximada de los puntos de medición y la disponibilidad de información geotécnica previa en cada sector. Esta división permite relacionar posteriormente los resultados de concentración de radón con las características geológicas y geotécnicas del terreno.

La Zona 1 (Z1), representada en gris, corresponde al área situada en la parte norte del recinto. Se trata de una zona ganada al mar, en la que el subsuelo está compuesto principalmente por rellenos antrópicos de espesor variable, bajo los cuales aparece sustrato rocoso a diferentes profundidades. En esta zona se dispone de tres estudios geotécnicos, descritos previamente en la página 31, que proporcionan información detallada sobre la estratigrafía y las características del terreno.

La Zona 2 (Z2), representada en amarillo, se localiza en el sector occidental del área de estudio y corresponde a un terreno rocoso próximo a la línea de costa, con altitudes comprendidas aproximadamente entre 8 y 12 metros sobre el nivel del mar. En esta zona se observa que uno de los puntos de medición (P29) se encuentra más alejado del resto. Esto se debe a que en el área denominada Barrio Industrial, donde también se dispone de un estudio geotécnico analizado en la página 31, no fue posible realizar mediciones adicionales debido a que gran parte de la superficie se encuentra pavimentada, lo que impedía alcanzar la profundidad mínima de medición (0,8 m) requerida por el equipo utilizado.

La Zona 3 (Z3), representada en azul, se sitúa en el sector sur del área de estudio. En esta zona el terreno presenta sustrato rocoso a cotas más elevadas, alcanzando altitudes cercanas a 20 metros sobre el nivel del mar.

Por último, la Zona 4 (Z4), representada en rosa, corresponde al sector oriental del recinto, donde el terreno está constituido igualmente por sustrato rocoso, aunque en este caso se encuentra prácticamente al nivel del mar.

Esta división del área de estudio permite analizar de forma diferenciada las concentraciones de radón en función de las características del terreno y facilitar la posterior comparación entre zonas con condiciones geológicas y geomorfológicas distintas.



Figura 4-1 División de la zona de estudio por zonas.

4.1.2 Resultados de las mediciones

En la Tabla 4-1 se recogen los valores medios de concentración de radón obtenidos en cada uno de los puntos de medición realizados en el área de estudio.

Punto	Fecha	Concentración media Ca (Bq/m³)
P1	20/02/2026	5.000,27
P2	23/02/2026	7.586,20
P3	24/02/2026	1.656,27
P4	24/02/2026	6.868,50
P5	24/02/2026	7.929,50
P6	24/02/2026	62.950,50
P7	26/02/2026	22.919,50
P8	26/02/2026	30.148,50
P9	26/02/2026	78.115,75
P10	03/03/2026	5.840,75
P11	03/03/2026	7.467,50
P12	03/03/2026	6.133,00
P13	03/03/2026	4.750,75
P14	03/03/2026	22.007,00
P15	03/03/2026	7.606,75
P16	03/03/2026	182.003,50
P17	04/03/2026	48.217,75
P18	04/03/2026	78.812,25
P19	04/03/2026	94.282,50
P20	04/03/2026	32.502,00
P21	05/03/2026	61.577,50
P22	05/03/2026	118.317,75
P23	06/03/2026	84.948,25
P24	06/03/2026	29.150,75
P25	07/03/2026	35.610,75
P26	07/03/2026	48.281,25
P27	07/03/2026	344.704,00
P28	07/03/2026	3.356,25
P29	08/03/2026	114.522,75
P30	08/03/2026	5.236,56
P31	08/03/2026	4.416,00
P32	08/03/2026	48.630,22
P33	08/03/2026	19.447,67

Tabla 4-1 Valores de concentración de radón de la campaña.

Asimismo, en el Anexo IV: Fichas de campo se incluyen las fichas de campo correspondientes a cada una de las mediciones realizadas y mencionadas anteriormente.

En la Figura 4-2 se representa la concentración media de radón obtenida en cada uno de los puntos de medición. Esta representación permite comparar de forma directa los valores registrados en cada punto y observar la variabilidad existente.

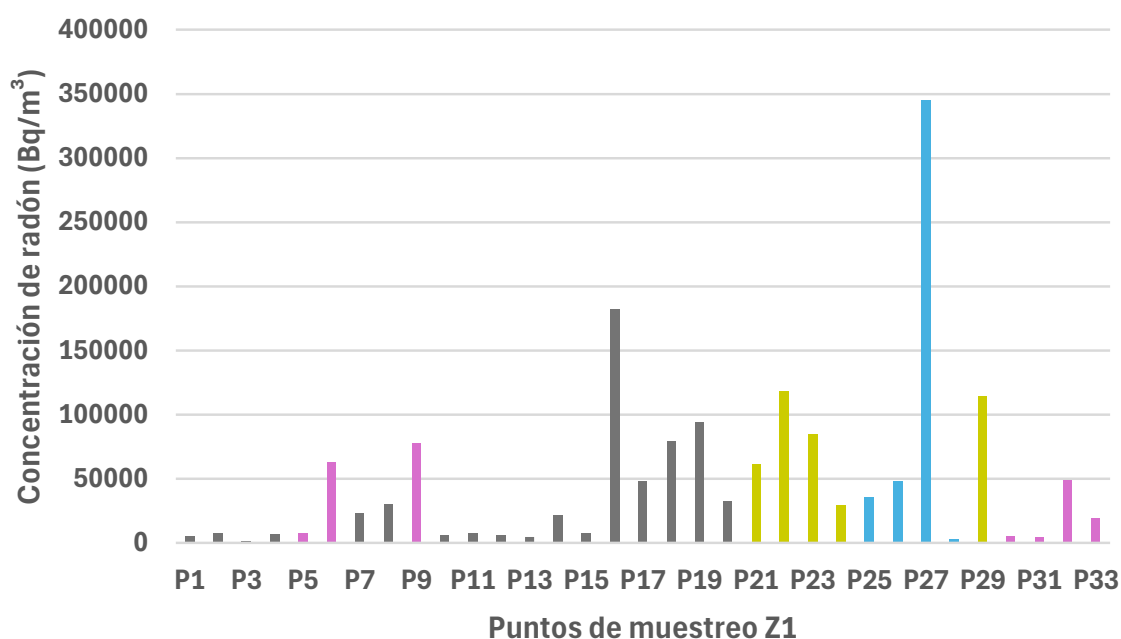


Figura 4-2 Concentraciones de radón de la campaña.

4.1.3 Análisis de la zona Z1

En la Tabla 4-2 se recogen los valores medios de concentración de radón obtenidos en los puntos de medición correspondientes a la Z1.

Puntos Z1	Concentración media Ca (Bq/m³)
P1	5.000,27
P2	7.586,20
P3	1.656,27
P4	6.868,50
P7	22.919,50
P8	30.148,50
P10	5.840,75
P11	7.467,50
P12	6.133,00
P13	4.750,75
P14	22.007,00
P15	7.606,75
P16	182.003,50
P17	48.217,75
P18	78.812,25
P19	94.282,50
P20	32.502,00

Tabla 4-2 Concentración de radón Z1.

En la Figura 4-3 se representa la concentración media de radón obtenida en cada uno de los puntos de medición de la Z1. Esta representación permite comparar de forma directa los valores registrados en cada punto y observar la variabilidad existente dentro de la zona.

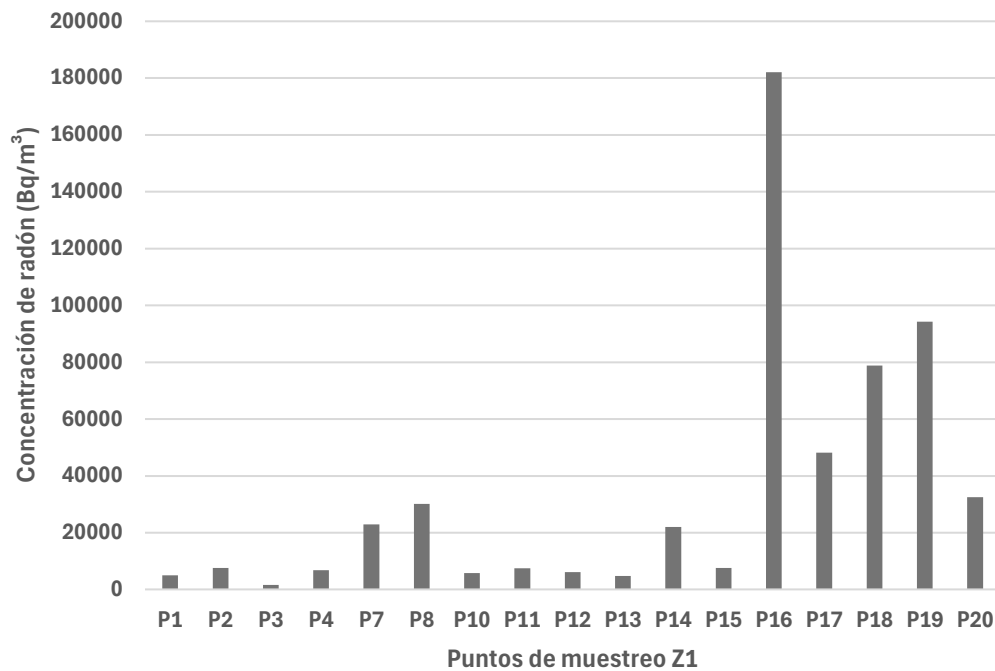


Figura 4-3 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z1.

Como puede observarse, las concentraciones de radón en la Z1 presentan diferencias entre los distintos puntos de medición, identificándose valores más elevados en los puntos de la zona del CASI (P17, P18, P19 Y P20) y destacando el valor P16 que sobresale por encima del resto, mientras que los valores más bajos corresponden a los puntos P1 y en especial al P3.

La Figura 4-4 presenta un diagrama de caja y bigotes correspondiente a las concentraciones de radón medidas en la Zona 1. Esta representación permite visualizar de forma resumida la distribución de los datos, incluyendo la mediana, la dispersión y la presencia de posibles valores extremos, la caja comprende el rango intercuartílico, entre el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), donde se encuentra el 50 % central de los datos. La línea situada dentro de la caja representa la mediana, mientras que la “X” indica el valor medio. Los bigotes muestran los valores extremos de la distribución. En caso de existir puntos situados por encima o por debajo de los bigotes, estos representan valores atípicos, es decir, datos que se alejan notablemente del resto de la muestra.

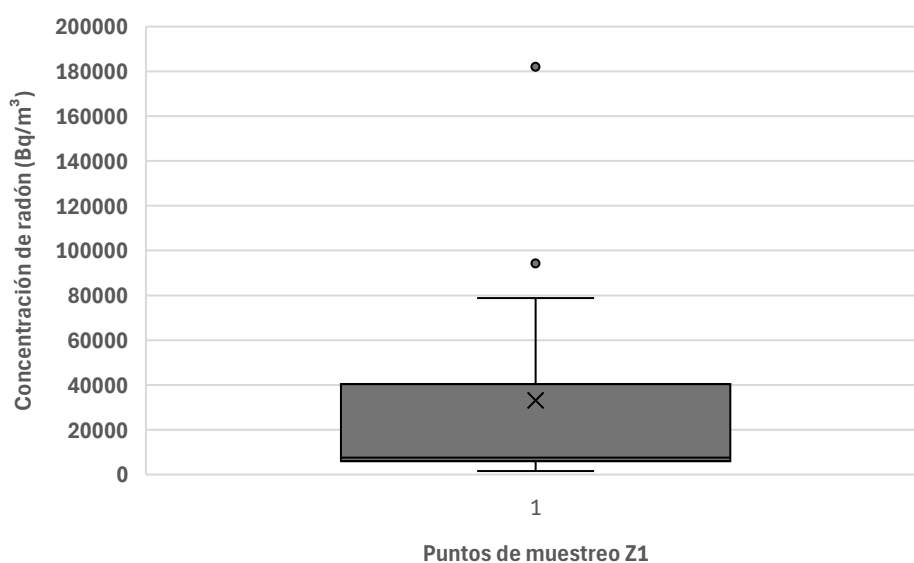


Figura 4-4 Diagrama de cajas y bigotes Z1.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran la variabilidad de la concentración de radón dentro de la Zona 1, lo que pone de manifiesto la heterogeneidad de los valores registrados dentro de esta zona.

4.1.4 Análisis de la zona Z2

En la Tabla 4-3 se recogen los valores medios de concentración de radón obtenidos en los puntos de medición correspondientes a la Z2.

Puntos Z2	Concentración media Ca (Bq/m³)
P21	61.577,50
P22	118.317,75
P23	84.948,25
P24	29.150,75
P29	114.522,75

Tabla 4-3 Concentración de radón Z2.

En la Figura 4-5 se representa la concentración media de radón registrada en cada uno de los puntos de medición de la Z2.

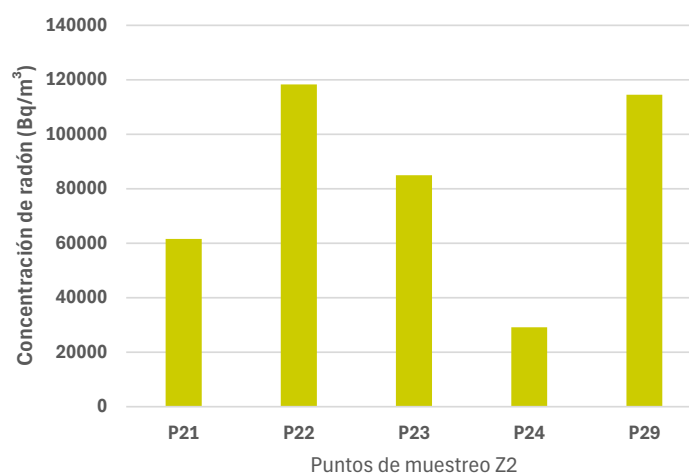


Figura 4-5 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z2.

Como puede observarse, las concentraciones registradas en esta zona presentan valores elevados en todos los puntos analizados, destacando especialmente los puntos P22 y P29, donde se registran los valores máximos, mientras que el valor mínimo corresponde al punto P24.

La Figura 4-6 presenta el diagrama de caja correspondiente a las concentraciones de radón registradas en la Z2.



Figura 4-6 Diagrama de cajas y bigotes Z2.

El diagrama permite observar la distribución de los valores registrados y la posición del valor central dentro del conjunto de datos analizado.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que las concentraciones de radón registradas en la Z2 presentan valores elevados en todos los puntos analizados, aunque con diferencias apreciables entre los distintos puntos de medición.

4.1.5 Análisis de la zona Z3

En la Tabla 4-4 se recogen los valores medios de concentración de radón obtenidos en los puntos de medición correspondientes a la Zona 3.

Puntos Z3	Concentración media Ca (Bq/m³)
P25	35.610,75
P26	48.281,25
P27	344.704
P28	3.356,25

Tabla 4-4 Concentración de radón Z3.

En la Figura 4-7 se representa la concentración media de radón registrada en cada uno de los puntos de medición de la Z3.

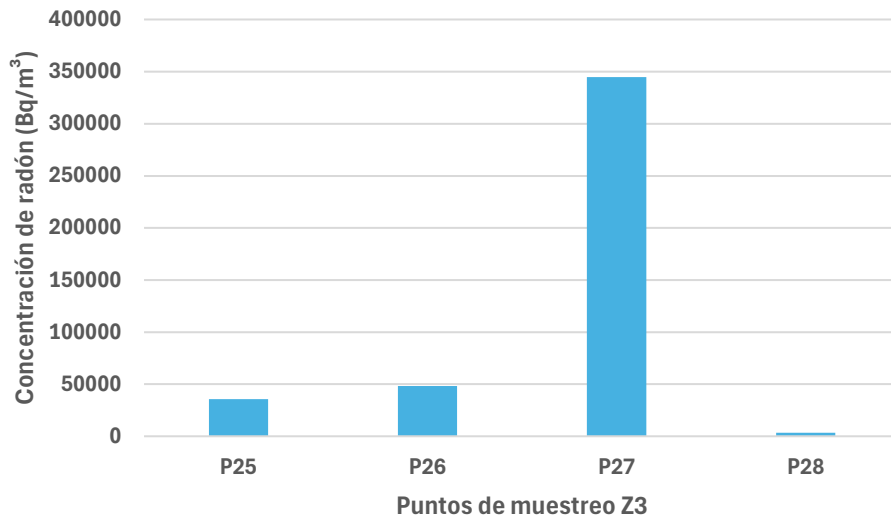


Figura 4-7 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z3.

Como puede observarse, las concentraciones registradas presentan diferencias notables entre los distintos puntos de medición. El valor máximo corresponde al punto P27, donde se registra una concentración significativamente superior al resto de mediciones de esta zona, mientras que el valor mínimo corresponde al punto P28.

La Figura 4-8 presenta el diagrama de caja correspondiente a las concentraciones de radón registradas en la Z3.

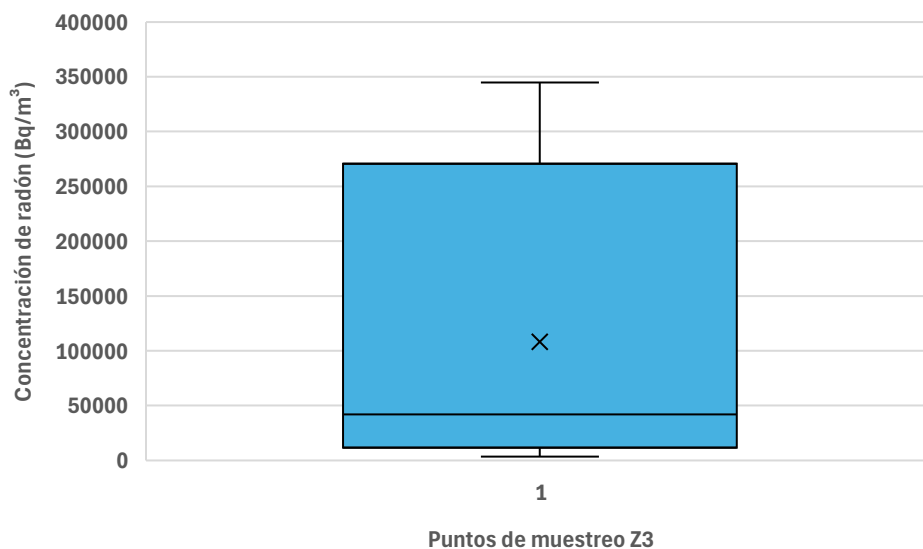


Figura 4-8 Diagrama de cajas y bigotes Z3.

El diagrama permite observar la distribución de los valores registrados y la posición del valor central dentro del conjunto de datos analizado, así como la presencia de valores extremos.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran una variabilidad elevada en las concentraciones de radón registradas dentro de la Z3, destacando especialmente el valor registrado en el punto P27, claramente superior al resto de mediciones realizadas en esta zona y de la campaña en general.

4.1.6 Análisis de la zona Z4

En la Tabla 4-5 se recogen los valores medios de concentración de radón obtenidos en los puntos de medición correspondientes a la Z4.

Puntos Z4	Concentración media Ca (Bq/m ³)
P5	7.929,5
P6	62.950,5
P9	78.115,75
P30	5.236,56
P31	4.416
P32	48.630,22
P33	19.447,67

Tabla 4-5 Concentración de radón Z4.

En la Figura 4-9 se representa la concentración media de radón registrada en cada uno de los puntos de medición de la Z4.

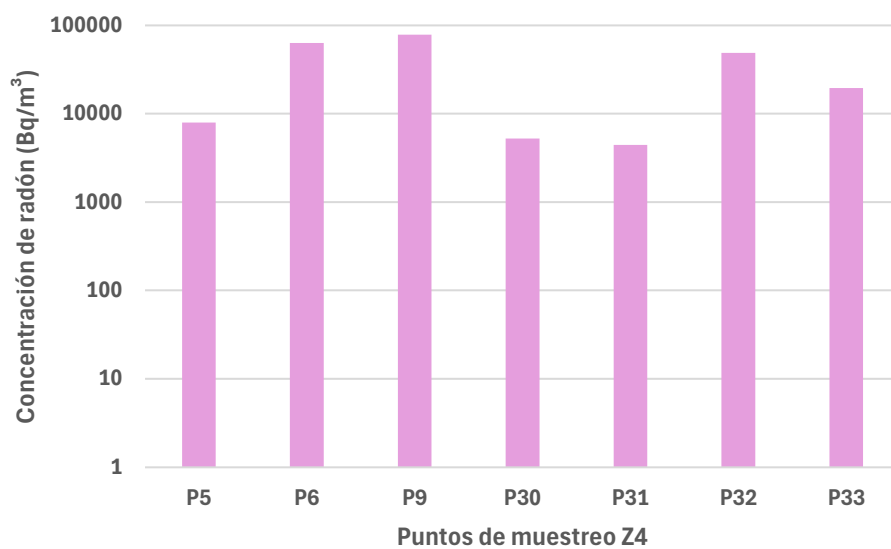


Figura 4-9 Concentración media de radón en los puntos de muestreo de la Z3.

