



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de la concentración de radón en aguas de  
consumo*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Jaime Nicolás Sánchez-Ferragut Guitart

**DIRECTORES:** Arturo González Gil  
Santiago Urréjola Madriñán

**CURSO ACADÉMICO:** 2023-2024

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de la concentración de radón en aguas de  
consumo*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



## **RESUMEN**

Los niveles de concentración de radón que superan los recomendados por ley suponen una serie de riesgos para la salud, entre ellos el cáncer de pulmón. Numerosos estudios investigan su concentración en aire, pero también está presente en agua.

Los niveles de concentración de radón en el aire en Galicia exceden los límites establecidos debido al origen granítico de las rocas de su suelo. Para comprobar si sucede lo mismo con su concentración en el agua, se han tomado muestras de agua de la Escuela Naval Militar y de la Península del Morrazo para su posterior análisis. Para medir el radón de las muestras se utilizó el instrumento RTM 1688-2. Además, se trató de hallar correlaciones entre la concentración de radón y otros parámetros. Para analizar la disminución de radón en el agua de las muestras, fueron realizados dos experimentos distintos.

Los resultados obtenidos fueron que el radón existente en el agua de la Escuela Naval Militar es escaso, que, en aproximadamente la mitad de las muestras analizadas, sería recomendable mejorar la protección radiológica frente al radón, que hay correlación entre el pH, la conductividad y la concentración de radón y que los métodos para reducir la cantidad de radón de las muestras fueron eficaces.

## **PALABRAS CLAVE**

Radón en agua, análisis de muestras, parámetros químicos, RTM 1688-2



## **AGRADECIMIENTOS**

Tal y como dice el refranero español, es de buen nacido el ser agradecido. Así que, en primer lugar, me gustaría agradecer la implicación y el tiempo dedicado a este trabajo a los Doctores Santiago Urréjola Madriñán y en especial al Doctor Arturo González Gil, que supo orientarme y aconsejarme en los momentos de mayor incertidumbre.

Seguidamente y ajenos a este trabajo, agradezco a mis hermanos, el AN Carlos Sánchez-Ferragut y el TN Álvaro Sánchez-Ferragut, por guiarme en mi carrera profesional. También quería agradecerle a mi madre, María, su apoyo incondicional y los valores y educación inculcados a lo largo de mi vida. Y por último a mi padre, Chipo, que, aunque ya no esté presente, me acompaña en todo momento a través de la fe.

También quería agradecer a mis compañeros de promoción y a todos los amigos que he conocido en estos 5 años en la ENM, especialmente a los AA Luis Cornago y Luis Delgado y al AF Manuel Ollero que, habiendo trabajado en el mismo estudio que yo, han hecho más amenas las horas invertidas en este trabajo.



## CONTENIDO

Contenido .....	5
Índice de Figuras .....	7
Índice de Tablas.....	9
1 Introducción y objetivos .....	10
1.1 Aguas de consumo .....	10
1.2 Aspectos básicos y efectos derivados del radón .....	10
1.3 Importancia del estudio del radón en agua.....	12
1.4 Justificación .....	12
1.5 Objetivos .....	13
2 Estado del arte .....	15
2.1 Normativa referente al agua.....	15
2.1.1 Evolución histórica .....	15
2.1.2 Antecedentes de normas y leyes sobre la calidad del agua de consumo humano .....	16
2.1.3 Regulación actual de la concentración de radón en el agua de consumo humano .....	17
2.2 Parámetros influyentes en la concentración de radón en agua.....	18
2.3 Las aguas subterráneas y los acuíferos .....	21
2.4 Análisis geológico de la Comunidad de Galicia .....	23
2.5 Métodos de medida de concentración de radón .....	25
2.5.1 Conceptos teóricos de radiactividad .....	25
2.5.2 Clasificación de los distintos métodos.....	28
2.5.3 Dispositivos más utilizados en medición de radón.....	30
2.6 Medidor RTM 1688-2 SARAD .....	33
3 Metodología y materiales .....	35
3.1 Uso del RTM 1688-2 SARAD.....	35
3.1.2 Características del instrumento.....	36
3.1.3 Error estadístico .....	37
3.1.4 Uso del instrumento para medir radón en agua .....	38
3.2 Metodología general .....	40
3.2.1 Muestras en la Escuela Naval Militar.....	41
3.2.2 Muestras en la Península del Morrazo.....	42
3.3 Metodología en las mediciones.....	43
4 Análisis de resultados .....	48
4.1 Muestras en la Escuela Naval Militar .....	48