Como puede observarse, las concentraciones registradas presentan diferencias entre los distintos puntos de medición. El valor máximo corresponde al punto P9, seguido de los puntos P6 y P32, donde también se registran concentraciones elevadas, mientras que los valores mínimos corresponden a los puntos P31 y P30.

La Figura 4-10 presenta el diagrama de caja correspondiente a las concentraciones de radón registradas en la Z4.

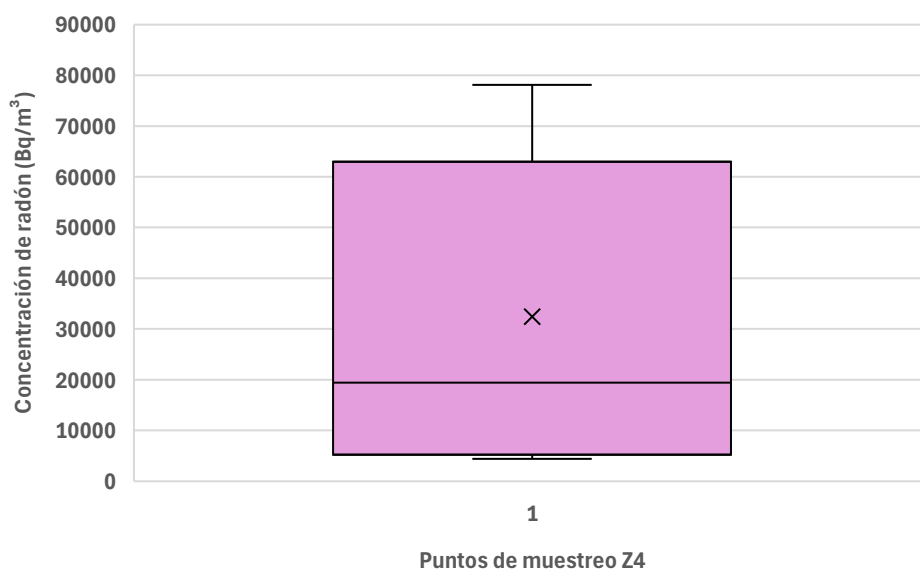


Figura 4-10 Diagrama de cajas y bigotes Z4.

El diagrama permite observar la distribución de los valores registrados y la posición del valor central dentro del conjunto de datos analizado, así como el rango de variación de las concentraciones medidas.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran una variabilidad apreciable en las concentraciones de radón registradas dentro de la Z4, con valores que oscilan entre los mínimos registrados en los puntos P31 y P30 y el máximo observado en el punto P9.

4.1.7 Análisis global de las concentraciones

Una vez analizadas de forma individual las concentraciones de radón registradas en cada una de las zonas del área de estudio, se procede a realizar un análisis global del conjunto de mediciones. Este análisis permite comparar el comportamiento de las concentraciones de radón entre las distintas zonas y visualizar la distribución general de los valores registrados en el recinto de la ENM. En la Tabla 4-6 se muestran estadísticos básicos de cada zona.

Zona	Nº Puntos	Concentración		
		media Ca (Bq/m ³)	Mínimo	Máximo
Z1	17	33.164,88	1.656,27	182.003,50
Z2	5	81.703,40	29.150,75	118.317,75
Z3	4	107.988,06	3.356,25	344.704,00
Z4	7	32.389,46	4.416,00	78.115,75

Tabla 4-6 Estadísticas de las mediciones.

En la Figura 4-11 se representa la concentración media de radón registrada en cada una de las zonas analizadas, lo que permite comparar de forma directa el comportamiento medio de las concentraciones entre las distintas áreas del recinto.

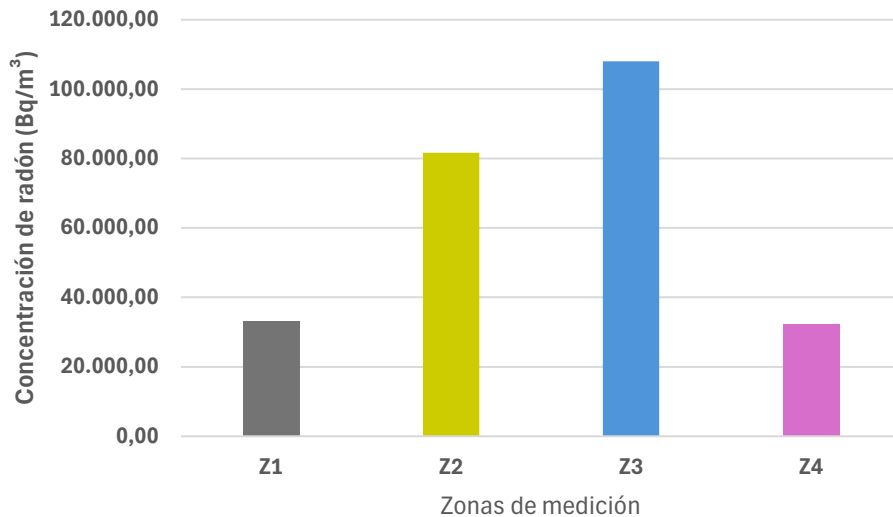


Figura 4-11 Concentración de radón en las zonas.

Como puede observarse, existen diferencias en las concentraciones medias registradas entre las distintas zonas analizadas, lo que pone de manifiesto la variabilidad espacial de la concentración de radón dentro del área de estudio.

En la Figura 4-12 se presenta un diagrama de caja y bigotes que compara la distribución de las concentraciones de radón registradas en las distintas zonas del área de estudio.

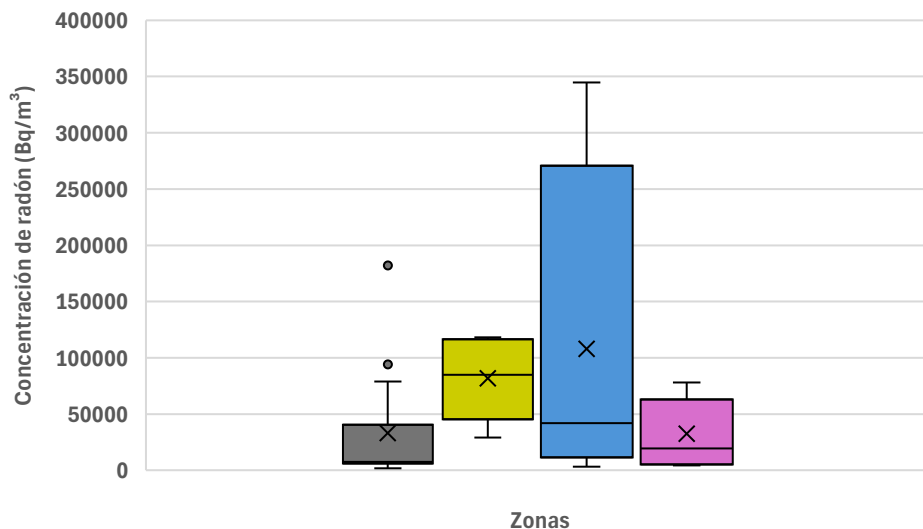


Figura 4-12 Diagrama de cajas y bigotes de las zonas.

El diagrama permite observar las diferencias en la distribución de las concentraciones de radón entre las distintas zonas analizadas, así como la presencia de valores extremos en algunas de ellas.

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, las concentraciones de radón medidas en el gas del suelo se han clasificado en diferentes intervalos de concentración. Para ello se han tomado como referencia los rangos utilizados en el método propuesto por *Neznal et al. (2004)* [18], [19] para la evaluación del potencial de radón en emplazamientos de edificación. De acuerdo con este criterio, las concentraciones inferiores a 30 kBq/m³ se consideran bajas, valores comprendidos entre 30 y 100 kBq/m³ se clasifican como medios, mientras que concentraciones superiores a 100 kBq/m³ se consideran altas. Esta clasificación permite realizar una primera interpretación del potencial de emisión de radón del terreno a partir de los valores de concentración medidos [18], [19].

En la Figura 4-13 se presenta una representación gráfica de las concentraciones de radón medidas en el gas del suelo en los distintos puntos de muestreo. Con el fin de facilitar la interpretación visual de los resultados, los valores se han representado mediante un código de colores en función de la clasificación previamente definida: verde para concentraciones bajas, naranja para concentraciones medias y rojo para concentraciones altas. Esta representación permite identificar de manera rápida las zonas del recinto donde se registran mayores concentraciones de radón en el suelo y comparar su distribución espacial dentro del área de estudio.



Figura 4-13 Clasificación de los puntos de muestreo según su concentración de radón.

Tras la representación espacial de los puntos de medida, resulta útil analizar también la distribución de las concentraciones registradas en función de los intervalos definidos. En la Figura 4-14 se muestra el histograma de frecuencias correspondiente a las concentraciones de radón medidas en el gas del suelo. En este gráfico se representa el número de puntos de muestreo que se sitúan dentro de cada uno de los intervalos de concentración definidos (0 Bq/m^3 – 30000 Bq/m^3 , 30000 Bq/m^3 – 100000 Bq/m^3 y $>100000 \text{ Bq/m}^3$), lo que permite visualizar de forma cuantitativa la distribución de los valores obtenidos en el área de estudio.

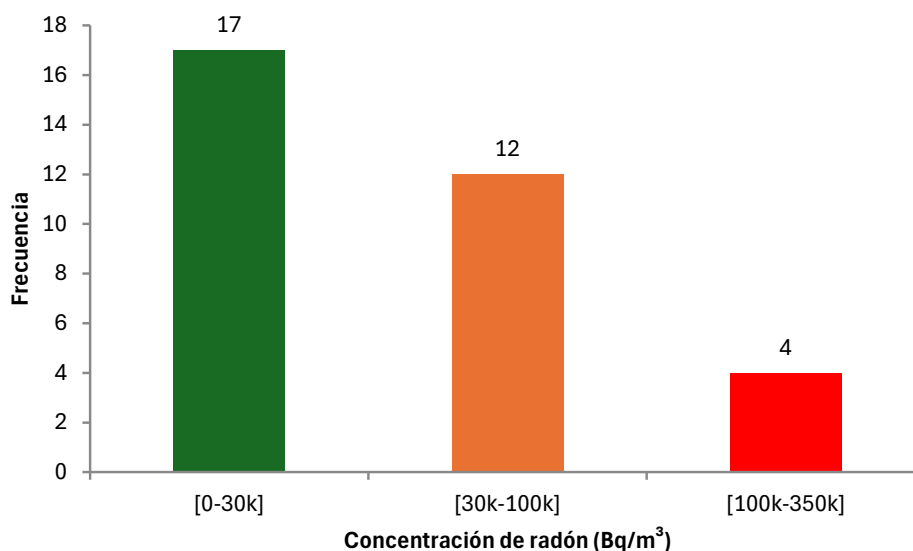


Figura 4-14 Histograma de frecuencias de las concentraciones de radón según los intervalos de clasificación establecidos.

A partir del histograma global se observa que la mayor parte de los puntos de medida se concentran en el intervalo de bajas concentraciones de radón (0–30 kBq/m³), con un total de 17 puntos, seguido del intervalo de concentraciones medias (30–100 kBq/m³) con 12 puntos. Por el contrario, las concentraciones altas (100–350 kBq/m³) presentan una frecuencia significativamente menor, con únicamente 4 puntos.

Esta distribución pone de manifiesto que, en el conjunto del área de estudio, predominan los valores bajos y moderados de radón, aunque existe una presencia puntual de concentraciones elevadas que, aunque minoritaria, resulta relevante desde el punto de vista del potencial de radón del terreno.

Con el objetivo de analizar la distribución de las concentraciones de radón en cada una de las zonas de estudio, se han elaborado diagramas circulares en los que se representa el porcentaje de puntos de muestreo clasificados en baja, media y alta concentración dentro de cada zona.

Esta representación permite visualizar de forma clara la proporción de cada categoría en las distintas zonas, facilitando la comparación entre ellas y la identificación de aquellas con mayor presencia de concentraciones elevadas de radón.

En la Figura 4-15 se muestra la distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z1, clasificadas en niveles bajo, medio y alto. Esta representación permite identificar de forma clara el peso relativo de cada categoría dentro del conjunto de puntos analizados en dicha zona.

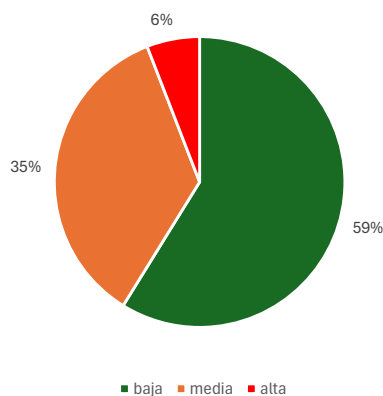


Figura 4-15 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z1.

Como puede observarse, en esta zona predominan claramente las concentraciones bajas, que representan aproximadamente el 59% de los puntos de medida. Las concentraciones medias suponen en torno al 35%, mientras que las concentraciones altas tienen una presencia muy reducida, con aproximadamente un 6% del total.

Esta distribución resulta coherente con la caracterización geotécnica de la zona, ya que se trata de un área identificada como terreno con rellenos antrópicos, lo que influye en la dinámica de generación y migración del radón. En consecuencia, la zona presenta un comportamiento dominado por niveles bajos y moderados de radón, con una escasa presencia de valores elevados.

La Figura 4-16 representa la distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z2.

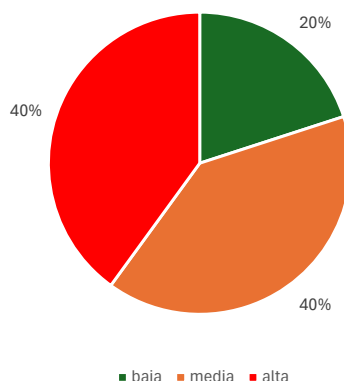


Figura 4-16 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z2.

En esta zona se observa una distribución más equilibrada entre las distintas categorías, con un 40% de los puntos clasificados como concentración media y otro 40% como concentración alta, mientras que las concentraciones bajas representan aproximadamente el 20%.

Este comportamiento es coherente con la caracterización del terreno, constituido por sustrato rocoso con presencia de rellenos antrópicos, lo que favorece tanto la generación de radón en el subsuelo como su migración hacia la superficie. En consecuencia, se observa una mayor presencia de valores elevados en comparación con otras zonas, lo que sugiere un mayor potencial de radón en el terreno.

La Figura 4-17 muestra la distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z3.

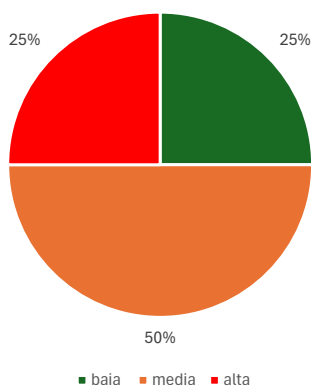


Figura 4-17 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z3.

Como puede observarse, en esta zona predominan las concentraciones medias, que representan el 50% de los puntos de medida, mientras que las concentraciones bajas y altas presentan una distribución equilibrada, con un 25% cada una.

Esta distribución es coherente con la presencia de sustrato rocoso en terreno natural, donde la generación de radón puede ser significativa, pero su migración hacia la superficie depende de las características del macizo rocoso. En consecuencia, se observa un comportamiento intermedio, con presencia tanto de valores moderados como elevados, lo que refleja cierta variabilidad en las concentraciones de radón dentro de la zona.

La Figura 4-18 representa la distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z4.

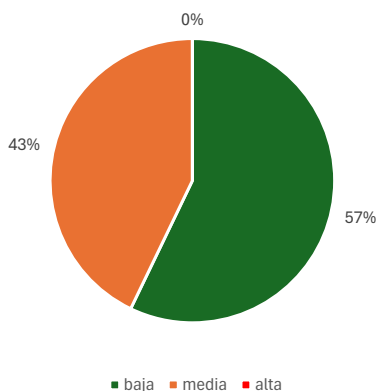


Figura 4-18 distribución porcentual de las concentraciones de radón en la Z4.

En esta zona se observa un claro predominio de las concentraciones bajas, que representan aproximadamente el 57% de los puntos de medida, seguidas de las concentraciones medias con un 43%, mientras que no se registran valores correspondientes a concentraciones altas.

Esta distribución es coherente con la presencia de sustrato rocoso cubierto por capas superficiales de materiales arenosos, que pueden favorecer cierta dispersión del gas y limitar la acumulación de concentraciones elevadas. En consecuencia, la zona presenta, en general, un comportamiento favorable en términos de potencial de radón, con ausencia de valores altos y predominio de niveles bajos y moderados.

4.1.8 Influencia de las condiciones ambientales

Con el objetivo de evaluar la posible influencia de las condiciones ambientales sobre la concentración de radón en el gas del suelo, durante la campaña de medición se registraron, junto a cada medida, distintos parámetros meteorológicos.

Por un lado, el equipo RTM 1688-2 permitió obtener variables del propio suelo, tales como la temperatura, la humedad y la presión. Por otro lado, se recopilaban datos meteorológicos exteriores correspondientes a las mismas franjas temporales, incluyendo temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y altura de la marea.

A partir de estos datos, se ha realizado un análisis estadístico descriptivo de cada una de las variables registradas, calculando para cada una de ellas los valores mínimo, máximo, rango y media. Este análisis permite evaluar la variabilidad de cada parámetro a lo largo de la campaña de medición y determinar su posible relevancia en el estudio.

Las variables que presentan un rango de variación reducido se consideran poco significativas desde el punto de vista de su posible influencia en la concentración de radón, por lo que no se profundizará en su análisis. Por el contrario, aquellas variables que muestran una mayor variabilidad serán objeto de un estudio más detallado mediante la representación de gráficos de dispersión, con el fin de identificar posibles relaciones entre dichas variables y la concentración de radón en el gas del suelo.

Los resultados del análisis estadístico descriptivo de las variables consideradas se presentan en la Tabla 4-7.

Variable	Mínimo	Máximo	Rango	Media
T ^a ambiente (°C)	11,1	16,4	5,3	13,8
HR aire (%)	58	84	26	72,5
Presión atm (hPa)	1009	1022	13	1014,5
Altura de marea (m)	0,8	3,5	2,7	2,5
T ^a terreno (°C)	12	24	12	17,9
HR terreno (%)	50	90	40	69,5
Presión terreno (hPa)	1012	1025	13	1018,4

Tabla 4-7 análisis estadístico descriptivo de las variables.

A partir del análisis estadístico descriptivo realizado, se observa que la temperatura ambiente presenta un rango de variación reducido a lo largo de la campaña de medición, lo que indica una estabilidad significativa de esta variable durante el periodo estudiado. En comparación con el resto de los parámetros analizados, su variabilidad es limitada, lo que dificulta la identificación de una posible relación con la concentración de radón en el gas del suelo.

Debido a esta escasa variación, se considera que la temperatura ambiente tiene una influencia poco significativa en la concentración de radón dentro del intervalo temporal estudiado, por lo que se descarta para el análisis posterior de correlación.

Por otro lado, el resto de las variables analizadas presentan un rango de variación más amplio a lo largo de la campaña de medición, lo que sugiere una posible influencia sobre la concentración de radón en el gas del suelo. En particular, variables como la humedad del terreno, la temperatura del suelo, la presión del terreno y la altura de la marea muestran una variabilidad significativa, por lo que se consideran relevantes para su estudio.

Con el objetivo de evaluar la posible relación entre estas variables y la concentración de radón, se han elaborado gráficos de dispersión en los que se representa la concentración de radón frente a cada uno de estos parámetros. Este análisis permite identificar visualmente posibles tendencias o correlaciones que puedan indicar la existencia de una relación directa o indirecta entre las condiciones ambientales y el comportamiento del radón en el subsuelo.

En la Figura 4-19 se presenta el gráfico de dispersión que relaciona la concentración de radón en el gas del suelo con la humedad relativa del aire, con el objetivo de analizar la posible influencia de este parámetro sobre los niveles de radón medidos.

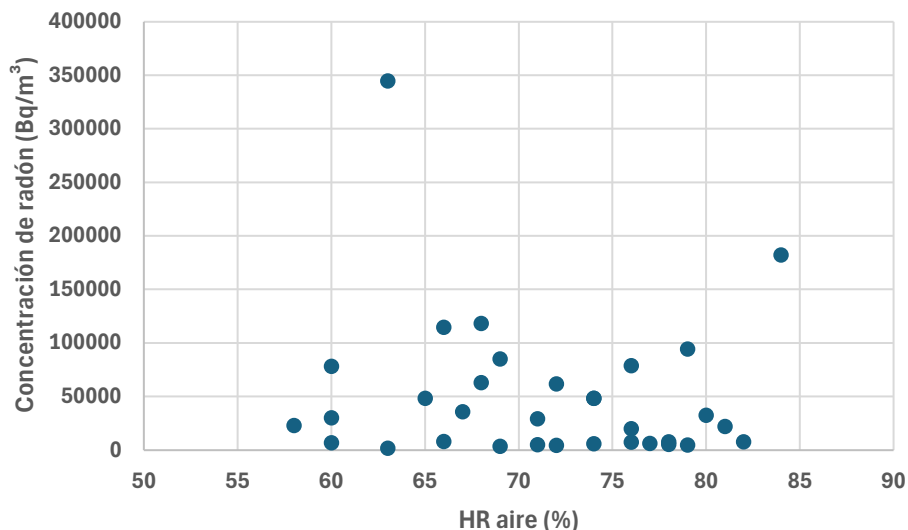


Figura 4-19 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la HR del aire.

A partir del análisis del gráfico, no se observa una relación clara entre la concentración de radón y la humedad relativa del aire, ya que los datos se distribuyen de forma dispersa sin seguir una tendencia definida. Aunque se registran valores elevados de concentración para distintos rangos de humedad, estos no responden a un patrón concreto, lo que indica que, dentro de las condiciones de la campaña, la humedad del aire no ejerce una influencia significativa sobre la concentración de radón en el gas del suelo.

En la Figura 4-20 se presenta el gráfico de dispersión que relaciona la concentración de radón en el gas del suelo con la presión atmosférica, con el objetivo de analizar la posible influencia de este parámetro sobre los niveles de radón medidos.

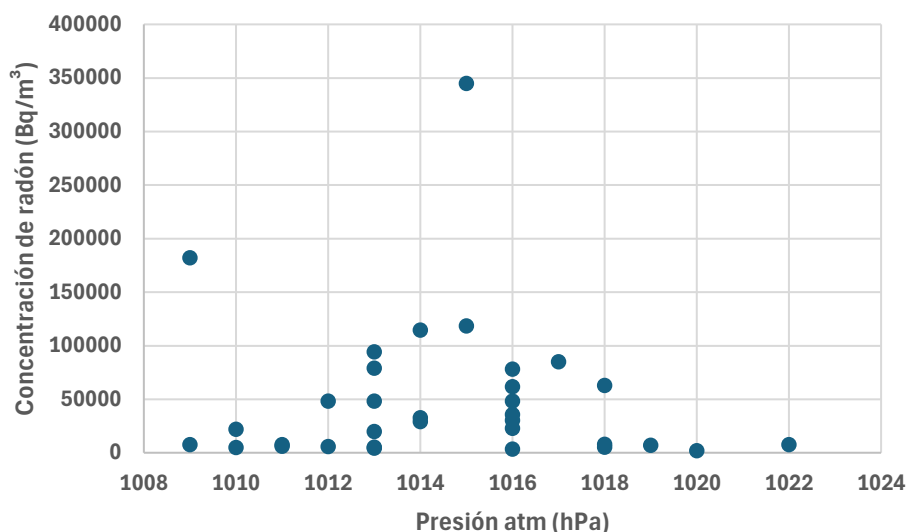


Figura 4-20 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la presión atmosférica.

A partir del análisis del gráfico, no se observa una relación clara entre la concentración de radón y la presión atmosférica, ya que los datos se distribuyen de forma dispersa sin mostrar una tendencia definida. Los valores elevados de radón aparecen asociados a distintos rangos de presión, lo que indica que, dentro del intervalo de variación registrado durante la campaña, la presión atmosférica no ejerce una influencia significativa sobre la concentración de radón en el gas del suelo.

En la Figura 4-21 se muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la altura de la marea, con el fin de evaluar si las variaciones del nivel del mar pueden influir en el comportamiento del radón en el subsuelo.

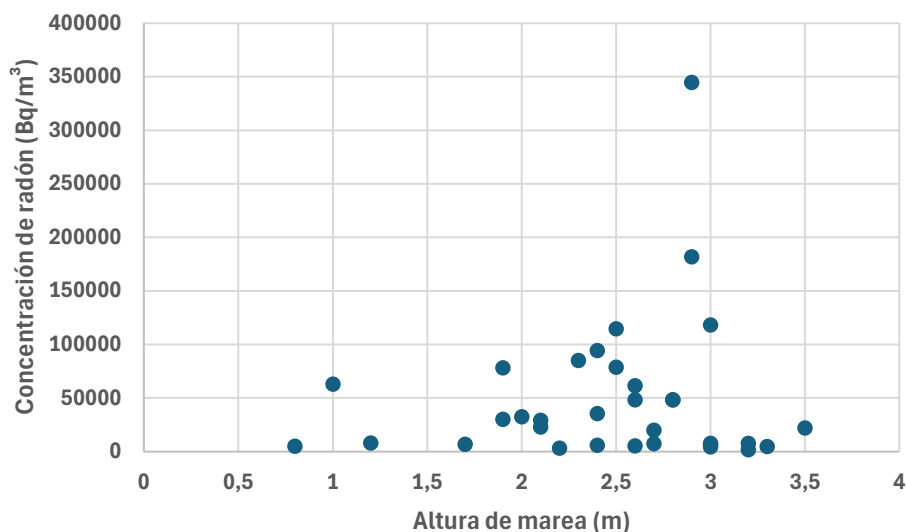


Figura 4-21 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la altura de la marea.

El análisis del gráfico no permite identificar una relación clara entre la altura de la marea y la concentración de radón, ya que los valores aparecen dispersos y sin una tendencia definida. Aunque se observan concentraciones elevadas para determinados niveles de marea, estas no siguen un patrón consistente, lo que sugiere que este parámetro no condiciona de manera significativa la variabilidad del radón en el área de estudio.

En la Figura 4-22 se representa el gráfico de dispersión que relaciona la concentración de radón en el gas del suelo con la temperatura del terreno, con el objetivo de analizar la posible influencia de las condiciones térmicas del subsuelo en la generación y migración del radón.

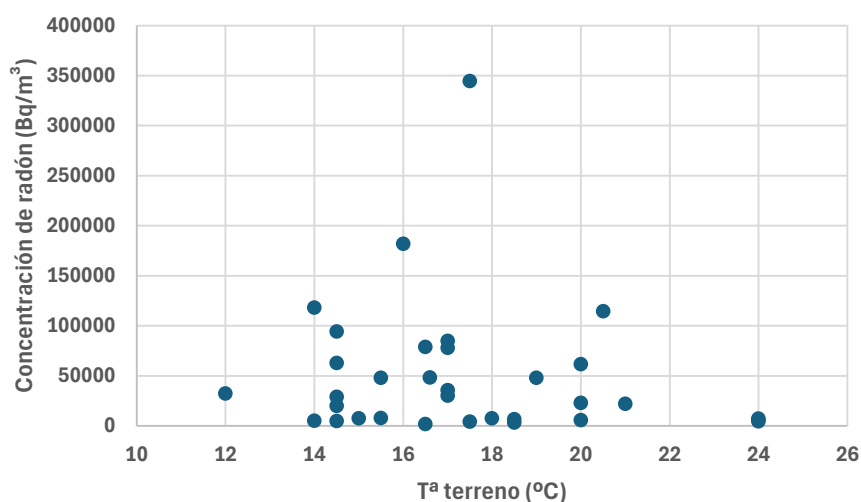


Figura 4-22 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la temperatura del terreno.

A partir del gráfico obtenido, no se aprecia una relación definida entre la temperatura del terreno y la concentración de radón, ya que los valores se distribuyen de forma irregular a lo largo de todo el rango de temperaturas. Se observan tanto concentraciones altas como bajas para valores similares de temperatura, lo que indica la ausencia de una dependencia clara entre ambas variables en las condiciones analizadas.

En la Figura 4-23 se presenta el gráfico de dispersión que relaciona la concentración de radón en el gas del suelo con la humedad relativa del terreno, con el objetivo de evaluar la posible influencia del contenido de humedad en el comportamiento del radón en el subsuelo.

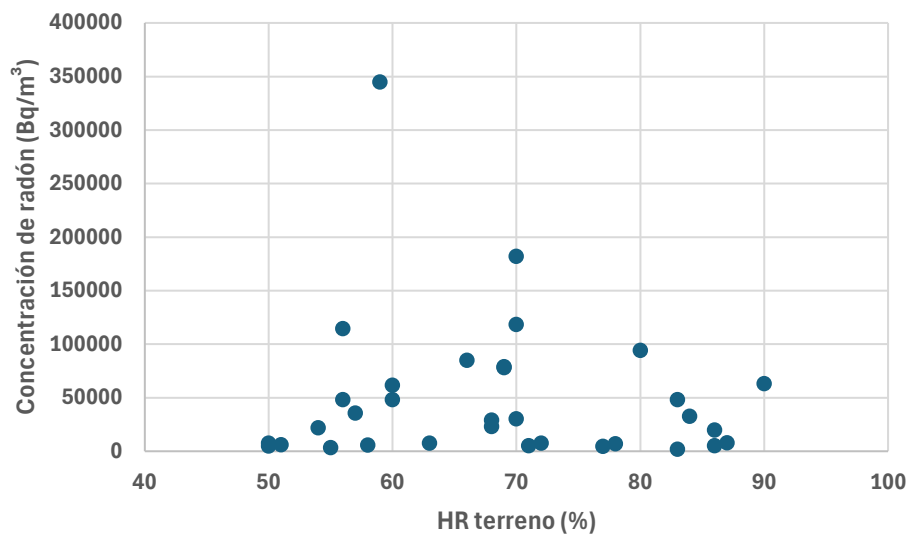


Figura 4-23 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la HR del terreno.

El análisis del gráfico muestra una dispersión significativa de los datos, sin que se pueda identificar una tendencia clara entre la humedad del terreno y la concentración de radón. Aunque cabría esperar cierta influencia de la humedad en la migración del gas, los resultados obtenidos no evidencian una relación directa, lo que indica que este factor no resulta determinante en las condiciones estudiadas.

En la Figura 4-24 se representa el gráfico de dispersión que relaciona la concentración de radón en el gas del suelo con la presión del terreno, con el objetivo de analizar la posible influencia de este parámetro en la migración del radón a través del subsuelo.

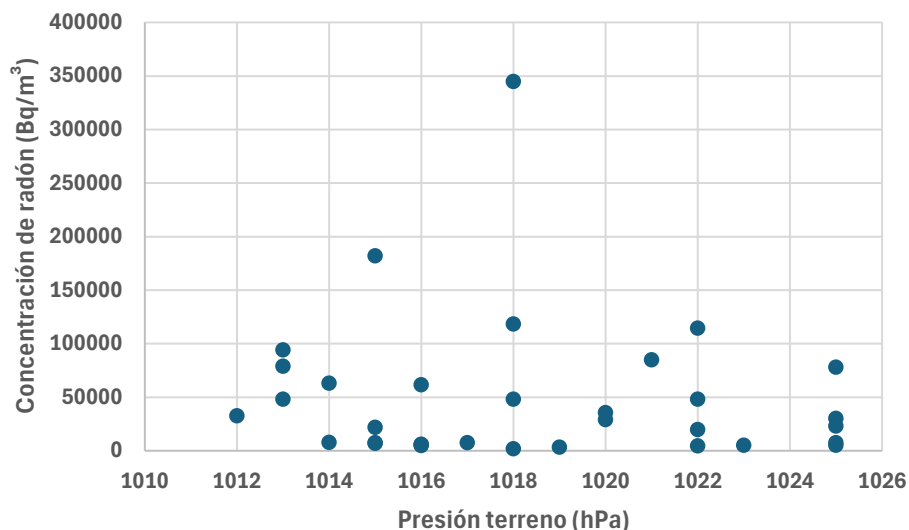


Figura 4-24 Relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la presión del terreno.

A partir del gráfico obtenido, no se observa una relación clara entre la presión del terreno y la concentración de radón, ya que los valores aparecen distribuidos de forma dispersa a lo largo de todo el rango de presiones. Las concentraciones elevadas se registran para distintos valores de presión sin seguir una tendencia definida, lo que indica que este parámetro no condiciona de manera significativa el comportamiento del radón en las condiciones estudiadas.

En conjunto, el análisis de las distintas variables meteorológicas no ha permitido identificar relaciones claras con la concentración de radón en el gas del suelo. A pesar de la variabilidad observada en parámetros como la humedad del terreno, la temperatura del suelo, la presión del terreno o la altura de la marea, los resultados muestran una distribución dispersa de los datos sin tendencias definidas. Estos resultados sugieren que, en el ámbito temporal y espacial de la campaña realizada, la concentración de radón está controlada principalmente por factores geológicos y características propias del terreno, más que por las condiciones ambientales registradas durante las mediciones.

4.2 Estimación de la permeabilidad del suelo

La evaluación del potencial de radón del terreno requiere considerar no solo la concentración de radón presente en el suelo, sino también la capacidad del terreno para permitir el transporte de este gas hacia la superficie. Esta capacidad está directamente relacionada con la permeabilidad del suelo, parámetro que controla la facilidad con la que el radón puede desplazarse a través de los poros del terreno.

En el presente trabajo no se dispone de mediciones directas de la permeabilidad del suelo en los puntos de medición realizados. Esto se debe, en parte, a que en el centro no se dispone del equipamiento necesario para llevar a cabo ensayos específicos de permeabilidad del suelo in situ. Por este motivo, la clasificación de permeabilidad considerada en este estudio no corresponde a una medición directa, sino que ha sido obtenido mediante una estimación basada en la información geotécnica disponible y en la caracterización del terreno realizada previamente.

Debe tenerse en cuenta, por tanto, que la permeabilidad utilizada en este trabajo constituye una estimación cualitativa del comportamiento del terreno, obtenida a partir del tipo de suelo dominante en cada zona y de su comportamiento típico descrito en la literatura geotécnica. Esta aproximación permite disponer de un valor orientativo de permeabilidad que resulta suficiente para la evaluación posterior del *Radon Index* [18], [19], cuyo objetivo es clasificar el potencial de radón del terreno.

4.2.1 Caracterización del terreno por zonas

A partir de la información obtenida en los estudios geotécnicos disponibles y del análisis cartográfico histórico realizado previamente, se ha procedido a caracterizar de forma general el tipo de terreno dominante en cada una de las zonas definidas dentro del área de estudio. Esta caracterización permite identificar las principales características del subsuelo y constituye la base para la posterior estimación de la permeabilidad del terreno.

En la Z1, el terreno corresponde en su totalidad a terreno ganado al mar, tal como se ha identificado en el análisis cartográfico histórico realizado previamente. Los estudios geotécnicos disponibles indican la presencia de rellenos antrópicos de carácter granular con presencia de bolos, apoyados sobre sustrato rocoso situado a diferentes profundidades.

La Z2 se localiza en un área próxima a la línea de costa y presenta terreno rocoso, aunque en superficie se identifican rellenos antrópicos heterogéneos compuestos principalmente por arenas y gravas.

La Z3 corresponde a un sector situado a mayor altitud dentro del recinto de la ENM. Según el análisis cartográfico histórico, esta zona se encuentra sobre terreno natural que no ha sido ganado al mar, estando constituida principalmente por sustrato rocoso.

Por último, la Z4 se sitúa en un área próxima al nivel del mar. De acuerdo con el análisis cartográfico histórico, esta zona también corresponde a terreno natural, no identificado como terreno ganado al mar. No obstante, debido a su proximidad a la antigua línea de costa, es razonable considerar la presencia de sustrato rocoso cubierto por capas superficiales de materiales arenosos, pudiendo incluir fracciones limosas, asociadas a procesos de sedimentación en ambientes litorales. La Tabla 4-8 resume la caracterización general del terreno en cada una de las zonas analizadas.

Zona	Tipo de terreno dominante
Z1	Relleno antrópico granular con bolos sobre sustrato rocoso
Z2	Roca con rellenos antrópicos heterogéneos de arenas y gravas
Z3	Sustrato rocoso en terreno natural
Z4	Sustrato rocoso con capas superficiales arenosas (posible presencia de limos)

Tabla 4-8 Tipo de terreno dominante en las zonas de la ENM.

4.2.2 Clasificación de la permeabilidad

Una vez caracterizado el tipo de terreno dominante en cada zona, se ha procedido a estimar la permeabilidad del suelo a partir de la relación existente entre el tipo de material presente y su comportamiento hidráulico.

Para ello se ha utilizado la clasificación de permeabilidad del suelo incluida en uno de los estudios geotécnicos consultados, en la cual se establece una estimación de la permeabilidad en función del tipo de suelo o material predominante. Esta clasificación permite asignar de forma aproximada un rango de permeabilidad a cada zona del área de estudio en función de sus características geotécnicas. La Tabla 4-9 muestra la tabla de referencia utilizada para la estimación de la permeabilidad del suelo en función del tipo de material.

Terreno	Coefficiente de permeabilidad
UG0 Rellenos heterogéneos	$10^{-2} < ks < 10^1 \text{ cm/s}$
UG1 Depósitos cuaternarios (arenas)	$10^{-1} < ks < 10^2 \text{ cm/s}$
- Suelos granulares: Arenas	
UG2 Suelos residuales	$10^{-4} < ks < 10^{-1} \text{ cm/s}$
Granitos	$10^{-6} < ks < 10^{-2} \text{ cm/s}$
Paragneises	
UG3 Sustrato rocoso	$ks \leq 10^{-7} \text{ cm/s}$

Tabla 4-9 Estimación de permeabilidades.

A partir de la caracterización del terreno dominante en cada una de las zonas del área de estudio y de la clasificación de permeabilidad presentada anteriormente, se ha realizado una estimación de la permeabilidad del suelo para cada zona.

Debe recordarse que estos valores no corresponden a mediciones directas del coeficiente de permeabilidad, sino a una estimación basada en el tipo de terreno predominante, utilizando como referencia los rangos de permeabilidad indicados en los estudios geotécnicos consultados.

La Tabla 4-10 recoge el resultado final de esta estimación.

Zona	Tipo de terreno dominante	Clasificación geotécnica	Permeabilidad del terreno
Z1	Relleno antrópico granular con bolos	UG0	Alta
Z2	Roca con rellenos heterogéneos de arenas y gravas	UG0-UG1	Alta
Z3	Sustrato rocoso en terreno natural	UG3	Baja
Z4	Sustrato rocoso en terreno natural próximo al nivel del mar	Transición UG1-UG3	Media

Tabla 4-10 Estimación de la permeabilidad del suelo en las distintas zonas del área de estudio en función del tipo de terreno dominante.

Como puede observarse, las zonas Z1 y Z2 presentan permeabilidades estimadas más elevadas, lo cual se relaciona con la presencia de rellenos antrópicos y materiales granulares, caracterizados por una mayor porosidad y capacidad de circulación de gases a través del terreno.

Por su parte, la Z3, correspondiente principalmente a sustrato rocoso natural, presenta una permeabilidad estimada baja, coherente con la menor capacidad de circulación de gases asociada a este tipo de materiales. En cambio, la Z4 muestra un comportamiento intermedio, estimándose una permeabilidad media debido a la presencia de capas superficiales arenosas sobre el sustrato rocoso, propias de su proximidad a la antigua línea de costa, lo que favorece en cierta medida la circulación de gases en comparación con un sustrato rocoso compacto.

4.3 Determinación del Radon Index

Con el objetivo de evaluar el potencial de radón del terreno en el área de estudio, se ha procedido a la determinación del *Radon Index*. Este índice permite clasificar el terreno en función de su capacidad potencial para generar y transportar radón desde el subsuelo hacia la superficie.

4.3.1 Parámetros utilizados para el cálculo

Para la determinación del *Radon Index* en el área de estudio se han considerado dos parámetros principales: la concentración de radón en el gas del suelo y la permeabilidad del terreno.

Los valores de concentración de radón utilizados corresponden al tercer cuartil (cA75) de las concentraciones obtenidas en los puntos de medición de cada zona, calculadas a partir de los datos presentados en el apartado 4.1.2. Este parámetro se emplea como valor representativo de la zona, de acuerdo con la metodología de referencia[18], [19], al permitir caracterizar de forma más adecuada los niveles elevados de concentración de radón.

Por su parte, la permeabilidad del suelo se ha estimado a partir de la caracterización geotécnica del terreno dominante en cada zona, como se muestra en el apartado 4.2.2, clasificándose de forma cualitativa en baja, media o alta en función de las características litológicas y granulométricas del suelo.