4.2 Resultado de las muestras analizadas en la Península del Morrazo.....	49
4.2.1 Relación entre los distintos parámetros .....	56
4.3 Análisis de los métodos utilizados para disminuir la concentración de radón.....	58
4.3.1 Transcurso del tiempo.....	58
4.3.2 Agitación de las muestras .....	60
5 Conclusiones y líneas futuras .....	62
5.1 Conclusiones .....	62
5.2 Líneas futuras .....	64
6 Bibliografía.....	65
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales .....	68
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Localización del radón en la tabla periódica [3] .....	11
Figura 1-2 Porcentaje de mortalidad atribuible al cáncer de pulmón por exposición al radón en España por Comunidad Autónoma.....	12
Figura 1-3 Porcentaje de mediciones de radón superiores a los 300 Bq/m <sup>3</sup> en las ciudades gallegas más pobladas [8].....	13
Figura 2-1 Acueducto de Segovia [11] .....	15
Figura 2-2 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y la temperatura [°C] [23].....	19
Figura 2-3 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y pH [23].....	19
Figura 2-4 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/m <sup>3</sup> ], la temperatura [°C] y el pH [23]. ..	20
Figura 2-5 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y la conductividad eléctrica [mS/cm] [23].....	20
Figura 2-6 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y la distancia al origen [Km] [23].....	21
Figura 2-7 Esquema general de un acuífero [26] .....	22
Figura 2-8 Izquierda: Mapa geológico de España [28]. Derecha: Mapa de potencial de radón de España [29].....	23
Figura 2-9 Geología de Galicia [27] .....	24
Figura 2-10 Cadena de desintegración del Radio-226.....	27
Figura 2-11 Esquema de la cadena de desintegración del Radio-224.....	27
Figura 2-12 Clasificación de los medidores de radón.....	29
Figura 2-13 Instrumento ATMOS marca RADONOVA [38] .....	30
Figura 2-14 Instrumento RAD-7 de RUDIDGE [39] .....	31
Figura 2-15 Instrumento ALPHAE de RADONOVA [41] .....	32
Figura 2-16 Instrumento Airthings Home [42] .....	33
Figura 3-1 Esquema de los principales elementos y conexiones del monitor RTM 1688-2 [43].....	35
Figura 3-2 Protección frente a la entrada de agua [43] .....	36
Figura 3-4 Montaje para medir la concentración de radón en agua [44] .....	39
Figura 3-5 Localización de la Península del Morrazo en Galicia y división en municipios.....	41
Figura 3-6 Izquierda: Situación de la Escuela Naval Militar en la península del Morrazo. Derecha: Lugares escogidos para la toma de muestras .....	41
Figura 3-7 Mapa de fuentes y lavaderos en Marín [45].....	42
Figura 3-8 Mapa de fuentes y lavaderos de Bueu [46] .....	42
Figura 3-9 Recipientes de agua número 2, 3, 4 y 5 abiertos procedentes de Fuente Moreira con sus horas de análisis anotadas – Elaboración propia .....	43
Figura 3-10 Monitor midiendo radón de la muestra de agua – Elaboración propia .....	44
Figura 3-11 Izquierda: Detector multiparámetro de la marca Irfora. Derecha: Refractómetro portátil.....	45

Figura 3-12 Izquierda: Leyenda de las bandas colorimétricas en la bolsa. Derecha: Banda colorimétrica tras permanecer 30 segundos en una muestra de agua.....	45
Figura 3-13 Monitor midiendo concentración de radón en aire.....	47
Figura 4-1 Resultados en la Escuela Naval Militar.....	49
Figura 4-2 Mapa de las muestras analizadas en la Península del Morrazo.....	50
Figura 4-3 Distribución de muestras en función de la concentración de radón.....	53
Figura 4-4 Concentración de radón de las muestras según el municipio.....	53
Figura 4-5 Concentración media de radón de las muestras según el municipio.....	54
Figura 4-6 Concentración de radón de las muestras según su altura sobre el nivel del mar.....	54
Figura 4-7 Concentración media de radón de las muestras según su altura sobre el nivel del mar.....	55
Figura 4-8 Concentración de radón de las muestras según su origen.....	55
Figura 4-9 Gráfico <b>CRadón</b> – pH.....	56
Figura 4-10 Gráfico <b>CRadón</b> – Conductividad.....	57
Figura 4-11 <b>CRadón</b> - Salinidad.....	57
Figura 4-12 Experimento con recipiente abierto.....	59
Figura 4-13 Experimento con recipiente cerrado.....	59
Figura 4-14 Comparativa entre experimento con los recipientes de las muestras cerrados y abiertos...	60
Figura 4-15 Experimento de agitación.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Radiactividad y tasa de emanación de radón de diferentes tipos de rocas [26].....	24
Tabla 3-1 Parámetros químicos de las bandas colorimétricas .....	46
Tabla 4-1 Concentración de radón en las muestras de la Península del Morrazo.....	50

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Aguas de consumo

Se definen las aguas de consumo como todas aquellas aguas, ya sea en su estado original o después del tratamiento, utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y para otros usos domésticos, sea cual fuere su origen e independientemente de que se suministren al consumidor, a través de redes de distribución públicas o privadas, de cisternas, de depósitos públicos o privados [1].

Las especificaciones de las aguas de consumo humano en el ámbito nacional están actualmente reguladas por el Real Decreto 314/2016, de 29 de julio donde se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano y el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero donde se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.

Algunos de los parámetros más relevantes a la hora de analizar la calidad del agua de consumo humano son los factores microbiológicos, químicos, físicos, indicadores de tratamiento, presencia de compuestos, trazas orgánicas y radionucleidos. De entre todos ellos, serán los radionucleidos y la medición de la presencia de sustancias radiactivas (uranio, plutonio, radio, cesio, tritio, partículas alfa etc.) y más concretamente el radón-222, donde se focalizará el desarrollo de este trabajo de fin de grado.

En el caso del radón, cabe destacar que no afecta exclusivamente a la calidad del agua, sino que también tiene un impacto directo sobre la salud del ser humano. De hecho, se caracteriza por tener una estrecha relación con varios tipos de cáncer, especialmente con el de pulmón. Es por esto por lo que se le debe dar importancia a los controles y mediciones que se realizan para controlar y vigilar los niveles de radón tanto en aguas de consumo como en el aire.

Resulta primordial conocer los distintos tipos de aguas de consumo humano según su origen para priorizar los análisis en aquellas cuya probabilidad de poseer sustancias radiactivas sea más elevada. Las aguas de consumo humano más propensas a albergar radiactividad son las que proceden de fuentes subterráneas como pozos, manantiales, acuíferos o sondeos. Además, las características geológicas, el tipo de tratamiento de potabilización y las concentraciones de cloruros, carbonatos y sulfatos son considerados factores determinantes en el nivel de radiactividad existente en las aguas de consumo [2].