La Tabla 4-11 recoge los valores de concentración de radón (cA75) y la clasificación de permeabilidad adoptada para cada una de las zonas del área de estudio, parámetros empleados posteriormente para la determinación del *Radon Index* mediante la tabla de clasificación correspondiente.

Zona	Nº puntos	cA75 (kBq·m ⁻³)	Permeabilidad del terreno
Z1	17	32,50	Alta
Z2	5	114,52	Alta
Z3	4	48,28	Baja
Z4	7	48,63	Media

Tabla 4-11 Valores del tercer cuartil de la concentración de radón (cA75) y clasificación de la permeabilidad del terreno por zonas.

4.3.2 Clasificación del Radon Index

La determinación del Radon Index en el área de estudio se ha realizado siguiendo la metodología de referencia basada en la relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y la permeabilidad del terreno. Esta metodología permite clasificar el potencial de radón del terreno en tres categorías: bajo, medio y alto.

Dado que la permeabilidad del suelo no ha sido medida directamente en campo, sino estimada a partir de la información geotécnica disponible, se ha optado por emplear la clasificación cualitativa de la permeabilidad (baja, media o alta). En consecuencia, la determinación del Radon Index se ha llevado a cabo mediante la tabla de clasificación correspondiente, en lugar del uso de modelos continuos que requieren valores numéricos de permeabilidad.

Para cada una de las zonas definidas, se ha utilizado como parámetro representativo de la concentración de radón el tercer cuartil (cA75), expresado en kBq·m⁻³, junto con la clasificación de permeabilidad asignada. A partir de estos dos parámetros, se ha determinado la categoría de Radon Index mediante la Tabla 4-12 de clasificación, en la que se establecen los rangos de concentración de radón en función de la permeabilidad del terreno.

Radon index (RI) category	Soil gas radon concentration (kBq·m ⁻³)		
Low	cA < 30	cA < 20	cA < 10
Medium	30 ≤ cA ≤ 100	20 ≤ cA ≤ 70	10 ≤ cA ≤ 30
High	cA ≥ 100	cA ≥ 70	cA ≥ 30
	Low permeability	Medium permeability	High permeability

Tabla 4-12 Clasificación del Radon Index en función de la concentración de radón en el gas del suelo (cA) y la permeabilidad del terreno.

Aplicando estos criterios a los valores representativos obtenidos para cada zona del área de estudio, se ha procedido a determinar el *Radon Index* correspondiente en cada caso, cuyos resultados se recogen en la Tabla 4-13.

Zona	Ca75 (kBq·m ⁻³)	Permeabilidad del terreno	Radon Index
Z1	32,50	Alta	Alto
Z2	114,52	Alta	Alto
Z3	48,28	Baja	Medio
Z4	48,63	Media	Medio

Tabla 4-13 Determinación del Radon Index.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que las zonas Z1 y Z2 presentan un *Radon Index* alto, asociado tanto a concentraciones elevadas de radón como a una alta permeabilidad del terreno, lo

que favorece la migración del gas hacia la superficie. Por su parte, las zonas Z3 y Z4 muestran un *Radon Index* medio, debido a la combinación de concentraciones moderadas y permeabilidades baja y media, respectivamente.

En conjunto, el área de estudio presenta un potencial significativo de radón, condicionado principalmente por la presencia de zonas con elevada concentración y alta permeabilidad. Estos resultados son coherentes con las características geológicas del emplazamiento y ponen de manifiesto la influencia del tipo de terreno en la generación y migración del radón en el subsuelo.

4.4 Variación temporal de la concentración de radón en un mismo punto

Con el objetivo de analizar la posible influencia de las condiciones meteorológicas sobre la concentración de radón en el gas del suelo, se realizaron una serie de mediciones repetidas en un mismo punto del área de estudio (P16) a lo largo de varios días consecutivos como se muestra en el apartado 3.2 y en el 3.6.2.

4.4.1 Resultados de las mediciones

En la Tabla 4-14 se recogen las concentraciones de radón obtenidas en el punto de medición a lo largo de los distintos días y horas de muestreo.

Punto	Fecha	Media radón (Bq/m ³)
P16.1	10/03/2026	191.548
P16.2	10/03/2026	193.499
P16.3	10/03/2026	203.424
P16.4	10/03/2026	200.711
P16.5	11/03/2026	194.894
P16.6	11/03/2026	194.855
P16.7	11/03/2026	199.423
P16.8	11/03/2026	201.654
P16.9	12/03/2026	195.522
P16.10	12/03/2026	192.510
P16.11	12/03/2026	198.109
P16.12	12/03/2026	199.069
P16.13	16/03/2026	192.748
P16.14	16/03/2026	194.062
P16.15	16/03/2026	198.372
P16.16	16/03/2026	199.755

Tabla 4-14 Variación temporal de la concentración de radón en un mismo punto (P16).

4.4.2 Evolución diaria de la concentración de radón

Con el fin de analizar la evolución de la concentración de radón a lo largo de cada jornada, se han representado los valores obtenidos en las distintas mediciones realizadas en un mismo día. Estas representaciones permiten observar la variabilidad intradiaria de la concentración de radón en el punto de estudio.

En la Tabla 4-15 se muestran las concentraciones de radón registradas en las distintas mediciones realizadas a lo largo del día 10/03/2026, mientras que en la Figura 4-25 se representa la evolución de dichas concentraciones en función del tiempo de medición.

Tiempo (min)	Medición 1 (0910-0945)	Medición 2 (1347-1422)	Medición 3 (1700-1735)	Medición 4 (2100-2135)
5	50.280	144.958	151.236	148.424
10	135.267	177.736	179.968	169.853
15	171.422	186.210	191.791	182.755
20	187.359	191.795	195.064	196.051
25	183.285	195.253	202.205	200.868
30	201.507	192.964	209.652	199.606
35	194.043	193.985	206.777	206.320

Tabla 4-15 Concentraciones de radón en un mismo punto día 10/03/2026.

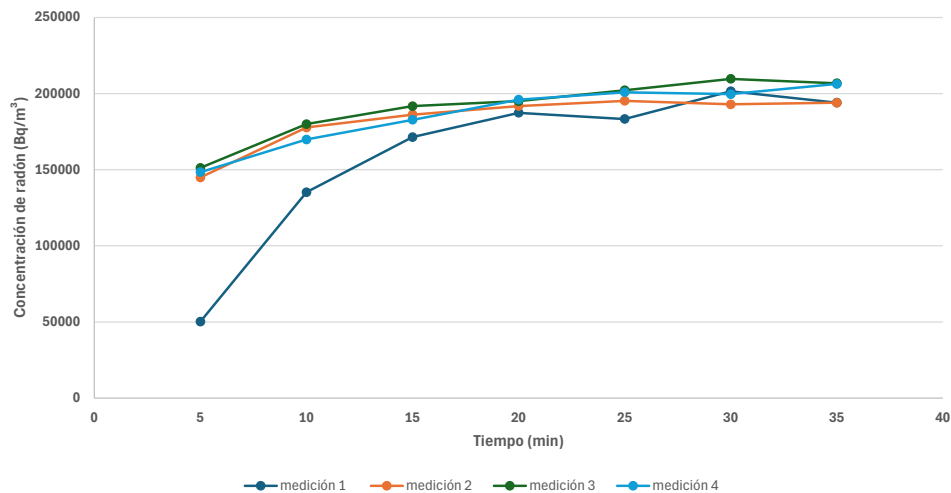


Figura 4-25 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 10/03/2026.

En la Tabla 4-16 se muestran las concentraciones de radón registradas en las distintas mediciones realizadas a lo largo del día 11/03/2026, mientras que en la Figura 4-26 se representa la evolución de dichas concentraciones en función del tiempo de medición.

Tiempo (min)	Medición 1 (0903-0938)	Medición 2 (1400-1435)	Medición 3 (1700-1735)	Medición 4 (2100-2135)
5	106.729	137.504	154.408	148.357
10	157.356	170.883	180.925	173.563
15	179.295	194.506	185.816	191.621
20	189.056	190.454	194.208	189.558
25	192.918	194.551	194.359	200.826
30	192.576	196.045	204.076	207.765
35	205.029	198.372	205.051	208.470

Tabla 4-16 Concentraciones de radón en un mismo punto día 11/03/2026.

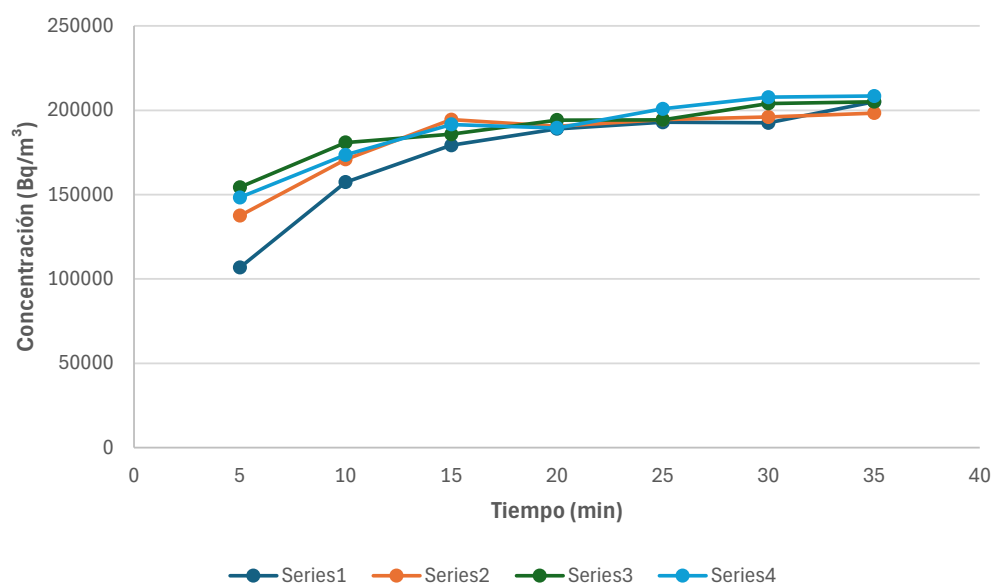


Figura 4-26 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 11/03/2026.

En la Tabla 4-17 se muestran las concentraciones de radón registradas en las distintas mediciones realizadas a lo largo del día 12/03/2026, mientras que en la Figura 4-27 se representa la evolución de dichas concentraciones en función del tiempo de medición.

Tiempo (min)	Medición 1 (0900-0935)	Medición 2 (1400-1435)	Medición 3 (1700-1735)	Medición 4 (2100-2135)
5	105.783	141.099	149.064	145.673
10	155.998	174.237	178.581	169.453
15	179.901	186.591	183.448	175.643
20	185.351	191.033	193.714	194.352
25	188.680	190.343	202.635	195.783
30	204.169	193.790	197.673	202.359
35	203.888	194.875	198.415	203.782

Tabla 4-17 Concentraciones de radón en un mismo punto día 12/03/2026.

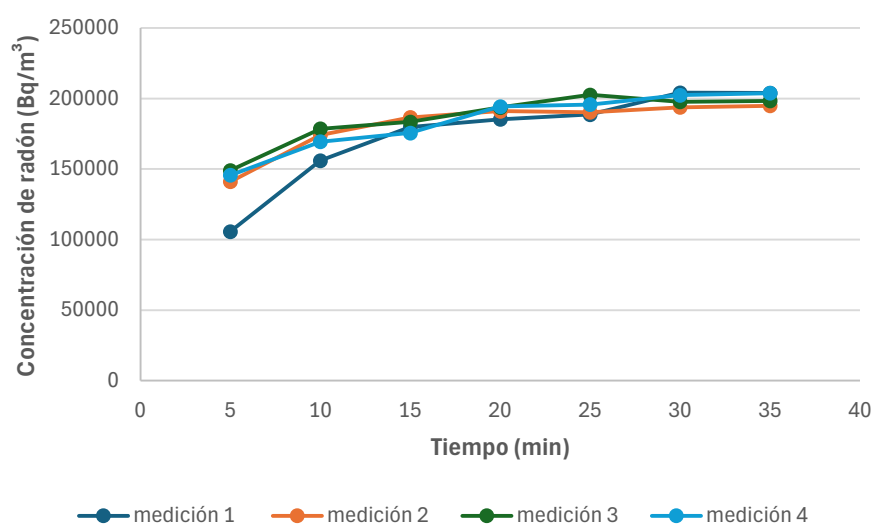


Figura 4-27 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 12/03/2026.

En la Tabla 4-18 se muestran las concentraciones de radón registradas en las distintas mediciones realizadas a lo largo del día 16/03/2026, mientras que en la Figura 4-28 se representa la evolución de dichas concentraciones en función del tiempo de medición.

Tiempo (min)	Medición 1 (0900-0935)	Medición 2 (1400-1435)	Medición 3 (1700-1735)	Medición 4 (2100-2135)
5	105.738	152.395	132.748	49.306
10	130.983	175.467	147.647	128.800
15	152.918	188.647	179.736	163.468
20	192.748	194.727	196.783	179.696
25	194.062	195.647	196.601	185.722
30	198.372	198.738	199.837	194.999
35	199.755	200.738	198.725	191.231

Tabla 4-18 Concentraciones de radón en un mismo punto día 16/03/2026.

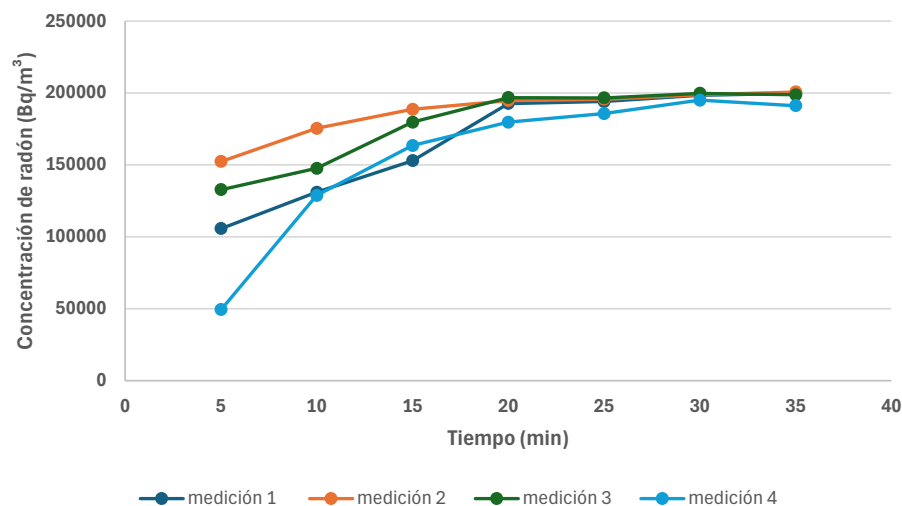


Figura 4-28 Evolución de las concentraciones en un mismo punto en función del tiempo de medición 16/03/2026.

En general, a partir de las representaciones anteriores se observa un comportamiento consistente en todas las mediciones realizadas, en las que la concentración de radón presenta un incremento progresivo durante los primeros minutos de medida, seguido de una tendencia a la estabilización a partir de aproximadamente los 15 minutos.

Este patrón se repite en las distintas jornadas analizadas, independientemente de las condiciones en las que se realizaron las mediciones, lo que indica un comportamiento característico del sistema de medida empleado. En particular, se aprecia que los valores iniciales de concentración son inferiores y aumentan rápidamente hasta alcanzar un régimen prácticamente estacionario, lo que confirma que el tiempo de medida seleccionado es adecuado para obtener valores representativos de la concentración de radón en el suelo.

Asimismo, las diferencias observadas entre las distintas mediciones realizadas a lo largo del día son relativamente moderadas y se mantienen dentro de un mismo rango de valores, lo que sugiere una cierta estabilidad de la concentración de radón en el punto de estudio durante el periodo analizado.

4.4.3 Análisis de variables relevantes

Con el objetivo de evaluar la posible relación entre la concentración de radón en el suelo y las condiciones meteorológicas, la marea y la hora de medida se han analizado conjuntamente los valores de radón obtenidos con los parámetros ambientales registrados durante las mediciones, incluyendo la

temperatura, la presión atmosférica, la humedad relativa y el estado de la marea recogidos en la Tabla 4-19.

Fecha	Hora	Media Radón (Bq/m ³)	Temp (°C)	Presión (hPa)	Humedad (%)	Marea (m)
10/03/2026	09:10	191548	10,2	1018	86	2,3
10/03/2026	13:47	193499	15,3	1017	64	3,1
10/03/2026	17:00	203424	15	1016	66	2,6
10/03/2026	21:00	200711	12,9	1017	79	1,9
11/03/2026	09:03	194894	10,6	1019	84	2,1
11/03/2026	14:00	194855	15,7	1018	62	3,2
11/03/2026	17:00	199423	15,1	1017	65	2,7
11/03/2026	21:00	201654	12,7	1018	80	2
12/03/2026	09:00	195522	10,8	1020	83	2
12/03/2026	14:00	192510	16,2	1019	61	3,3
12/03/2026	17:00	198109	15,6	1018	64	2,8
12/03/2026	21:00	199069	13,1	1019	74	2,2
16/03/2026	10:00	192748	12,6	1018	76	2,4
16/03/2026	13:50	194062	15,1	1017	68	3,1
16/03/2026	17:00	198372	15,8	1016	66	3,4
16/03/2026	21:00	199755	13,7	1017	78	3

Tabla 4-19 Concentración de las mediciones con sus respectivas variables meteorológicas.

En la Figura 4-29 se representa la relación entre la concentración de radón y la temperatura del aire registrada durante las mediciones.

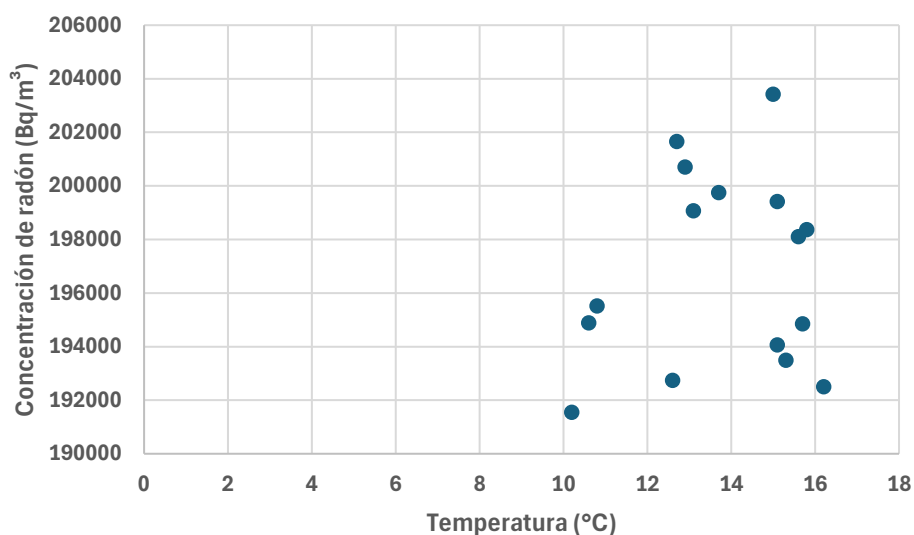


Figura 4-29 Relación entre la concentración de radón y la temperatura.

A partir de la representación gráfica, no se observa una relación clara entre la temperatura y la concentración de radón. Los valores se distribuyen de forma dispersa, sin seguir una tendencia definida, lo que indica que la temperatura no parece ejercer una influencia significativa en las variaciones registradas de radón en el suelo durante las mediciones realizadas.

En la Figura 4-30 se muestra la relación entre la concentración de radón y la presión atmosférica.

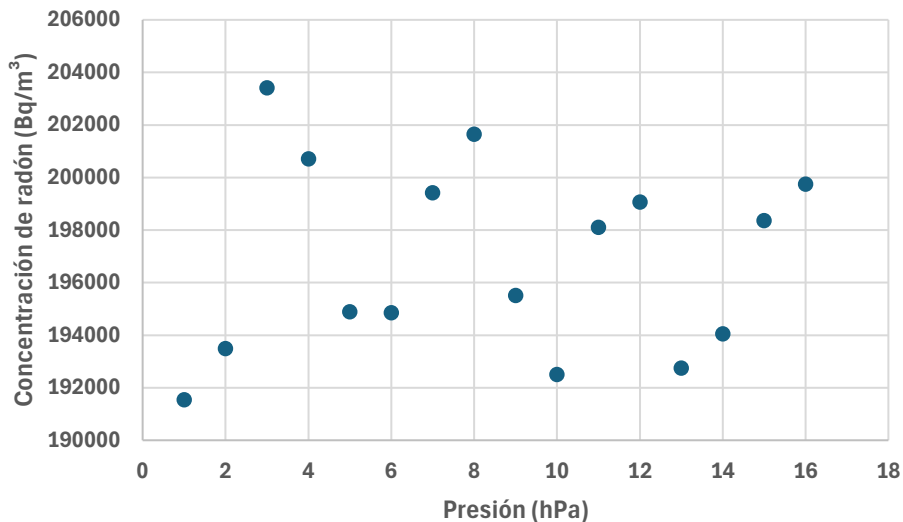


Figura 4-30 Relación entre la concentración de radón y la presión atmosférica.

En el caso de la presión atmosférica, los datos tampoco muestran una tendencia clara que permita establecer una relación directa con la concentración de radón. La dispersión de los puntos sugiere que, dentro del rango de valores registrados, la presión no presenta una influencia significativa sobre las concentraciones medidas.

La Figura 4-31 presenta la relación entre la concentración de radón y la humedad relativa del aire.

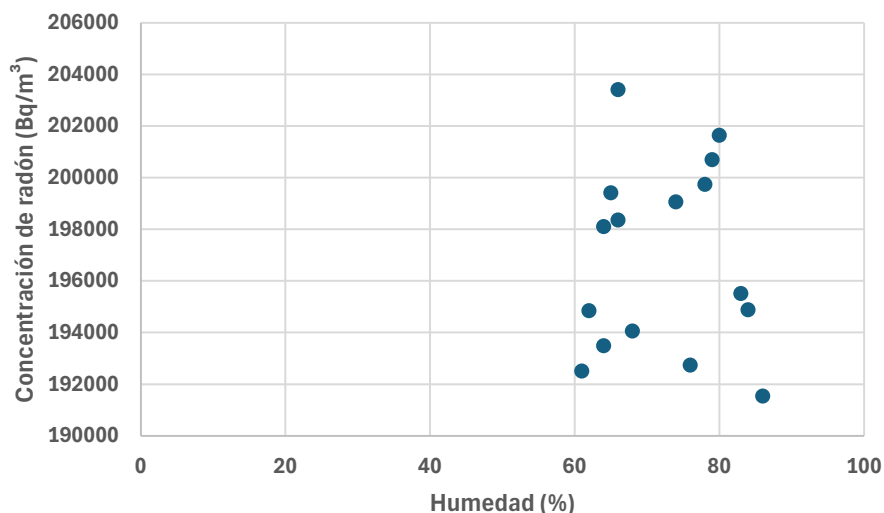


Figura 4-31 Relación entre la concentración de radón y la humedad relativa.

La relación entre la humedad relativa y la concentración de radón presenta igualmente una distribución dispersa, sin una tendencia evidente. Aunque algunos valores altos de radón coinciden con humedades intermedias, no se aprecia un patrón consistente que permita afirmar una correlación directa entre ambas variables.

En la Figura 4-32 se representa la concentración de radón en función de la altura de la marea en el momento de la medición.

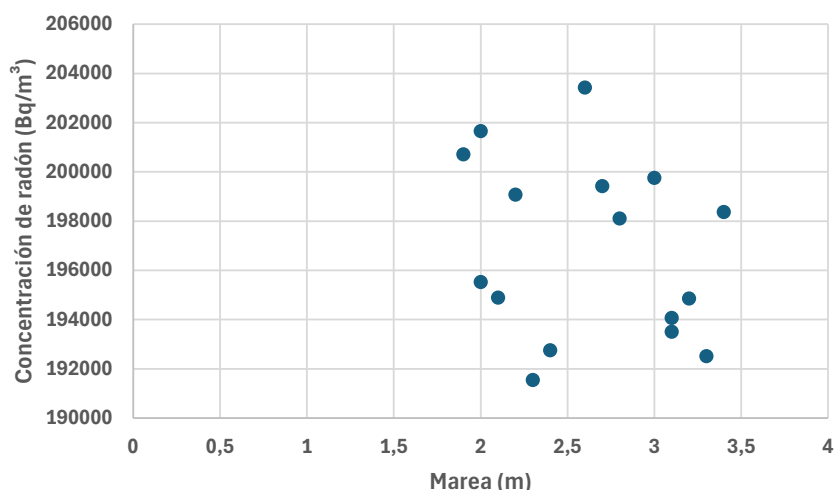


Figura 4-32 Relación entre la concentración de radón y la altura de la marea.

En cuanto a la altura de la marea, la representación gráfica no evidencia una relación clara con la concentración de radón. Los valores se distribuyen de manera irregular a lo largo de todo el rango de mareas, lo que sugiere que este factor no condiciona de forma determinante las concentraciones registradas en el punto de estudio.

En la Figura 4-33 se muestra la relación entre la concentración de radón y la hora de realización de la medición.

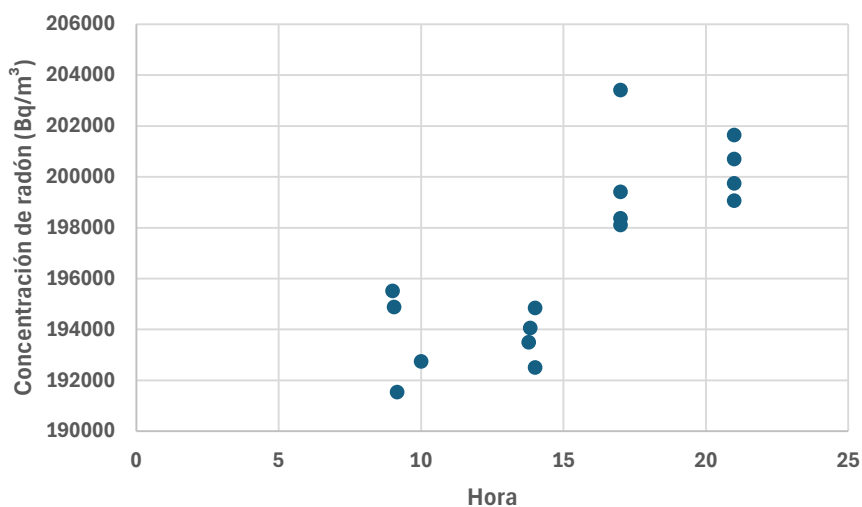


Figura 4-33 Relación entre la concentración de radón y hora de la toma de datos.

En el caso de la hora de medición, los datos no muestran una tendencia clara que permita establecer una relación directa con la concentración de radón. La dispersión de los puntos sugiere que, dentro del rango de horas analizado, la variable temporal no presenta una influencia significativa sobre las concentraciones medidas.

En conjunto, el análisis de las mediciones realizadas en un mismo punto pone de manifiesto que, si bien se observan ligeras variaciones en la concentración de radón a lo largo del tiempo, estas no presentan una relación clara con las variables meteorológicas analizadas, la marea o la hora de realización de la medición. Los resultados sugieren que las fluctuaciones registradas responden principalmente a la propia dinámica del gas en el subsuelo y a las condiciones locales del terreno, más que a cambios puntuales en la temperatura, presión, humedad o estado de la marea. Esto refuerza la idea de que la concentración de radón en suelo está fundamentalmente condicionada por factores geológicos y geotécnicos, en coherencia con los resultados obtenidos en los apartados anteriores y reforzando lo analizado en el apartado 4.1.8.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo la caracterización de la concentración de radón en el gas del suelo en el recinto de la ENM. Para ello, se ha realizado una campaña de mediciones en distintos puntos representativos del terreno, con el objetivo de analizar su distribución espacial, estimar el potencial de radón y estudiar su variabilidad temporal. A partir de los datos obtenidos y su posterior análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Se ha comprobado que la concentración de radón en el gas del suelo presenta una elevada variabilidad espacial dentro del recinto de la ENM, existiendo diferencias significativas entre los distintos puntos de medida. Encontrando puntos con concentraciones extremadamente distantes como el P16 y el P3.
2. Los valores de concentración obtenidos muestran, en numerosos puntos, niveles elevados de radón, lo que pone de manifiesto la importancia del estudio del terreno previo a cualquier actuación constructiva.
3. La clasificación de las concentraciones en niveles bajos, medios y altos ha permitido identificar zonas con mayor potencial de radón, facilitando la interpretación de los resultados y su aplicación práctica.
4. A partir del análisis geotécnico del terreno y la estimación de su permeabilidad, se ha determinado el potencial de radón mediante la determinación del potencial de radón del terreno mediante la aplicación de la metodología de evaluación del índice de radón propuesta por Neznal et al. (2004) [19], obteniéndose mayoritariamente valores correspondientes a un potencial alto.
5. La naturaleza granítica del sustrato presente en la zona de estudio se confirma como un factor determinante en los elevados niveles de radón registrados.
6. El análisis del terreno a partir de los estudios geotécnicos disponibles, junto con la comparación con la cartografía geológica de la zona, ha permitido caracterizar el tipo de suelo presente en el recinto de la ENM, facilitando la interpretación de los valores de concentración de radón y su relación con las propiedades del subsuelo.
7. El estudio de la variación temporal de la concentración de radón en un punto fijo ha puesto de manifiesto la existencia de fluctuaciones a lo largo del tiempo, sin observarse una relación clara y directa con las variables meteorológicas analizadas.
8. La metodología empleada permite establecer una base sólida para la caracterización del radón en el gas del suelo, pudiendo ser aplicada en estudios similares orientados a la evaluación del riesgo en otras localizaciones.

Existen ciertas limitaciones, como el número de puntos de medida, la duración del estudio temporal y la ausencia de ensayos de permeabilidad in situ que permitan una caracterización más precisa del

terreno. No obstante, los resultados obtenidos contribuyen a mejorar el conocimiento del comportamiento del radón en el subsuelo de la ENM y ponen de manifiesto la necesidad de considerar este factor en la planificación y diseño de futuras edificaciones, con el fin de implementar medidas de prevención y mitigación adecuadas.

5.2 Líneas futuras

Los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Fin de Grado permiten establecer una base para el desarrollo de futuras investigaciones orientadas a profundizar en el conocimiento del comportamiento del radón en el gas del suelo y su influencia en el riesgo asociado a las edificaciones.

A partir del trabajo realizado, se proponen las siguientes líneas futuras:

1. Ampliar la campaña de mediciones a un mayor número de puntos dentro del recinto de la ENM, con el fin de obtener un mapeo más detallado y preciso de la distribución espacial del radón.
2. Realizar estudios más exhaustivos de la permeabilidad del terreno mediante ensayos in situ, que permitan mejorar la estimación del *Radon Index* y reducir la incertidumbre asociada a su cálculo.
3. Profundizar en el análisis geológico y geotécnico del subsuelo, incorporando información más detallada que permita comprender mejor los mecanismos de generación y migración del radón.
4. Extender el estudio temporal de la concentración de radón en el suelo durante periodos más largos, con el objetivo de identificar patrones más claros y evaluar con mayor precisión la influencia de las variables meteorológicas.
5. Aplicar la metodología desarrollada en este trabajo a otras zonas o instalaciones, con el fin de validar su utilidad y comparabilidad en diferentes contextos geológicos.
6. Investigar la posible relación entre la concentración de radón en el gas del suelo y su posterior acumulación en el interior de edificaciones, con el objetivo de mejorar las estrategias de prevención y mitigación.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Radón - CSN». Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/radon>
- [2] «El radón y sus efectos en la salud». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- [3] World Health Organization, Ed., *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2009.
- [4] «Directive 2013/59/Euratom - protection against ionising radiation | Safety and health at work EU-OSHA». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-59-euratom-protection-against-ionising-radiation>
- [5] Ministerio de Sanidad. Plan Nacional contra el Radón, 2024. Disponible en: <https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/riesgosAmbientales/radon/home.htm>
- [6] «Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones | Archivo Digital UPM». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/22535/>
- [7] «Mapa del potencial de radón en España - CSN». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>
- [8] «Geología», Atlas Nacional de España. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://atlasnacional.ign.es/wane/Geolog%C3%ADa>
- [9] «Mapa de Radón de Galicia - Laboratorio de Radón en Galicia - USC». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://radon.gal/es/mapa-de-radon-de-galicia/>
- [10] J.-F. Lecomte *et al.*, «ICRP Publication 126: Radiological Protection against Radon Exposure», *Ann. ICRP*, vol. 43, n.º 3, pp. 5-73, sep. 2014, doi: 10.1177/0146645314542212.
- [11] «SARAD». Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.sarad.de/product-detail.php?lang=es_ES&catID=&p_ID=20
- [12] «UNSCEAR 2000 Report Volume I», United Nations : Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html
- [13] C. Sainz Fernández *et al.*, «Spanish experience on the design of radon surveys based on the use of geogenic information», *J. Environ. Radioact.*, vol. 166, pp. 390-397, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.07.007.

- [14] J. Kemski, A. Siehl, R. Stegemann, y M. Valdivia-Manchego, «Mapping the geogenic radon potential in Germany», *Sci. Total Environ.*, vol. 272, n.º 1-3, pp. 217-230, may 2001, doi: 10.1016/S0048-9697(01)00696-9.
- [15] «Mapa de zonificación por municipio de radón - CSN». Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/mapa-de-zonificacion-por-municipio>
- [16] Y. Ishimori, K. Lange, P. Martin, Y. S. Mayya, y M. Phaneuf, «Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues».
- [17] J. D. Appleton, M. R. Cave, J. C. H. Miles, y T. J. Sumerling, «Soil radium, soil gas radon and indoor radon empirical relationships to assist in post-closure impact assessment related to near-surface radioactive waste disposal», *J. Environ. Radioact.*, vol. 102, n.º 3, pp. 221-234, mar. 2011, doi: 10.1016/j.jenvrad.2010.09.007.
- [18] M. Neznal y M. Neznal, «RELIABILITY OF THE NEW METHOD FOR ASSESSING THE RADON RISK – GAS PERMEABILITY CLASSIFICATION».
- [19] M. Neznal, M. Neznal, M. Matolín, I. Barnet, y J. Miksova, «The new method for assessing the radon risk of building sites».
- [20] «Organización Mundial de la Salud». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es>
- [21] A. Ruano-Ravina *et al.*, «Indoor Radon Exposure and COPD, Synergic Association? A Multicentric, Hospital-Based Case–Control Study in a Radon-Prone Area», *Arch. Bronconeumol. Engl. Ed.*, vol. 57, n.º 10, pp. 630-636, oct. 2021, doi: 10.1016/j.arbr.2020.11.020.
- [22] Radon, «Mapa de radón España peninsular», Vive sin radón. Accedido: 16 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://vivesinradon.org/mapa-zonas-riesgo-radon/>
- [23] Internationale Atomenergie-Organisation, *Sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate and air quality studies: proceedings of a technical meeting held in Vienna, 22 - 24 June 2009*. en Publication / Division of Scientific and Technical Information, International Atomic Energy Agency, no. 1541. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency, 2012.
- [24] «Mapa de radiación gamma natural en España (MARNA) MAPA - CSN». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/mapa-de-radiacion-gamma-natural-marna-mapa>
- [25] «Monitor de radón AlphaGuard», Controles conceptuales. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://conceptcontrols.com/es/alphaguard-radon-monitor/>
- [26] «Comparador PNOA Histórico | IGN-CNIG». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://visualizadores.ign.es/comparador_pnoa/
- [27] «MapasIGME - Portal de cartografía del IGME: MAGNA 50 - Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie)». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>
- [28] A. Marín Alonso, A. González Gil (advisor), y L. Febrero Garrido (advisor), «Caracterización de los principales focos de inmisión de gas radón en despachos de la planta baja del CUD», abr. 2022, Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/651>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

El estudio del radón en el subsuelo presenta importantes implicaciones desde el punto de vista social, ambiental y técnico, especialmente debido a su impacto directo en la salud humana. El radón es un gas radiactivo de origen natural que puede acumularse en espacios cerrados, constituyendo una de las principales causas de cáncer de pulmón tras el consumo de tabaco. En este contexto, el análisis de su concentración en el terreno y su potencial de migración hacia el interior de edificaciones resulta fundamental para la prevención de riesgos y la protección de la población.

Desde una perspectiva ambiental, el radón está estrechamente ligado a las características geológicas y geotécnicas del terreno, lo que convierte su estudio en una herramienta clave para comprender el comportamiento del subsuelo y su interacción con el entorno construido. La identificación de zonas con mayor potencial de emisión permite una mejor planificación del uso del suelo y contribuye a una gestión más eficiente y segura del territorio, especialmente en áreas destinadas a uso residencial o público.

En el ámbito de la edificación y la ingeniería civil, la presencia de radón adquiere una relevancia significativa, ya que influye directamente en el diseño y ejecución de construcciones. La consideración de este factor en fases tempranas del proyecto permite la implementación de soluciones constructivas adecuadas, como sistemas de ventilación o barreras frente al gas, que reducen su concentración en el interior de los edificios. De este modo, el estudio del radón no solo tiene implicaciones técnicas, sino que también repercute en la seguridad y habitabilidad de las infraestructuras.

Por otro lado, existen implicaciones económicas asociadas a la detección y mitigación del radón, ya que la adopción de medidas preventivas o correctoras puede suponer un incremento en los costes de construcción. No obstante, estas actuaciones deben entenderse como una inversión en salud y seguridad a largo plazo, evitando problemas futuros derivados de exposiciones prolongadas a este gas.

En definitiva, el presente trabajo pone de manifiesto la importancia de integrar el estudio del radón en el análisis del subsuelo y en la planificación de edificaciones, destacando su relevancia no solo desde el punto de vista técnico, sino también en términos de salud, medio ambiente y sostenibilidad.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente trabajo, centrado en la medición y análisis de la concentración de radón en el subsuelo, conlleva una serie de reflexiones éticas y sociales derivadas de la naturaleza del problema abordado. El radón, como gas radiactivo de origen natural, representa un riesgo significativo para la salud humana, lo que sitúa este tipo de estudios en un contexto donde la responsabilidad técnica adquiere una dimensión social relevante.

Desde el punto de vista ético, la realización de mediciones y la interpretación de los resultados implica la necesidad de actuar con rigor, precisión y transparencia, garantizando que los datos obtenidos reflejen de manera fiel la realidad del terreno analizado. La correcta evaluación del riesgo asociado al radón es fundamental para evitar tanto la infravaloración como la sobreestimación del problema, ya que ambas situaciones pueden derivar en consecuencias negativas, bien sea por la exposición innecesaria de la población o por la adopción de medidas desproporcionadas.

En el ámbito social, este trabajo contribuye a la generación de conocimiento sobre un riesgo que, en muchas ocasiones, pasa desapercibido para la población general. La difusión de información relacionada con la presencia de radón y sus efectos en la salud favorece una mayor concienciación y permite a la sociedad adoptar decisiones informadas en relación con el uso del suelo, la edificación y la habitabilidad de los espacios interiores.

Asimismo, resulta relevante considerar la responsabilidad de los profesionales del ámbito técnico en la incorporación de este tipo de estudios en la práctica habitual, especialmente en fases de planificación y diseño de edificaciones. La integración del análisis del radón no solo responde a criterios normativos, sino también a un compromiso ético con la seguridad y el bienestar de los usuarios finales.

En definitiva, el presente trabajo pone de manifiesto la importancia de abordar el estudio del radón desde una perspectiva que trascienda lo estrictamente técnico, incorporando consideraciones éticas y sociales que garanticen una aplicación responsable del conocimiento y una adecuada protección de la población.

ANEXO III: DECLARACIÓN SOBRE EL USO RESPONSABLE DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

En el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se ha hecho uso puntual de herramientas basadas en inteligencia artificial como apoyo en tareas de revisión y mejora de la redacción del documento.

Estas herramientas se han utilizado exclusivamente con fines lingüísticos, tales como la reformulación de textos, la mejora de la claridad expositiva y la corrección gramatical, con el objetivo de asegurar una adecuada calidad formal del trabajo. En ningún caso han sido empleadas para la generación de contenidos técnicos, resultados, análisis o conclusiones.

El contenido del trabajo, incluyendo la metodología aplicada, el tratamiento de los datos, la interpretación de los resultados y las conclusiones obtenidas es íntegramente fruto del trabajo personal del autor. Asimismo, se ha realizado una revisión crítica de todos los textos elaborados con apoyo de estas herramientas, garantizando su coherencia, veracidad y adecuación al contexto académico.

Por tanto, el uso de inteligencia artificial se ha limitado a una función de apoyo en la elaboración del documento, manteniéndose en todo momento la autoría, responsabilidad y control sobre el contenido final del trabajo.

ANEXO IV: FICHAS DE CAMPO

En el presente anexo se incluyen las fichas de campo correspondientes a las mediciones realizadas durante el desarrollo de la campaña experimental de este Trabajo Fin de Grado. Estas fichas constituyen el registro sistemático de la información recogida en cada punto de medida, permitiendo documentar las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las mediciones de concentración de radón.