## 1.2 Aspectos básicos y efectos derivados del radón

El radón es un elemento químico de la tabla periódica (ver figura 1-1) En concreto, este TFG se centrará en uno de sus isótopos (Rn-222), por ser el más abundante de todos los perjudiciales para el ser humano. Este elemento pertenece al grupo de los gases nobles y su número másico y número atómico son 222 y 86 respectivamente. Es imperceptible por cualquiera de nuestros sentidos ya que es incoloro, inodoro e insípido. Este factor, potencia aún más la peligrosidad que posee.

Su procedencia se remonta al isótopo Uranio-238, que mediante una compleja cadena de desintegración radiactiva produce Radio-226 en un primer lugar, produciendo este posteriormente Radón-222. La propiedad más reseñable o a la cual se ha dedicado mayor parte del estudio, es su radiactividad. El daño provocado por este gas en el ser humano se debe principalmente a las sustancias que se pueden encontrar en su cadena de descomposición como se verá en el apartado 2.5.1.

Cuando se inhala radón, parte del total inhalado puede quedar atrapado en diferentes partes del organismo del ser humano, por ejemplo, en los pulmones. Más adelante, el radón se descompone en cuestión de pocos días en sustancias como el polonio, el plomo o el bismuto que pueden llegar a ser perjudiciales.

La unidad de medida comúnmente empleada para medir la concentración de este gas es el Becquerel por metro cúbico para el aire ( $Bq/m^3$ ) y Becquerel por litro para el agua ( $Bq/L$ ). El Becquerel mide la frecuencia de desintegración de un núcleo radiactivo. En definitiva, esta unidad se refiere al número de desintegraciones de átomos de radón por segundo en un metro cúbico de aire o un litro de agua.

**Tabla Periódica de los Elementos Químicos**

Metales de Transición  
Metales  
No Metales  
Metaloides  
Gases Nobles  
Lantánidos  
Actinidos

1 H 1.01																	2 He 4.00
3 Li 6.94	4 Be 9.01											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.30											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.06	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.84	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.41	31 Ga 69.72	32 Ge 72.64	33 As 74.92	34 Se 78.69	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.714	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.60	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 La 138.91	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.07	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.20	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (277)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)		118 Uuo (294)
Cindy Snider Pumacota Aleman.		58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97		
		90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (248)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (260)	102 No (259)	103 Lr (262)		

Figura 1-1 Localización del radón en la tabla periódica [3]

Aunque este gas se descubrió a comienzos del siglo XX, no fue hasta mediados de este mismo siglo cuando se intensificó su estudio. Esta intensificación fue motivada por unos estudios en mineros de uranio, donde se detectaron elevadas tasas de cáncer de pulmón. El interés se disparó cuando se llegó a la conclusión de que la exposición al radón y el cáncer de pulmón estaban relacionados.

Tanto es así, que la exposición al gas radón constituye la segunda causa más frecuente de cáncer de pulmón. Actualmente, se estima que entre un 3% y un 14% de los casos de cáncer de pulmón son atribuibles a esta causa [4] (ver figura 1-2). Las personas que fuman y están expuestas a niveles de radón por encima de los recomendados, tienen un riesgo 10 veces mayor en comparación con alguien expuesto a esos mismos niveles pero que no fuma [5].

Hoy en día se analiza la posibilidad de que el consumo y la ingesta de agua con elevados niveles de radón estén vinculados a otros tipos de cánceres como el de piel, estómago o incluso la leucemia. No obstante, son demasiados los parámetros que pueden influir en la causa de estas enfermedades. Esto ha hecho que los resultados obtenidos sean difusos e inconclusos. En un estudio ecológico realizado en Galicia [6], se han obtenido resultados donde se asocia el cáncer de esófago a la exposición al radón

residual. En este estudio se establece una relación entre la exposición y el cáncer de esófago en varones, pero no en mujeres.

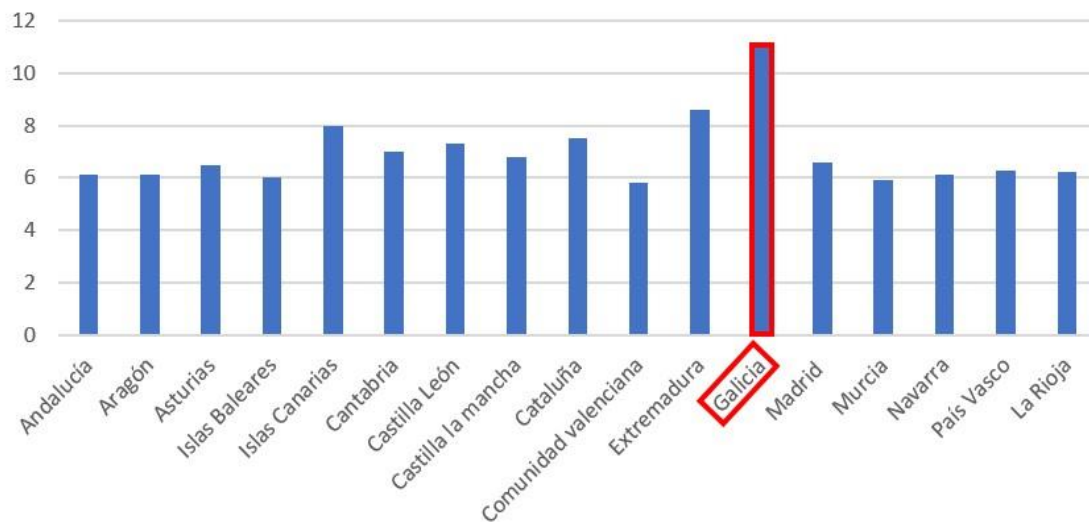


Figura 1-2 Porcentaje de mortalidad atribuible al cáncer de pulmón por exposición al radón en España por Comunidad Autónoma

### 1.3 Importancia del estudio del radón en agua

En el ámbito de la peligrosidad del radón, ha prevalecido el estudio de la concentración de este en aire sobre su estudio en agua en las últimas décadas. El radón procedente del agua es una de las principales fuentes de este gas en el interior de edificios. Además, la ingesta de agua podría estar directamente relacionada con el cáncer de estómago. La autoridad nuclear en E.E.U.U. cifra en que un 11% del cáncer de estómago tiene su origen en el agua de consumo subterránea [7].