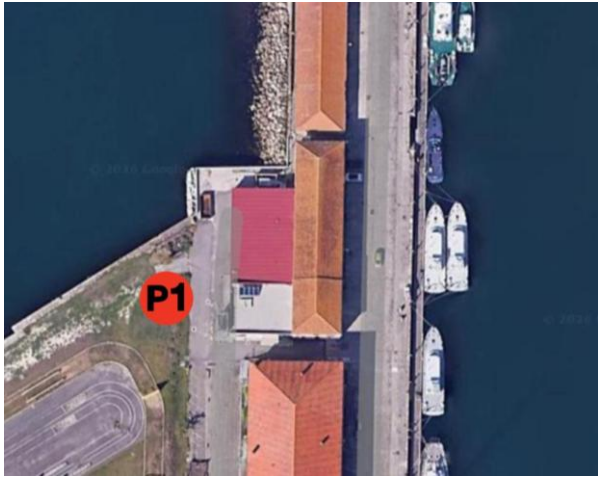
Cada ficha recoge información relevante como la fecha y hora de la medición, la localización del punto de medida, las coordenadas geográficas, las condiciones ambientales registradas en el momento de la toma de datos y los parámetros de funcionamiento del equipo de medición utilizado. Asimismo, se incluyen los resultados obtenidos durante cada medición, junto con su correspondiente representación gráfica.

En total, se presentan 33 fichas de campo, correspondientes a los diferentes puntos de muestreo analizados durante el trabajo. La inclusión de estas fichas tiene como finalidad proporcionar un soporte documental completo del trabajo de campo realizado, garantizando la trazabilidad de los datos obtenidos y permitiendo la consulta directa de los registros originales de cada medición.

A continuación, se presentan las fichas de campo generadas durante la campaña de medición.

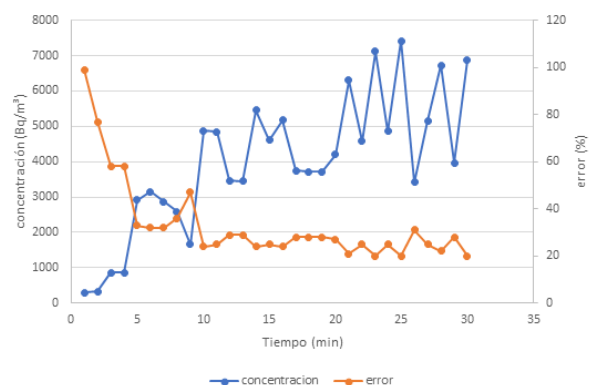
P1	Ficha de campo de medición de radón – [Edificio investigación]
-----------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	20/02/2026
	Hora inicio – fin	10:42 – 11:12
	Coordenadas	42°23'51'' N 8°42'25'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	12,3 °C
	Presión atm.	1018 hPa
	HR del aire	71%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	0,8 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	14,5 °C
	HR terreno	71 %
	Presión terreno	1035 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)	Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	289	99	16	5181	24
2	326	77	17	3747	28
3	863	58	18	3715	28
4	865	58	19	3715	28
5	2923	33	20	4206	27
6	3154	32	21	6296	21
7	2873	32	22	4585	25
8	2581	36	23	7124	20
9	1664	47	24	4862	25
10	4879	24	25	7421	20
11	4841	25	26	3419	31
12	3464	29	27	5154	25
13	3449	29	28	6733	22
14	5463	24	29	3961	28
15	4605	25	30	6885	20
Valor promedio de Radón (Bq/m³)					3974,7
Valor promedio de Torón (Bq/m³)					3.971



P2

Ficha de campo de medición de radón – [Palo de señales]

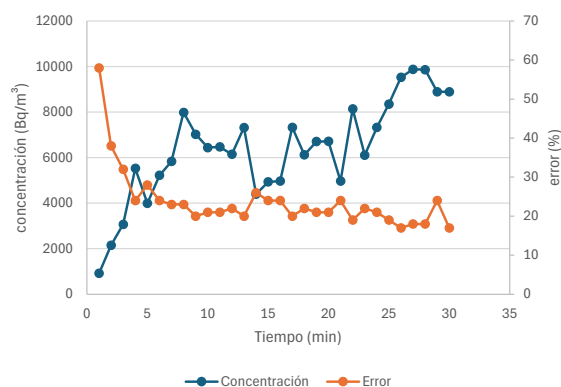
FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA



Fecha	23/02/2026
Hora inicio – fin	2109 – 2139
Coordenadas	42°23'46''N 8°42'26'' W
Altitud	0 m
Profundidad	1,1 m
Tª ambiente	11,1 °C
Presión atm.	1022 hPa
HR del aire	78%
Última lluvia	Más de 48 horas
Estado del terreno	Húmedo
Altura de marea	3 m
Intervalo de medición	1 min
Tª terreno	15 °C
HR terreno	72 %
Presión terreno	1025 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)	Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	919	58	16	4971	24
2	2150	38	17	7332	20
3	3071	32	18	6122	22
4	5528	24	19	6705	21
5	3993	28	20	6714	21
6	5221	24	21	4970	24
7	5836	23	22	8137	19
8	7985	23	23	6111	22
9	7025	20	24	7327	21
10	6440	21	25	8352	19
11	6471	21	26	9528	17
12	6150	22	27	9879	18
13	7321	20	28	9862	18
14	4400	26	29	8893	24
15	4935	24	30	8890	17
Valor promedio de Radón (Bq/m³)					6374,6
Valor promedio de Torón (Bq/m³)					1436



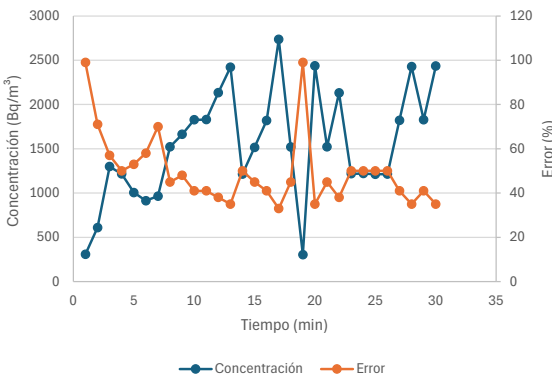
P3	Ficha de campo de medición de radón – [Fachada Sur Cuartel Almte. Francisco Moreno]
-----------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	24/02/2026
	Hora inicio – fin	1223 – 1253
	Coordenadas	42°23'43'' N 8°42'30'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,8 °C
	Presión atm.	1020 hPa
	HR del aire	63 %
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3,2 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	16,5 °C
	HR terreno	83 %
	Presión terreno	1018 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)	Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	307	99	16	1819	41
2	610	71	17	2735	33
3	1299	57	18	1519	45
4	1216	50	19	304	99
5	1005	53	20	2437	35
6	913	58	21	1523	45
7	965	70	22	2132	38
8	1522	45	23	1218	50
9	1663	48	24	1220	50
10	1827	41	25	1212	50
11	1829	41	26	1213	50
12	2134	38	27	1821	41
13	2422	35	28	2429	35
14	1213	50	29	1828	41
15	1516	45	30	2434	35
Valor promedio de Radón (Bq/m³)					1479
Valor promedio de Torón (Bq/m³)					367



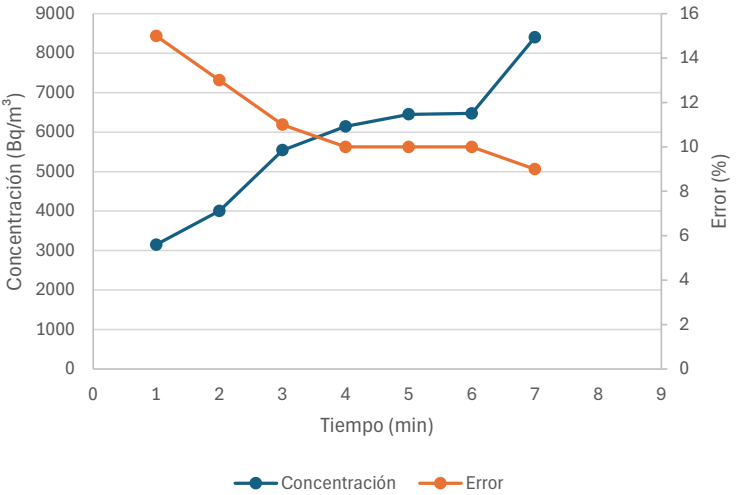
P4	Ficha de campo de medición de radón – [Edificio investigación]
-----------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	24/02/2026
	Hora inicio – fin	1600 – 1645
	Coordenadas	42°23'51''N 8°42'25''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	15,2 °C
	Presión atm.	1019 hPa
	HR del aire	60 %
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	1,7 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	18,5 °C
	HR terreno	78 %
	Presión terreno	1015 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	3148	15
2	4003	13
3	5542	11
4	6143	10
5	6452	10
6	6475	10
7	8404	9
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		5710,9
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		6449



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
1	3148	15
2	4003	13
3	5542	11
4	6143	10
5	6452	10
6	6475	10
7	8404	9

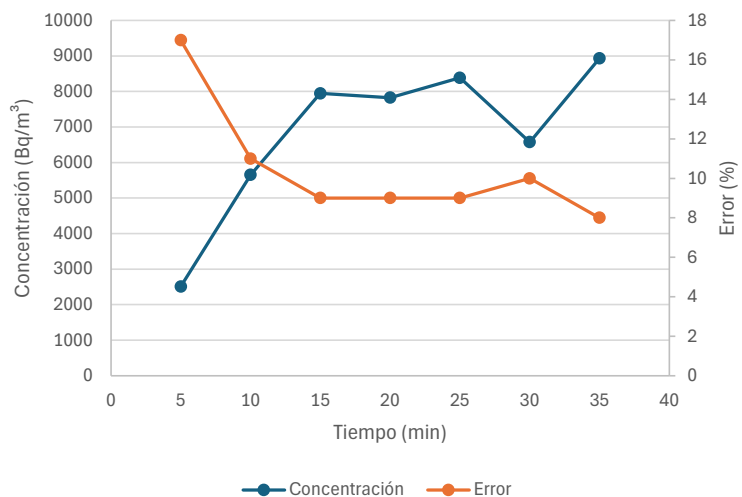
P5	Ficha de campo de medición de radón – [Pista de atletismo]
-----------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	24/02/2026
	Hora inicio – fin	1745 – 1822
	Coordenadas	42°23' 40'' N 8°42' 14'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,1 °C
	Presión atm.	1018 hPa
	HR del aire	66 %
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	1,2 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	15,5 °C
	HR terreno	87 %
	Presión terreno	1014 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	2510	17
2	5653	11
3	7948	9
4	7827	9
5	8386	9
6	6574	10
7	8931	8
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		6832,7
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		561



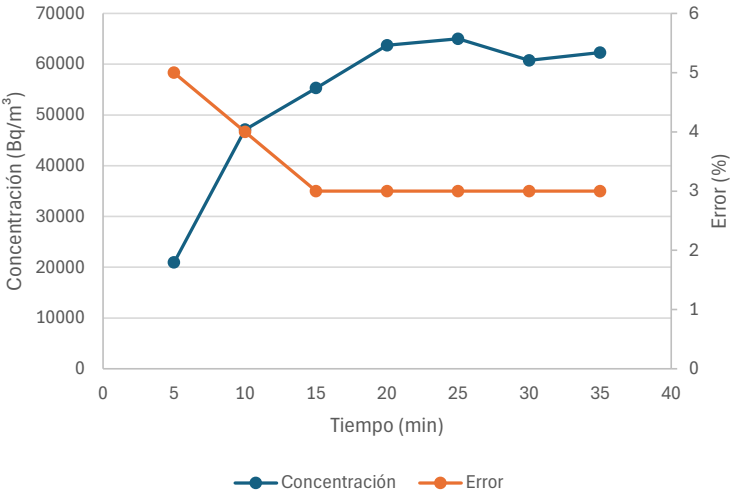
P6	Ficha de campo de medición de radón – [Farmacia]
-----------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	24/02/2026
	Hora inicio – fin	1831 – 1907
	Coordenadas	42°23' 38'' N 8° 42' 18'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	13,8 °C
	Presión atm.	1018 hPa
	HR del aire	68%
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	1 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	14,5 °C
	HR terreno	90 %
	Presión terreno	1014 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	20931	5
2	47111	4
3	55310	3
4	63736	3
5	65015	3
6	60749	3
7	62302	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		53593,4
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		8212



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	20931	5
10	47111	4
15	55310	3
20	63736	3
25	65015	3
30	60749	3
35	62302	3

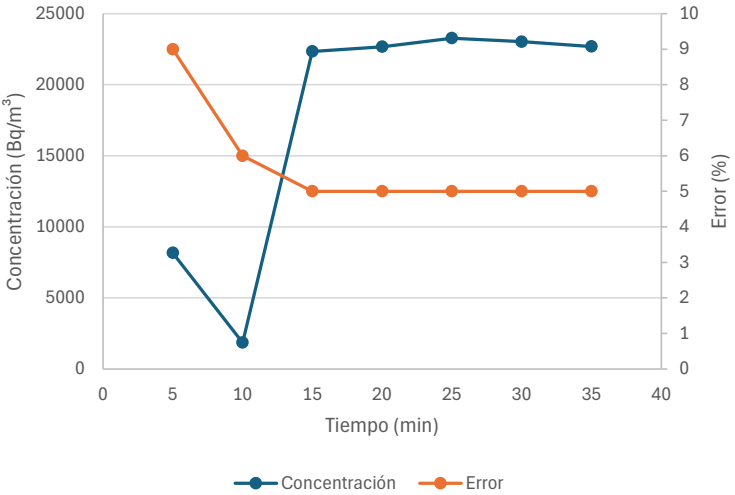
P7	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 1]
-----------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	26/02/2026
	Hora inicio – fin	1534 – 1609
	Coordenadas	42°23'49''N 8°42'28'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	16,4 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	58 %
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,1 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	20 °C
	HR terreno	68 %
	Presión terreno	1025 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	8173	9
2	1861	6
3	22349	5
4	22676	5
5	23275	5
6	23036	5
7	22691	5
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		17737,3
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		1645



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	8173	9
10	1861	6
15	22349	5
20	22676	5
25	23275	5
30	23036	5
35	22691	5

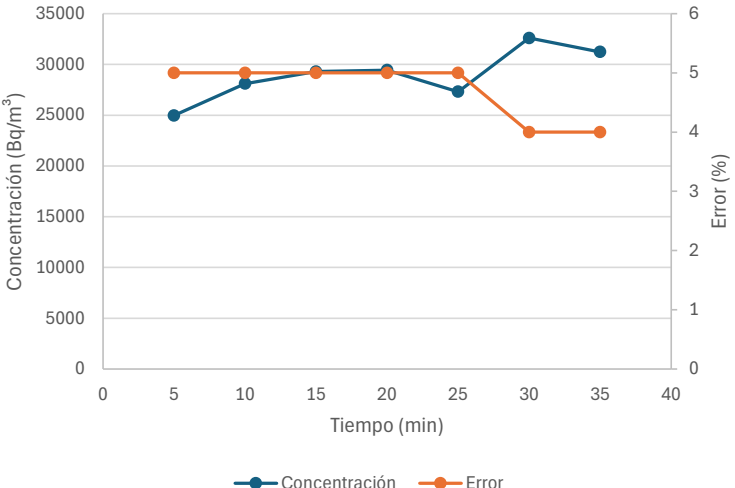
P8	Ficha de campo de medición de radón – [Cuartel Almte. Francisco Moreno]
-----------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	26/02/2026
	Hora inicio – fin	1620 – 1655
	Coordenadas	42°23'44'' N 8°42'30'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	16 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	60 %
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	1,9 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	17 °C
	HR terreno	70 %
	Presión terreno	1025 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	24972	5
2	28106	5
3	29300	5
4	29445	5
5	27315	5
6	32599	4
7	31235	4
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		28996,0
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		11837



Time (min)	Concentration (Bq/m³)	Error (%)
5	24972	5
10	28106	5
15	29300	5
20	29445	5
25	27315	5
30	32599	4
35	31235	4

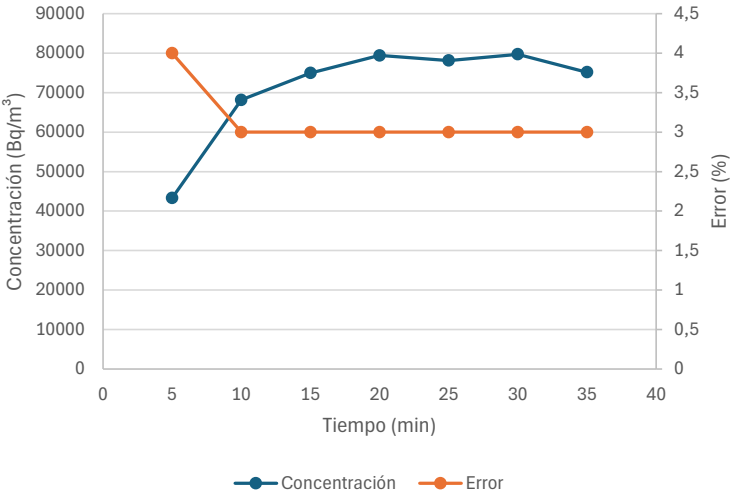
P9	Ficha de campo de medición de radón – [BBVA]
-----------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	26/02/2026
	Hora inicio – fin	1620 – 1655
	Coordenadas	42°23'44'' N 8°42'30'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	16 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	60%
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	1,9 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	17 °C
	HR terreno	69 %
	Presión terreno	1025 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	43341	4
2	68173	3
3	74983	3
4	79415	3
5	78143	3
6	79725	3
7	75180	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		71280,0
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		22963



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	43341	4
10	68173	3
15	74983	3
20	79415	3
25	78143	3
30	79725	3
35	75180	3

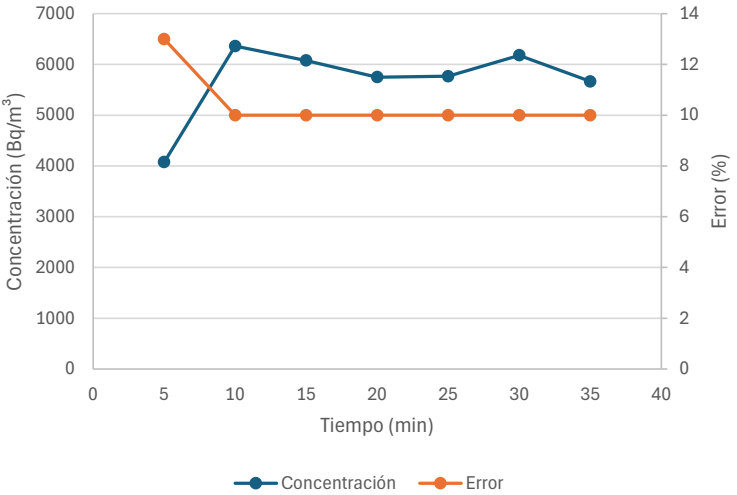
P10	Ficha de campo de medición de radón – [Pista Militar 2]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03/03/2026
	Hora inicio – fin	1441 – 1516
	Coordenadas	42°23'48''N 8°42'30''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,6 °C
	Presión atm.	1012 hPa
	HR del aire	74 %
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,4 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	20 °C
	HR terreno	58 %
	Presión terreno	1016 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	4075	13
2	6361	10
3	6078	10
4	5750	10
5	5767	10
6	6180	10
7	5666	10
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		5696,7
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		1529



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	4075	13
10	6361	10
15	6078	10
20	5750	10
25	5767	10
30	6180	10
35	5666	10

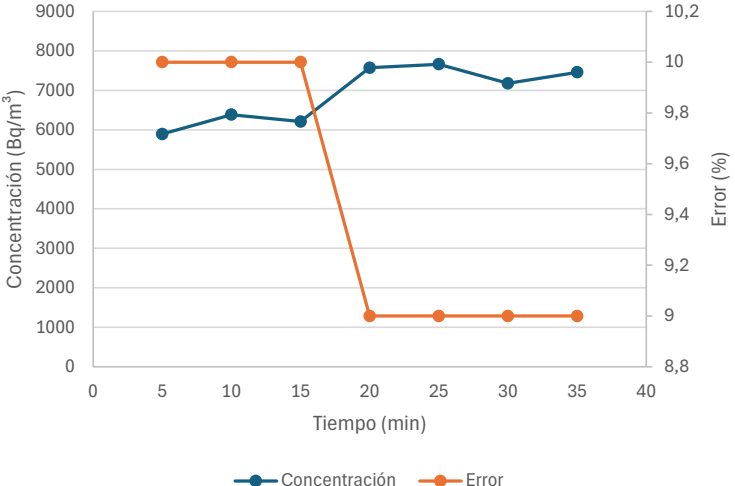
P11	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 3]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03/03/2026
	Hora inicio – fin	1525 – 1600
	Coordenadas	42° 23' 48'' N 8° 42' 32'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,2 °C
	Presión atm.	1011 hPa
	HR del aire	76 %
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,7 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	24 °C
	HR terreno	50 %
	Presión terreno	1017 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	5894	10
2	6385	10
3	6210	10
4	7574	9
5	7661	9
6	7177	9
7	7458	9
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		6908,4
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		1706



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	5894	10
10	6385	10
15	6210	10
20	7574	9
25	7661	9
30	7177	9
35	7458	9

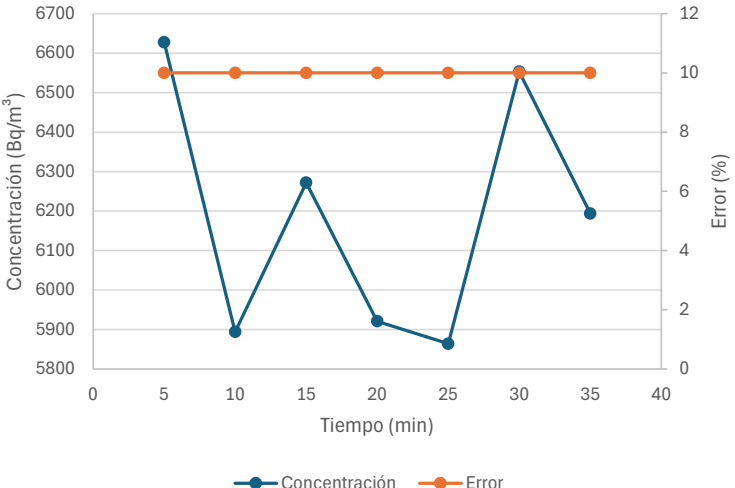
P12	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 4]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03/03/2026
	Hora inicio – fin	1613 – 1650
	Coordenadas	42°23'47'' N 8°42'33'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	13,9 °C
	Presión atm.	1011 hPa
	HR del aire	77%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	24 °C
	HR terreno	51 %
	Presión terreno	1016 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	6628	10
2	5894	10
3	6272	10
4	5921	10
5	5864	10
6	6553	10
7	6194	10
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		6189,4
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		1587



The graph displays two data series over a 40-minute period. The 'Concentración' series (blue line with dots) shows significant fluctuations, starting at 6628 Bq/m³ at 5 minutes, dropping to a minimum of 5864 Bq/m³ at 25 minutes, and peaking again at 6628 Bq/m³ at 30 minutes. The 'Error' series (orange line with dots) remains constant at 10% throughout the entire measurement period.

Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	6628	10
10	5894	10
15	6272	10
20	5921	10
25	5864	10
30	6553	10
35	6194	10

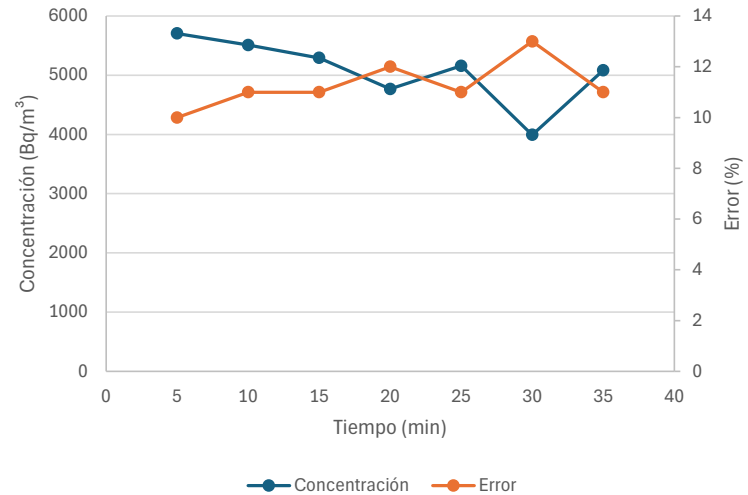
P13	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 5]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03-03-2026
	Hora inicio – fin	1659 – 1734
	Coordenadas	42°23'46'' N 8°42'34'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	13,5 °C
	Presión atm.	1010 hPa
	HR del aire	79%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3,3 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	24 °C
	HR terreno	50 %
	Presión terreno	1016 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	5706	10
2	5510	11
3	5292	11
4	4768	12
5	5158	11
6	3993	13
7	5084	11
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		5073,0
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		1660



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	5706	10
10	5510	11
15	5292	11
20	4768	12
25	5158	11
30	3993	13
35	5084	11

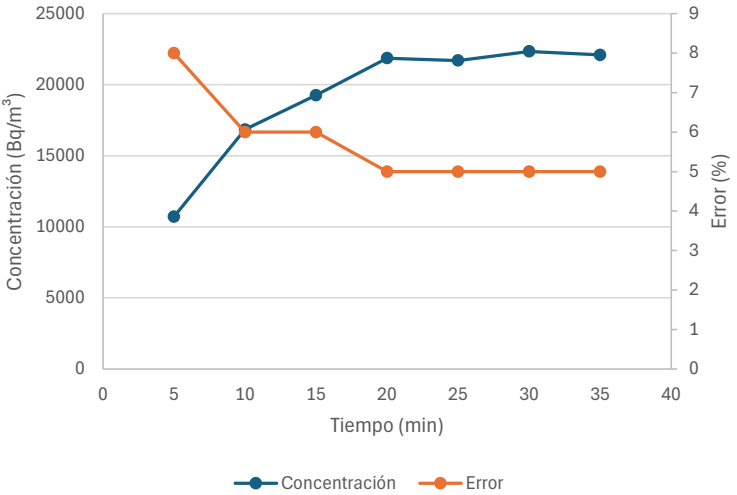
P14	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 6]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03-03-2026
	Hora inicio – fin	1743 – 1818
	Coordenadas	42°23'45'' N 8°42'33'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	13,2 °C
	Presión atm.	1010 hPa
	HR del aire	81%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3,5 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	21 °C
	HR terreno	54 %
	Presión terreno	1015 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	10720	8
2	16853	6
3	19265	6
4	21871	5
5	21708	5
6	22348	5
7	22101	5
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		19266,6
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		1726



Time (min)	Concentration (Bq/m³)	Error (%)
5	10720	8
10	16853	6
15	19265	6
20	21871	5
25	21708	5
30	22348	5
35	22101	5

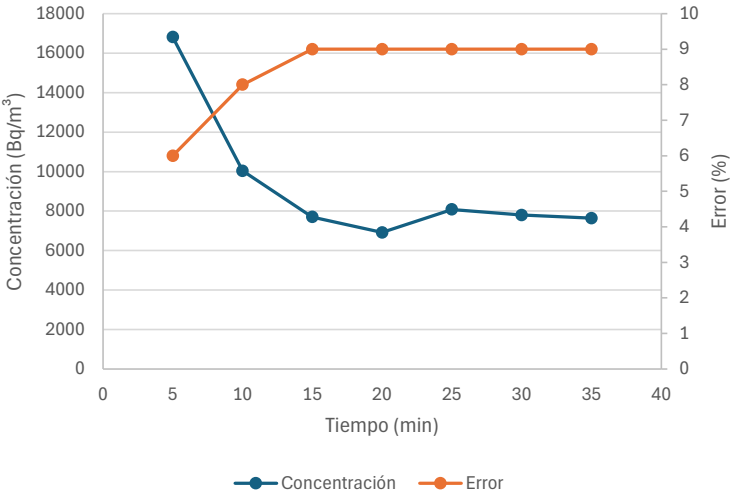
P15	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 7]
-----	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03-03-2026
	Hora inicio – fin	1831 – 1906
	Coordenadas	42°23'45'' N 8°42'31'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	12,9 °C
	Presión atm.	1009 hPa
	HR del aire	82%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3,2 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	18 °C
	HR terreno	63 %
	Presión terreno	1015 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	16814	6
2	10039	8
3	7696	9
4	6913	9
5	8080	9
6	7795	9
7	7639	9
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		9282,3
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		2154



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	16814	6
10	10039	8
15	7696	9
20	6913	9
25	8080	9
30	7795	9
35	7639	9

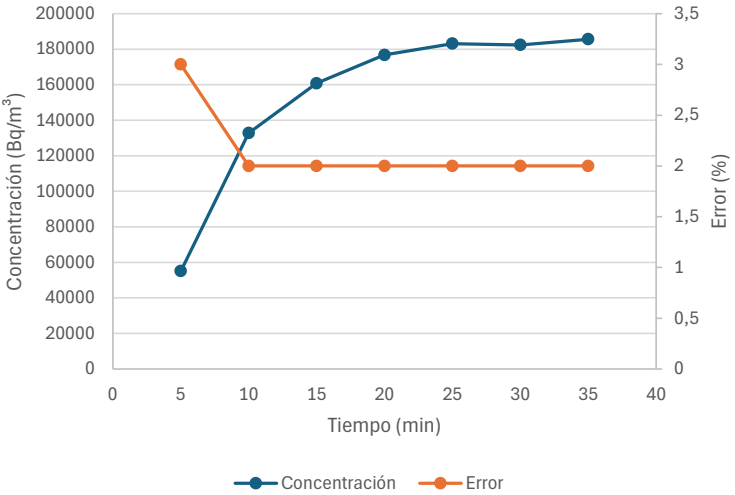
P16	Ficha de campo de medición de radón – [Pista militar 8]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	03-03-2026
	Hora inicio – fin	1916 – 1951
	Coordenadas	42°23'45'' N 8°42'32'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	12,5 °C
	Presión atm.	1009 hPa
	HR del aire	84%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,9m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	16 °C
	HR terreno	70 %
	Presión terreno	1015 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	55083	3
2	132843	2
3	160822	2
4	176804	2
5	183153	2
6	182434	2
7	185623	2
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		153823,1
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		12776



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	55083	3
10	132843	2
15	160822	2
20	176804	2
25	183153	2
30	182434	2
35	185623	2

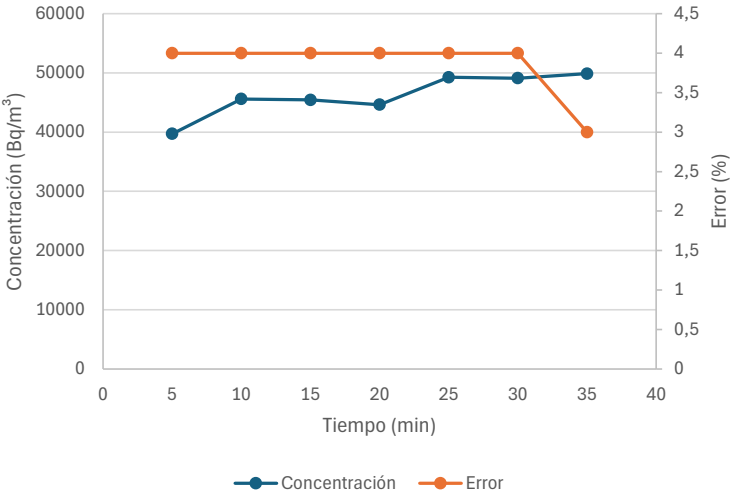
P17	Ficha de campo de medición de radón – [CASI 1]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	04-03-2026
	Hora inicio – fin	1600 – 1635
	Coordenadas	42°23'43''N 8°42'33''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	0,7 m
	Tª ambiente	13,8 °C
	Presión atm.	1012 hPa
	HR del aire	74%
	Última lluvia	Más de 24 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,8 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	19 °C
	HR terreno	60 %
	Presión terreno	1013 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	39712	4
2	45595	4
3	45450	4
4	44626	4
5	49262	4
6	49113	4
7	49870	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		46232,6
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		13624



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	39712	4
10	45595	4
15	45450	4
20	44626	4
25	49262	4
30	49113	4
35	49870	3

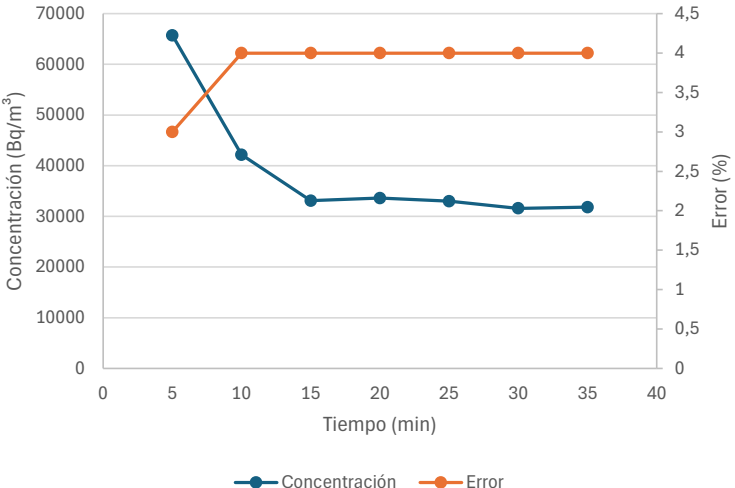
P18	Ficha de campo de medición de radón – [CASI 2]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	04-03-2026
	Hora inicio – fin	1907 – 1942
	Coordenadas	42°23'43'' N 8°42'34'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	0,7 m
	Tª ambiente	12,4 °C
	Presión atm.	1014 hPa
	HR del aire	80 %
	Última lluvia	Más de 48 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	12 °C
	HR terreno	84 %
	Presión terreno	1012 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	65726	3
2	42162	4
3	33080	4
4	33614	4
5	32984	4
6	31589	4
7	31821	4
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		38725,1
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		23693



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	65726	3
10	42162	4
15	33080	4
20	33614	4
25	32984	4
30	31589	4
35	31821	4

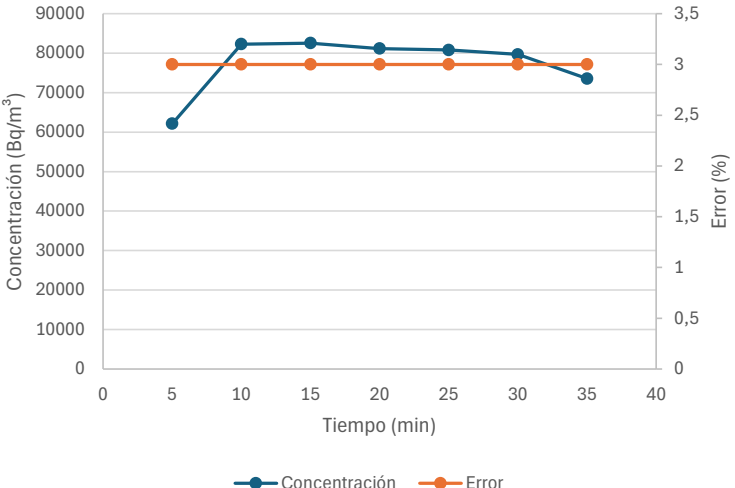
P19	Ficha de campo de medición de radón – [CASI 3]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	04-03-2026
	Hora inicio – fin	1733 – 1808
	Coordenadas	42°23'43'' N 8°42'33'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	0,7 m
	Tª ambiente	13,1 °C
	Presión atm.	1013 hPa
	HR del aire	76%
	Última lluvia	Más de 48 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,5 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	16,5 °C
	HR terreno	69 %
	Presión terreno	1013 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	62134	3
2	82294	3
3	82544	3
4	81174	3
5	80823	3
6	79689	3
7	73563	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		77460,1
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		15819



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	62134	3
10	82294	3
15	82544	3
20	81174	3
25	80823	3
30	79689	3
35	73563	3

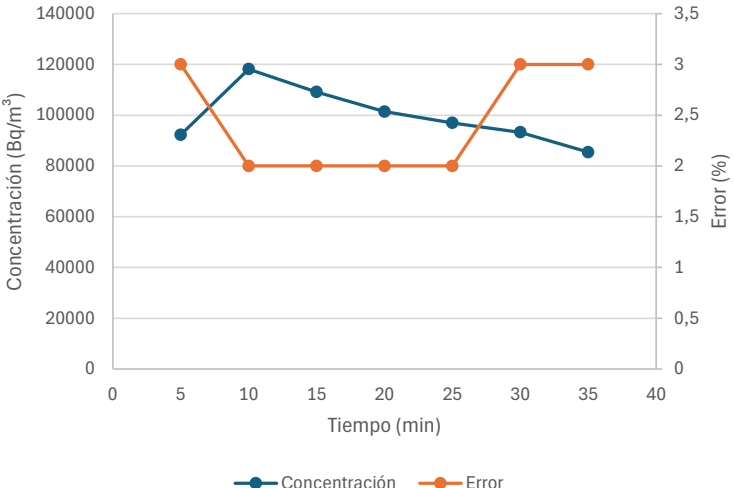
P19	Ficha de campo de medición de radón – [CASI 4]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	04-03-2026
	Hora inicio – fin	1819 – 1854
	Coordenadas	42°23'43'' N 8°42'34'' W
	Altitud	0 m
	Profundidad	0,7 m
	Tª ambiente	12,7 °C
	Presión atm.	1013 hPa
	HR del aire	79%
	Última lluvia	Más de 48 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,4 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	14,5 °C
	HR terreno	80 %
	Presión terreno	1013 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	92329	3
2	118195	2
3	109174	2
4	101434	2
5	96974	2
6	93290	3
7	85432	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		99546,9
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		



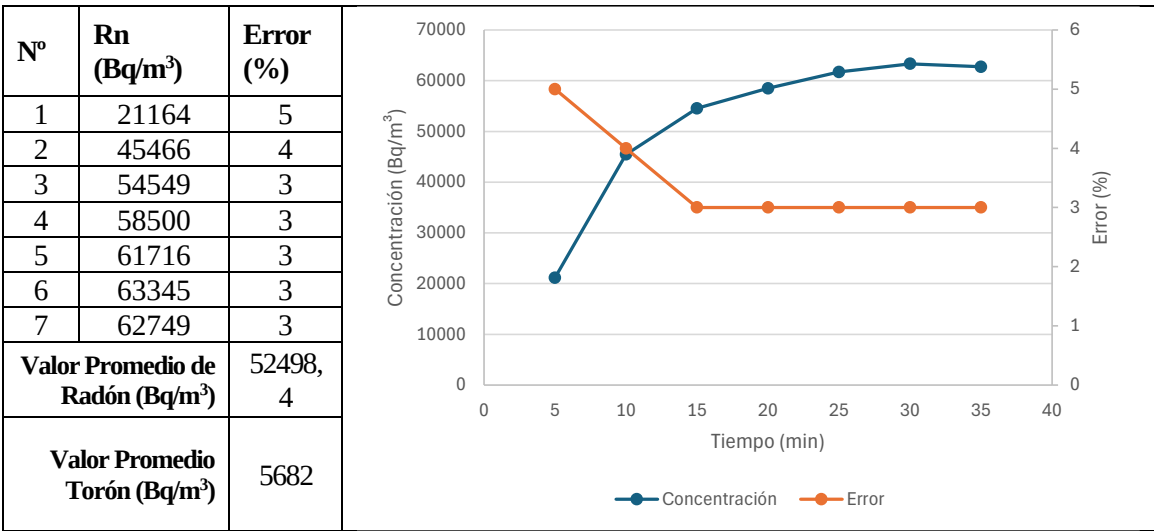
Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	92329	3
10	118195	2
15	109174	2
20	101434	2
25	96974	2
30	93290	3
35	85432	3

P21	Ficha de campo de medición de radón – [Edificio dirección fachada Norte]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	05-03-2026
	Hora inicio – fin	1041 – 1116
	Coordenadas	42°23'41''N 8°42'22''W
	Altitud	12 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	13,6 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	72%
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,6 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	20 °C
	HR terreno	60 %
	Presión terreno	1016 hPa

RESULTADOS



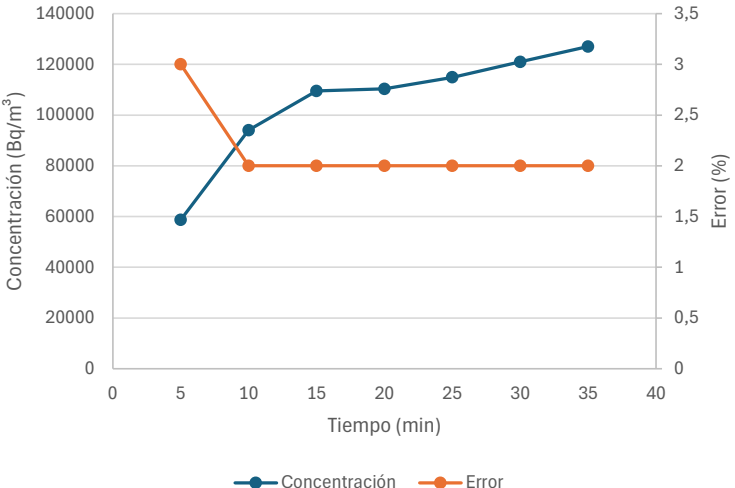
P22	Ficha de campo de medición de radón – [Edificio dirección fachada SUR]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	05-03-2026
	Hora inicio – fin	1605 – 1640
	Coordenadas	42°32'41''N 8°42'22'' W
	Altitud	12 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,5 °C
	Presión atm.	1015 hPa
	HR del aire	68 %
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	14 °C
	HR terreno	70 %
	Presión terreno	1018 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	58711	3
2	94045	2
3	109512	2
4	110325	2
5	114917	2
6	120989	2
7	127040	2
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		105077,0
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		10116