Sin embargo, es considerablemente mayor el riesgo de padecer cáncer de pulmón por la inhalación de este gas al evaporarse del agua, que contraer cáncer de estómago por la ingesta. En definitiva, resulta trascendental indagar en la concentración en agua debido al menor número de estudios en este ámbito por ser más complejos.

Además, es interesante debido a que Galicia es considerada una zona de riesgo por sus elevados niveles de radón en comparación con otras zonas de la Península Ibérica. Las altas concentraciones de radón en Galicia se deben a que el subsuelo en esta zona es en gran parte granítico, siendo el granito un tipo de roca más propensa que otras a emanar radón tal y como se muestra en el apartado 2.4.

Existen numerosos municipios donde los vecinos extraen el agua directamente de sus propios pozos, fuentes de agua subterránea o sistemas de suministro que utilizan agua subterránea, siendo estas aguas más potencialmente poseedoras de sustancias radiactivas que las procedentes de otros lugares como los suministros de agua superficial.

### 1.4 Justificación

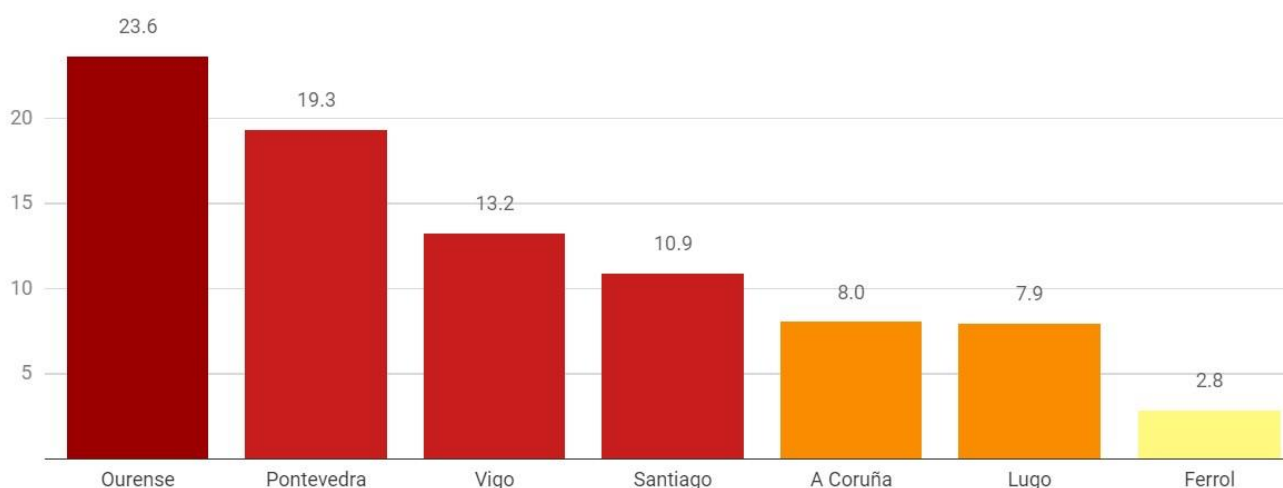
Una vez introducidos los riesgos que puede suponer el radón para el ser humano, se dispondrán a continuación algunas de las causas que sustentan la motivación de este trabajo.

Se puede llegar a la conclusión de que el radón en nuestros hogares es perjudicial. El agua como fuente de radón ha sido menos estudiada por tener un menor aporte al incremento de la concentración de este gas que las otras fuentes. Por esta razón, es interesante analizar cómo y en qué proporción resulta dañino para el ser humano el radón derivado del agua.

Otro de los motivos es que se cree que el agua que contiene radón podría estar relacionada con otros tipos de cáncer como el de estómago o el de piel. Sin embargo, todavía no se han obtenido estudios lo suficientemente solventes como para poder confirmarlo. Muchos de estos estudios se han realizado en lugares donde los niveles de radón no son superiores a los considerados normales y como consecuencia no son concluyentes. Este TFG pretende ser un ligero aporte al estudio de la concentración en agua de este elemento en el entorno de la Escuela Naval Militar.

España tiene unas concentraciones de radón superiores a la media europea. Esta concentración no está igualmente distribuida en su superficie, siendo Galicia la Comunidad Autónoma donde mayores niveles de concentración se registran (ver figura 1-3), seguida por la Comunidad de Madrid y Extremadura. En la Comunidad gallega, donde son muy comunes los pueblos pequeños y las viviendas aisladas, los vecinos extraen el agua de pozos o fuentes de agua subterránea. Este factor hace que resulte atractivo analizarla.

El agua analizada procederá del agua suministrada en la Escuela Naval Militar y de pozos y manantiales de agua subterránea de los municipios de Moaña, Bueu y Marín. Además, se pretende localizar lugares de interés donde se puedan obtener muestras cuyo análisis resulte significativo para este trabajo.



**Figura 1-3 Porcentaje de mediciones de radón superiores a los 300 Bq/m³ en las ciudades gallegas más pobladas [8].**

Por último, es importante aumentar la concienciación sobre los peligros del radón, en especial en la comunidad gallega. En los últimos años, se han realizado en la Escuela Naval Militar hasta una decena de trabajos de fin de grado relacionados con la concentración de este [9]. El primero de ellos, realizado en el año 2019, fue impulsado principalmente por la implantación de nuevas consideraciones sobre el gas radón en el Código Técnico de la Edificación [10]. Los hallazgos y resultados obtenidos en este dieron pie al resto de investigaciones y trabajos.