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	58711	3
10	94045	2
15	109512	2
20	110325	2
25	114917	2
30	120989	2
35	127040	2

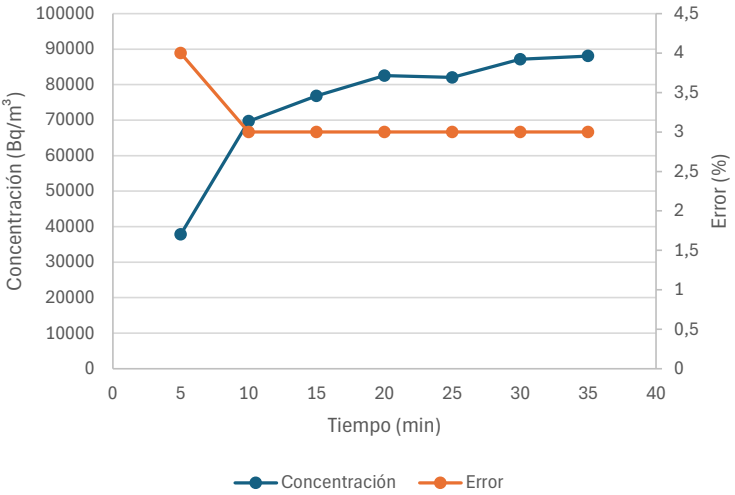
P23	Ficha de campo de medición de radón – [Edificio radio]
-----	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	06-02-2026
	Hora inicio – fin	1439 – 1415
	Coordenadas	42°23'41''N 8°42'24''W
	Altitud	12 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	13,4 °C
	Presión atm.	1017 hPa
	HR del aire	69 %
	Última lluvia	Más de 48 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,3 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	17 °C
	HR terreno	66 %
	Presión terreno	1021 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	37839	4
2	69709	3
3	76822	3
4	82536	3
5	82027	3
6	87145	3
7	88085	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		74937,6
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	37839	4
10	69709	3
15	76822	3
20	82536	3
25	82027	3
30	87145	3
35	88085	3

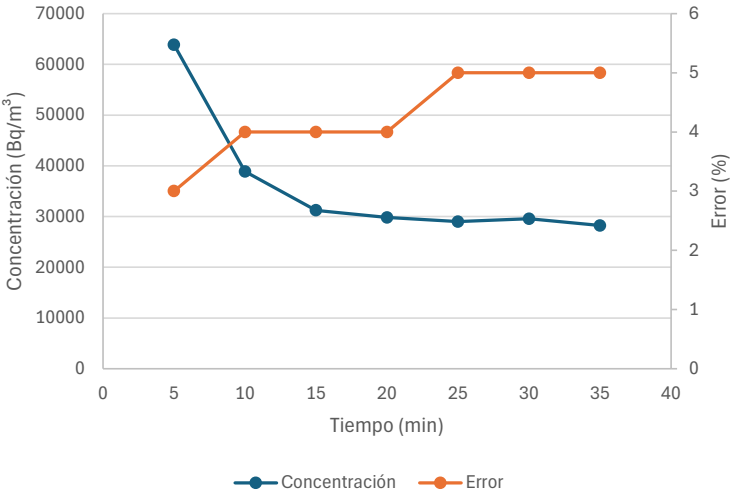
P24	Ficha de campo de medición de radón – [Despacho Pater]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	06-03-2026
	Hora inicio – fin	1536 – 1611
	Coordenadas	42°23'40''N 8°42'27''W
	Altitud	12 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14 °C
	Presión atm.	1014 hPa
	HR del aire	71%
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,1 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	14,5 °C
	HR terreno	68 %
	Presión terreno	1020 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	63880	3
2	38887	4
3	31209	4
4	29819	4
5	28988	5
6	29567	5
7	28229	5
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		35797,0
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		6195



Time (min)	Concentration (Bq/m³)	Error (%)
5	63880	3
10	38887	4
15	31209	4
20	29819	4
25	28988	5
30	29567	5
35	28229	5

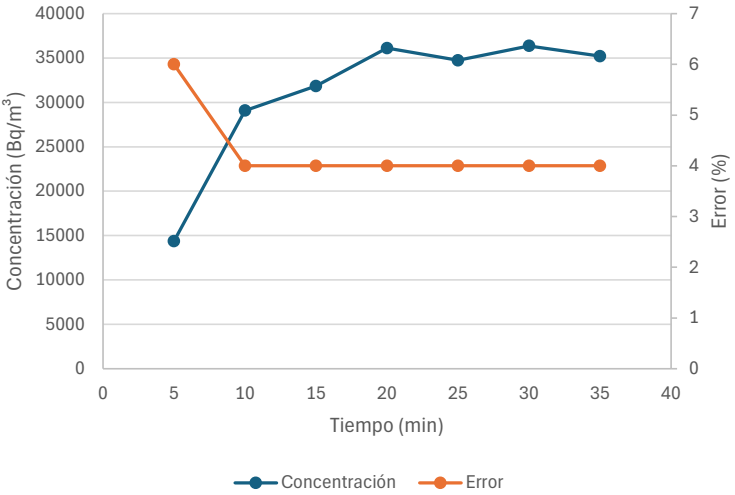
P25	Ficha de campo de medición de radón – [Viviendas de mandos 1]
-----	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	07-03-2026
	Hora inicio – fin	1200 – 1235
	Coordenadas	42°23'37''N 8°42'30''W
	Altitud	20 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,5 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	67 %
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,4 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	17 °C
	HR terreno	57 %
	Presión terreno	1020 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	14372	6
2	29075	4
3	31851	4
4	36125	4
5	34751	4
6	36362	4
7	35205	4
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		31077,3
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		9725



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	14372	6
10	29075	4
15	31851	4
20	36125	4
25	34751	4
30	36362	4
35	35205	4

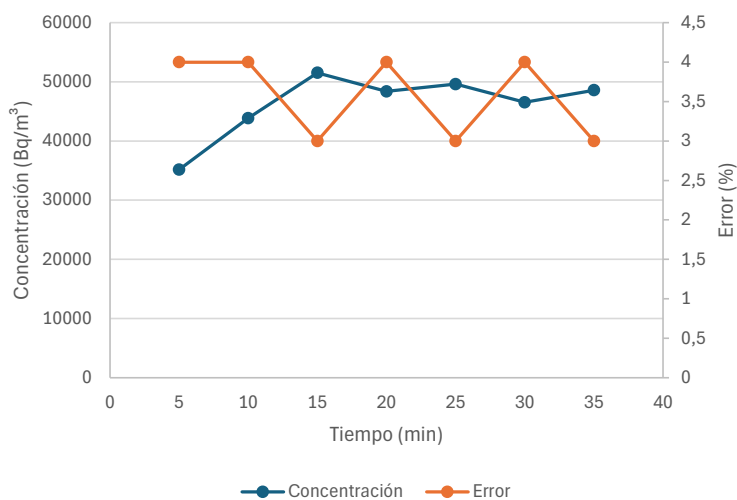
P26	Ficha de campo de medición de radón – [Viviendas de mandos 2]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	07-03-2026
	Hora inicio – fin	1250 – 1325
	Coordenadas	42°23'36''N 8°42'31''W
	Altitud	20 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	15 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	65%
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,6 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	16,6 °C
	HR terreno	56 %
	Presión terreno	1018 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	35175	4
2	43854	4
3	51526	3
4	48374	4
5	49624	3
6	46536	4
7	48591	3
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		46240,0
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		20483



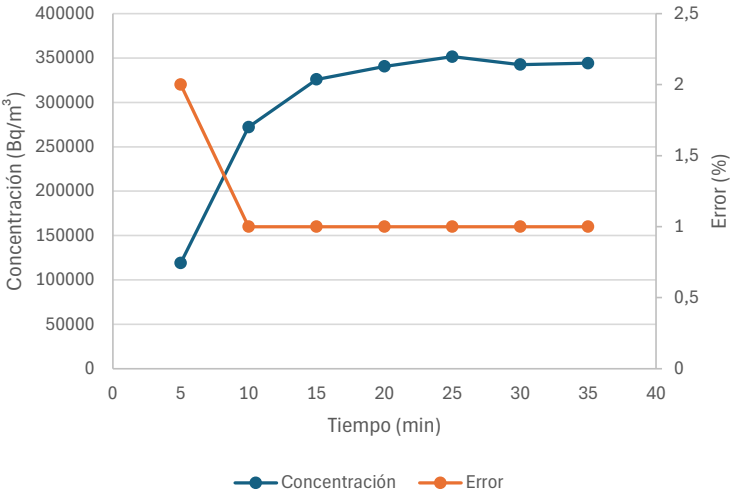
P27	Ficha de campo de medición de radón – [Viviendas de mandos 3]
-----	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	07-03-2026
	Hora inicio – fin	1339 – 1416
	Coordenadas	42°23'34''N 8°42'32''W
	Altitud	20 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	15,4 °C
	Presión atm.	1015 hPa
	HR del aire	63%
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,9 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	17,5 °C
	HR terreno	59 %
	Presión terreno	1018 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	119090	2
2	272255	1
3	325855	1
4	340610	1
5	351489	1
6	342552	1
7	344165	1
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		299430,9
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		137332



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	119090	2
10	272255	1
15	325855	1
20	340610	1
25	351489	1
30	342552	1
35	344165	1

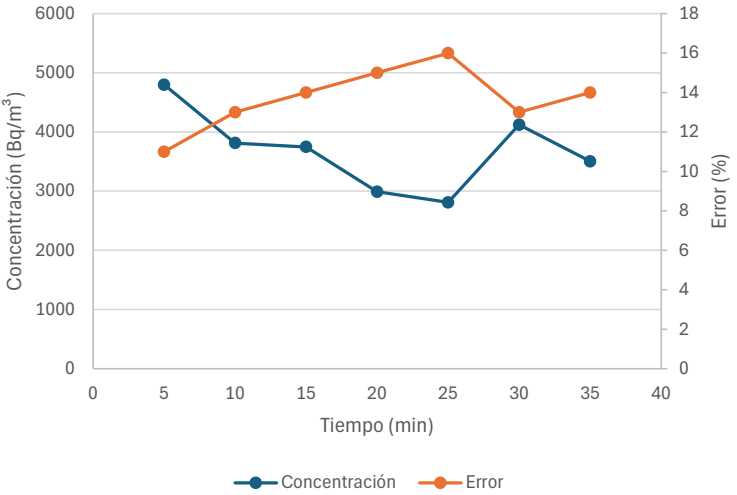
P28	Ficha de campo de medición de radón – [Viviendas de mandos 4]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	07-03-2026
	Hora inicio – fin	1116 – 1151
	Coordenadas	42°23'39''N 8°42'28''W
	Altitud	20 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	14,2 °C
	Presión atm.	1016 hPa
	HR del aire	69 %
	Última lluvia	Más de 72 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,2 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	18,5 °C
	HR terreno	55 %
	Presión terreno	1019 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	4799	11
2	3813	13
3	3747	14
4	2989	15
5	2811	16
6	4122	13
7	3503	14
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		3683,4
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		5417



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	4799	11
10	3813	13
15	3747	14
20	2989	15
25	2811	16
30	4122	13
35	3503	14

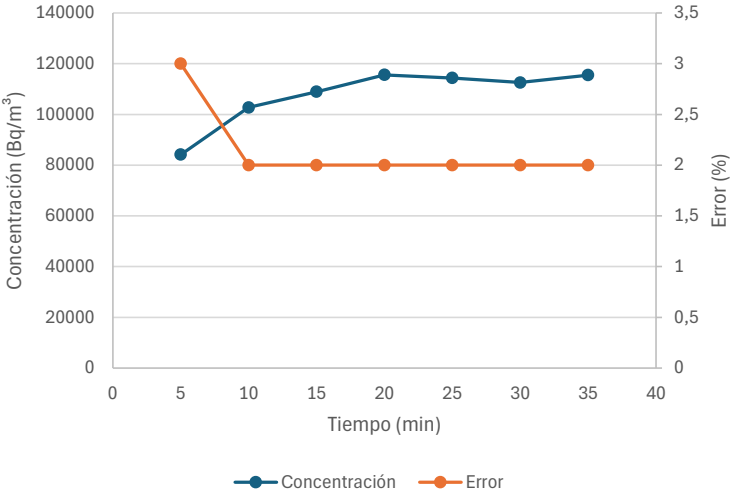
P29	Ficha de campo de medición de radón – [Portocelo]
------------	--

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	08-03-2026
	Hora inicio – fin	1130 – 1205
	Coordenadas	42°23'35''N 8°42'40''W
	Altitud	8 m
	Profundidad	1 m
	Tª ambiente	15,1 °C
	Presión atm.	1014 hPa
	HR del aire	66 %
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,5 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	20,5 °C
	HR terreno	56 %
	Presión terreno	1022 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	84194	3
2	102774	2
3	108957	2
4	115607	2
5	114408	2
6	112574	2
7	115502	2
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		107716,6
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		19124



Tiempo (min)	Concentración (Bq/m³)	Error (%)
5	84194	3
10	102774	2
15	108957	2
20	115607	2
25	114408	2
30	112574	2
35	115502	2

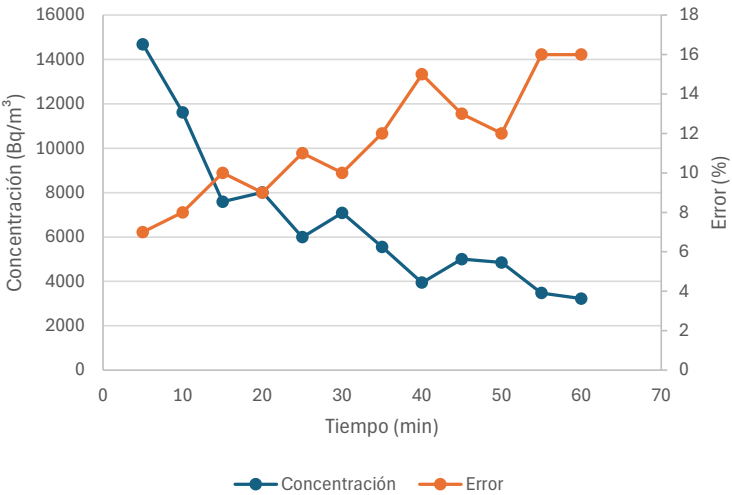
P30	Ficha de campo de medición de radón – [Patio de aulas 1]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	08-03-2026
	Hora inicio – fin	1955 – 2055
	Coordenadas	42°23'41''N 8°42'18''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1,18 m
	Tª ambiente	12,8 °C
	Presión atm.	1013 hPa
	HR del aire	78 %
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,6 m
	Intervalo de medición	5 min
	Tª terreno	14 °C
	HR terreno	86 %
	Presión terreno	1023 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	14682	7
2	11615	8
3	7588	10
4	8013	9
5	5989	11
6	7086	10
7	5550	12
8	3943	15
9	5002	13
10	4849	12
11	3473	16
12	3224	16
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		6417,8
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		99



Concentración (Bq/m³)

Tiempo (min)

Concentración Error

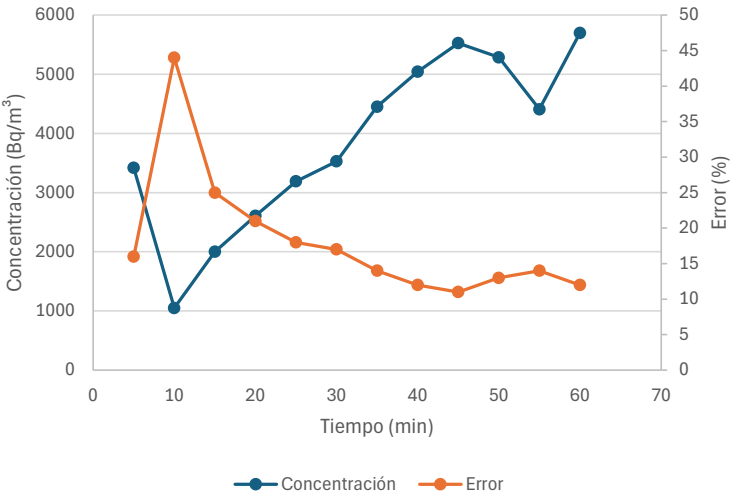
P31	Ficha de campo de medición de radón – [Patio de aulas 2]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	08-03-2026
	Hora inicio – fin	1639 – 1739
	Coordenadas	42°23'41''N 8°42'18''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1,18 m
	Tª ambiente	14,1 °C
	Presión atm.	1013 hPa
	HR del aire	72%
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	3 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	17,5 °C
	HR terreno	77 %
	Presión terreno	1022 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	3419	16
2	1051	44
3	2001	25
4	2606	21
5	3191	18
6	3528	17
7	4453	14
8	5044	12
9	5527	11
10	5287	13
11	4410	14
12	5697	12
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		3851,2
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		BDL



Concentración (Bq/m³)

Tiempo (min)

Concentración Error

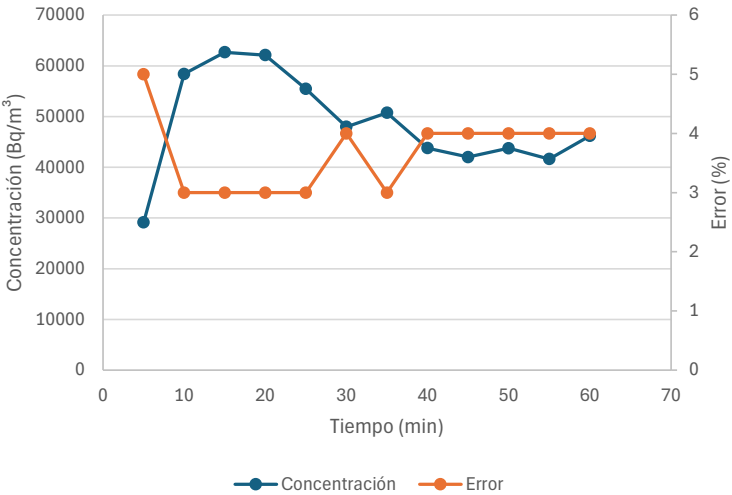
P32	Ficha de campo de medición de radón – [Patio de aulas 3]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	08-03-2026
	Hora inicio – fin	1740 – 1840
	Coordenadas	42°23'41''N 8°42'18''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1,18 m
	Tª ambiente	13,6 °C
	Presión atm.	1013 hPa
	HR del aire	74%
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,8 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	15,5 °C
	HR terreno	83 %
	Presión terreno	1022 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	29127	5
2	58417	3
3	62677	3
4	62127	3
5	55448	3
6	47971	4
7	50751	3
8	43777	4
9	42016	4
10	43761	4
11	41630	4
12	46191	4
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		50074,4
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		214



Concentración (Bq/m³)

Error (%)

Concentración Error

P33	Ficha de campo de medición de radón – [Patio de aulas 4]
------------	---

FECHA, LOCALIZACIÓN Y CONDICIONES DE LA MEDIDA

	Fecha	08-03-2026
	Hora inicio – fin	1843 – 1943
	Coordenadas	42°23'41''N 8°42'18''W
	Altitud	0 m
	Profundidad	1,18 m
	Tª ambiente	13,1 °C
	Presión atm.	1013 hPa
	HR del aire	76 %
	Última lluvia	Más de 96 horas
	Estado del terreno	Húmedo
	Altura de marea	2,7 m
	Intervalo de medición	1 min
	Tª terreno	14,5 °C
	HR terreno	86 %
	Presión terreno	1022 hPa

RESULTADOS

Nº	Rn (Bq/m³)	Error (%)
1	54852	3
2	54932	3
3	40506	4
4	27949	5
5	22574	5
6	20877	6
7	18332	6
8	16551	6
9	18176	6
10	18208	6
11	17547	6
12	18815	6
Valor Promedio de Radón (Bq/m³)		27193,3
Valor Promedio Torón (Bq/m³)		99