Este trabajo pretende continuar con la investigación realizada en los trabajos de fin de grado mencionadas anteriormente. Sin embargo, este será el primero de los realizados en este centro docente que se adentrará en el ámbito de la concentración de este isótopo en el agua.

## 1.5 Objetivos

- 1) El objetivo principal de este trabajo es averiguar cuáles eran los niveles de concentración de radón en el agua en la Escuela Naval Militar. Tras haberse llegado a la conclusión en otros trabajos de que los niveles de concentración en el aire en diversos puntos superaban los límites establecidos por la normativa, se priorizó el estudio del agua en este emplazamiento.

- 2) Una vez alcanzado dicho objetivo, se amplía el área de estudio. Para ello se elabora un mapa de la Península del Morrazo donde se muestran los niveles de concentración de radón de las fuentes analizadas. Se buscarán relaciones en cuanto a situación geográfica, altura sobre el nivel del mar o el tipo de origen de la muestra.
- 3) El siguiente objetivo consiste en hallar correlaciones entre una serie de parámetros y la concentración de radón hallada en las muestras. Entre estos parámetros se encuentran el pH, la conductividad o la salinidad, además de multitud de parámetros químicos.
- 4) Otro de los fines del trabajo es hallar un coeficiente para predecir la reducción de radón en una muestra en función del tiempo transcurrido entre su toma y sus análisis. De este modo, se podría calcular la concentración de radón original en cualquiera de las fuentes a partir de una ecuación.
- 5) De la mano del objetivo anterior, se estableció un nuevo objetivo cuyo fin consiste en encontrar métodos viables para reducir la cantidad de radón en las muestras. De esta manera, se opta por el transcurso del tiempo entre la toma de una muestra y su análisis como uno de los métodos. A continuación, se halla un segundo método para reducir la concentración de radón en el agua. Este método se basa en la agitación de las muestras para permitir y facilitar la salida del radón contenido en las mismas.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Normativa referente al agua

#### 2.1.1 Evolución histórica

El sistema español de gestión de las aguas de consumo y la evaluación para garantizar su calidad son elementos fundamentales en la política de desarrollo económico del siglo XXI. Sin embargo, las normas que giran en torno a ella han sufrido muchas variaciones desde que se tiene consciencia de su gran valor.

Fue en la época romana donde se comenzó a construir ciudades con unas infraestructuras y complejos sistemas de captación, transporte y utilización del agua (ver figura 2-1). Tuvieron lugar importantes mejoras en la urbanización actuando como pilar base el impulso de los servicios públicos utilitarios. La gestión del agua en la época romana era propiedad estatal. Una característica particular en este periodo era que el derecho de utilización de las aguas no pasaba a los herederos, ni a los arrendatarios, ni a un nuevo propietario, es decir, era una concesión a título personal e intransferible.



Figura 2-1 Acueducto de Segovia [11]

Tras los romanos, se estableció en la península la civilización árabe. En Al Andalus, el aprovechamiento de las aguas se fundamentaba en la regla general de que nadie podía apropiarse del agua y excluir al resto de personas. La mayoría de las fuentes y los pozos eran públicos, exceptuando

aquellos que se construían o excavaban por entidades privadas con alguna iniciativa particular. La actividad más reseñable de los árabes en el ámbito hídrico fue el regadío, quedando en la actualidad diversas marcas de dichas infraestructuras en la península.

Durante la Edad de Media surge un aumento de la importancia del agua y del papel que desempeña en la sociedad, además de la necesidad de una gestión apropiada de la misma. Debido a la gran cantidad de conflictos bélicos durante esta época, el agua se convierte en un bien estratégico y de poder. En este periodo, las aguas son consideradas bienes personales o patrimoniales y estaban sujetas a los derechos del soberano a disponer de las mismas. En definitiva, los señores feudales tenían derecho a adueñarse de las aguas y el pueblo tenía derecho a usarlas. Esto hizo que el agua fuese considerada como una utilidad económica.

Pasados unos siglos, ya bien adentrados en la Edad Moderna, se diferenciaban dos ramas en la gestión del agua. Por un lado, estaban los territorios donde la posesión de la tierra y el uso del agua estaban unidos y por otro lado los territorios donde ambos elementos se disociaban, dando la posibilidad de vender agua. Así, la disponibilidad de agua en el hogar estaba solo al alcance de una minoría que o bien la compraba, o bien obtenía de gracia por merced de la Corona o del Ayuntamiento. Los habitantes que no tenían este privilegio iban directamente a las fuentes públicas o acudían a los servicios del gremio de aguadores.

Durante el siglo XIX se trató de eliminar el régimen de gestión y abastecimiento anterior, considerado obsoleto. Esto impulsó la implantación de las primeras leyes (Ley de aguas de 1879) que estableció los principios básicos de la utilización racional del agua que se basaba en el dominio público y en el aprovechamiento de las fuentes de agua naturales. Además, se comenzaron a construir redes de suministro para hacer llegar el agua de consumo a los hogares.

La necesidad de cumplir con las leyes que se habían instaurado provocó que el Estado estableciese una organización administrativa especializada en el ámbito hídrico en el año 1926 (Confederaciones Hidrográficas [12]). Aunque fue más de medio siglo más tarde cuando entró en vigor la nueva Ley de Aguas de 1985. Esta nueva ley se acercaba mucho más a las leyes que actualmente regulan la gestión y la distribución de las aguas a nivel nacional. Es decir, el modelo de gestión territorial quedó obsoleto y los ayuntamientos adquirieron protagonismo en la gestión directa del servicio de agua. Durante este periodo las construcciones hidráulicas sufrieron un auge y surgieron los Planes de Cuenca [13] y el Plan Hidrológico Nacional [14].

Históricamente, tanto las leyes como la preocupación social giraban en torno a la gestión y distribución del agua. Con la industrialización, la contaminación de las aguas creció de manera exponencial. Esto afectó negativamente a la calidad del agua y cada vez más enfermedades se transmitían a través de ella. Como consecuencia, se implantó en 1912 la Ley de Sanidad Nacional. Dicha ley no se centraba de manera específica en el agua de consumo, pero fue la primera en establecer las bases para la regulación sanitaria, el control de la calidad y la prevención de enfermedades transmitidas por el agua.

A finales del siglo XX, se comenzaron a establecer leyes referentes a la calidad del agua de consumo humano a nivel europeo. Esto fue posible debido al desarrollo tecnológico que facilitó la identificación, medición y regulación de los parámetros más determinantes en cuanto a calidad se refiere.

### *2.1.2 Antecedentes de normas y leyes sobre la calidad del agua de consumo humano*

La primera ley que estableció normas y requisitos básicos para la calidad del agua destinada al consumo humano a nivel europeo fue La Directiva 80/778/CEE de 1980 [15]. Entre los puntos clave de esta directiva destacan la fijación de límites en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el agua potable, los márgenes de concentración admisibles de numerosos compuestos y elementos químicos, márgenes óptimos en cuanto a parámetros organolépticos, frecuencia mínima de análisis exigida, además de la obligación de los Estados miembros de regular y garantizar el cumplimiento de estas directrices. Posteriormente, La Directiva 98/83/CE de 1998 [16] sustituyó a La Directiva de 1980.

Las principales diferencias entre ambas consistían en que la más reciente fue capaz de conseguir una mayor profundidad y simplificación en los distintos parámetros, y fue más restrictiva en el establecimiento de distintos valores paramétricos. También se consiguió una reducción en las obligaciones de monitorización, mejora de información al consumidor y flexibilidad de adaptación de los Estados.

En la directiva de 1980 no se contemplaban los parámetros de radiactividad, ya que no se percibía la actividad radiológica en el agua de consumo como un peligro directo para el ser humano. Esto se debía a que las concentraciones de sustancias radiactivas eran casi imperceptibles en comparación con otros parámetros que tenían una mayor capacidad para deteriorar la calidad del agua. Sin embargo, en la directiva de 1998 ya aparecen ciertos límites referentes a sustancias radiactivas como el tritio o el radón. No obstante, estos parámetros no eran todavía considerados lo suficientemente relevantes como para establecer una frecuencia de monitoreo determinada.

Estas directivas necesitaban ser traspuestas a nivel nacional. Se materializó en 1990 a través del Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público. El contenido de este era muy similar a su análogo de la Unión Europea, aunque dentro de los parámetros de radiactividad no se contemplaba la concentración de radón, tan solo las radiaciones alfa y beta.

En el año 2001 se publicó a nivel europeo el primer documento que se refería al radón con carácter específico. Se trataba de una recomendación de la Comisión Europea relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable. En ella se establecieron las acciones a tomar según los márgenes de concentración de radón, además de informar sobre las altas concentraciones de radón en aguas subterráneas en comparación con las aguas superficiales, aproximar el aumento de concentración en aire según las concentraciones en agua (una concentración de 1000 Bq/l conlleva un aumento de 100 Bq/m<sup>3</sup> [17]), advertir sobre los riesgos tanto de inhalación de radón procedente del agua como la ingesta de agua que contiene radón, concienciar al público sobre los riesgos tanto del radón como de sus productos de desintegración (polonio-210 y plomo-210) y requerir a los Estados miembros la implantación de las medidas que constan en la recomendación.

Para poder garantizar la calidad de las aguas de consumo a nivel nacional e incorporar los nuevos requisitos que exigía la Unión Europea a los Estados miembros se puso en vigor el Real Decreto 140/2003 [18], de 7 de febrero. Este Real Decreto sufrió una serie de modificaciones a través del Real Decreto 314/2016 [19], de 13 de Julio como consecuencia de la implantación a nivel europeo de la Directiva 2013/51/EURATOM [20] por la que se establecieron requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a las sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano. Existen actualmente numerosas normas y directivas encargadas de regular la calidad de las aguas de consumo (muchas de ellas se enfocan en otros parámetros como la salubridad, la limpieza, el acceso a las aguas, la explotación, la elaboración y comercialización de aguas preparadas envasadas para consumo humano) pero este trabajo se centrará en lo referente a las sustancias radiactivas.

### *2.1.3 Regulación actual de la concentración de radón en el agua de consumo humano*

Las normas que se encargan de controlar la calidad de las aguas de consumo en España en la actualidad son el Real Decreto 314/2016 [21], de 13 de Julio, que aborda también otros ámbitos del agua de consumo como la regulación de la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano y el Real Decreto 3/2023 [22] de 10 de enero por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.

En este apartado se detallarán los parámetros que actualmente son considerados de mayor relevancia a la hora de evaluar la calidad del agua de consumo y se indagará en las medidas para identificar, medir, analizar y corregir en caso de ser necesario la concentración de radón en las aguas de consumo.

- Niveles límite en la concentración de radón: La normativa europea permite cierta libertad a los Estados Miembros a la hora de establecer el límite en la concentración de este gas en las aguas de consumo, estableciendo que un nivel inadecuado de la concentración será siempre un valor superior a los 100 Bq/l e inferior a los 1000 Bq/l. En España se adoptó el valor de 500 Bq/l teniendo en cuenta la información disponible sobre las características de las aguas de nuestro país. También existen exigencias en cuanto al método de análisis, que debe ser capaz de medir los diversos parámetros con un límite inferior. En el caso del radón la concentración mínima es de 10 Bq/l.
- Frecuencias mínimas de muestreo y análisis: No será necesario controlar la presencia de radón en el agua cuando se tenga constancia a través de estudios representativos, datos de control u otra información fiable, de que durante un periodo de 5 años los niveles de radón van a estar por debajo de los valores paramétricos. No obstante, la frecuencia de muestreo dependerá en todo caso del volumen de agua distribuida en una zona de abastecimiento por día.
- Actualización de la caracterización de las masas de agua por la presencia de radón: La caracterización del agua por la presencia de radón consiste en analizar diferentes muestras de distintas captaciones de una masa de agua. Posteriormente se procede a su análisis y se determina si la caracterización de la masa de agua es negativa o positiva. Serán denominadas como positivas aquellas donde la media de las muestras refleje una concentración superior a 100 Bq/l y, por el contrario, se clasificarán como negativas aquellas cuya concentración sea inferior a 100 Bq/l. Se requiere con el fin de optimizar la captación destinada a la producción de agua de consumo y se deberá ejecutar no más tarde del 2 de enero de 2029.

## **2.2 Parámetros influyentes en la concentración de radón en agua**

En este apartado, se verán los distintos factores que determinan la cantidad de radón que puede disolverse en el agua. Algunos de ellos son:

- Temperatura y presión: Generalmente, conforme desciende la temperatura del agua, su capacidad para disolver gases se ve incrementada. Por otra parte, cuanto más fría se encuentre el agua, mayor será su capacidad para retener radón. Es decir, se liberará una mayor cantidad de radón al aire cuanto más altas sean las temperaturas. También se deberá tener en cuenta que, bajo presiones elevadas, el poder de disolución de gas radón aumentará (esto ocurre en muchos acuíferos subterráneos). Así se ve relegado en un estudio realizado en una isla de Irán [23] donde se relaciona la concentración de radón con la geología del terreno y una serie de parámetros, entre ellos la temperatura (ver figura 2-2).

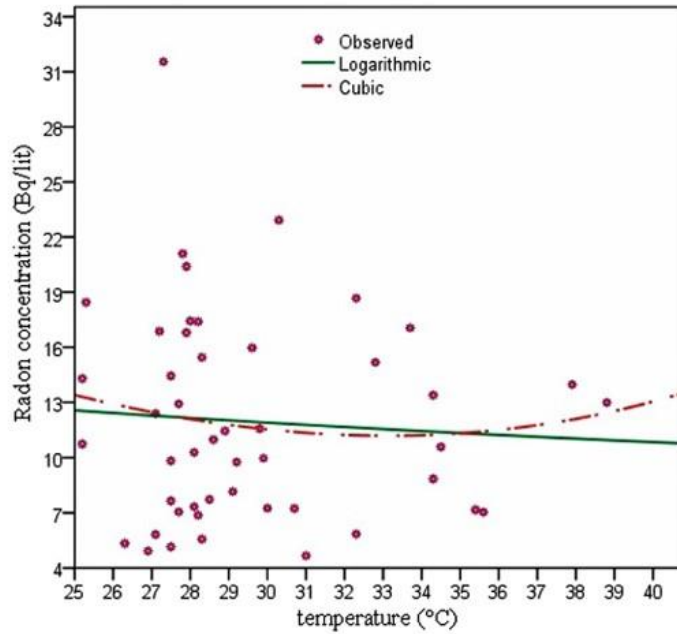


Figura 2-2 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y la temperatura [°C] [23].

- Química del agua: El pH del agua puede incidir directamente sobre la manera en la que se disuelven y permanecen los gases en el agua. Otros factores que podrían afectar en las concentraciones de radón pueden ser el contenido mineral del agua o la interacción con otros gases. Según el estudio mencionado anteriormente se puede asociar un aumento del pH a un aumento de la concentración de radón (ver figura 2-3). Es decir, la acidez contribuirá a una mayor capacidad de retención de radón.

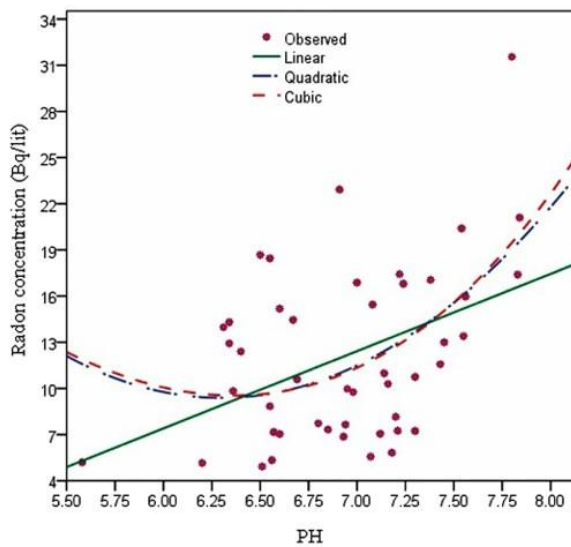


Figura 2-3 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y pH [23].

Sin embargo, en otro estudio se evaluó como afectaba la temperatura y el pH al mismo tiempo (ver figura 2-4) y los resultados obtenidos no se corresponden con los obtenidos en el estudio anterior:

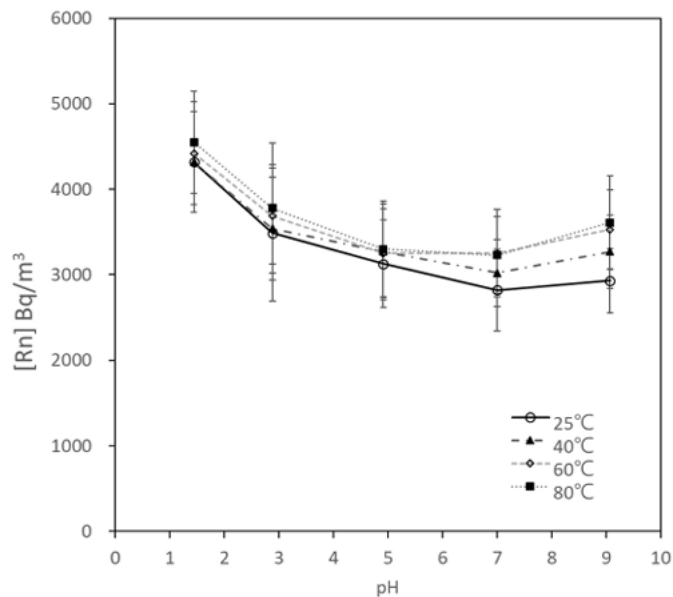


Figura 2-4 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/m<sup>3</sup>], la temperatura [°C] y el pH [23].

En esta gráfica (pH representado en el eje X y concentración en el eje Y, con cuatro funciones para cuatro temperaturas diferentes) se muestra como la contribución del pH a la concentración de radón es máxima para pH's más básicos y alcanza el mínimo para un pH neutro, volviendo a aumentar lentamente a medida que se incrementa la acidez del agua. Para la temperatura, se observa como las concentraciones de radón aumentan a medida que asciende la temperatura.

- Conductividad eléctrica (ver figura 2-5): La conductividad eléctrica también se analizó en dicho estudio al tratarse de un parámetro relevante a la hora de evaluar la calidad del agua. Se llegó a la conclusión de que la disminución de conductividad eléctrica se asociaba a concentraciones de radón más elevadas.

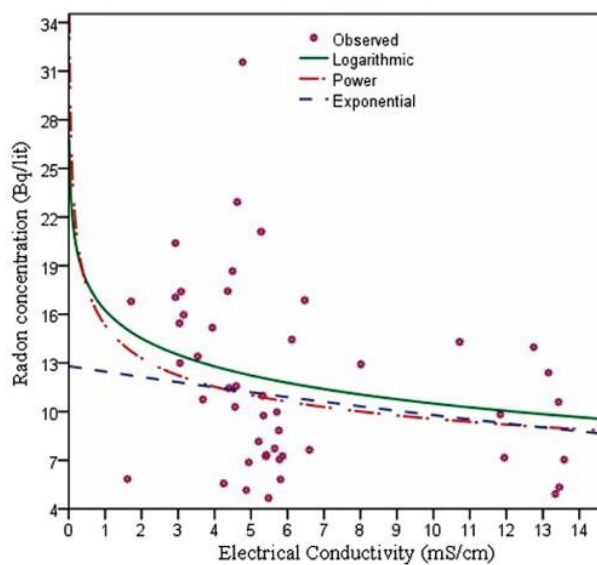
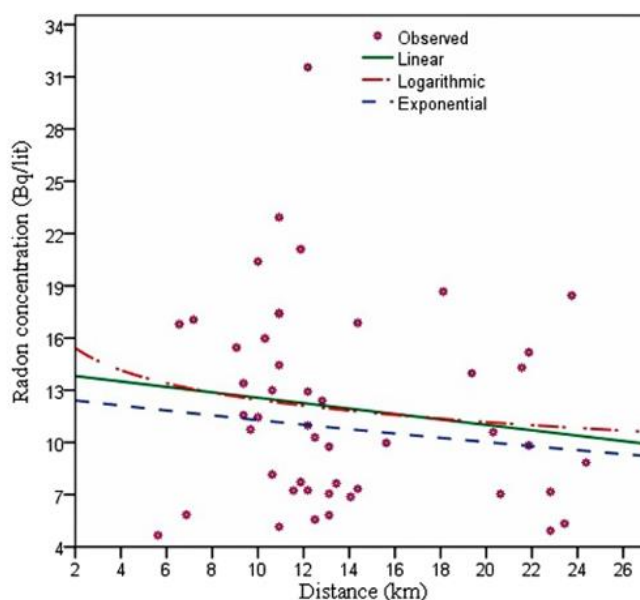


Figura 2-5 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y la conductividad eléctrica [mS/cm] [23].

- Distancia a la falla principal (ver figura 2-6): Cuanto mayor es la distancia que viaja el agua desde su origen hasta el punto donde se analiza la muestra, mayor es el tiempo disponible para desprenderse del radón que contiene. Por lo tanto, la concentración de radón se ve reducida a medida que el agua se aleja del origen.



**Figura 2-6 Comparativa entre la concentración de radón [Bq/L] y la distancia al origen [Km] [23].**

- Rutas de infiltración: Determinarán el grado de contacto existente entre el agua y los distintos materiales geológicos. Las fracturas en las rocas, la porosidad, permeabilidad, profundidad y distancia son algunos de los ejemplos de los parámetros que influirán en la ruta que seguirá el agua.
- Profundidad del pozo: Generalmente, la probabilidad de existencia de formaciones rocosas ricas en uranio y radio aumenta con la profundidad. Además, en los pozos profundos el agua puede haber estado en contacto con estas formaciones rocosas durante periodos de tiempo más prolongados.
- Actividad humana: Cualquier tipo de actividad que altere el normal flujo de agua subterránea se puede reflejar en un incremento de la concentración de radón. Como ejemplo podemos tomar actividades como la extracción del agua, construcción y desarrollo urbano, minería y perforación, alteración de los niveles del agua subterránea etc.

Pero el factor que más repercutirá en la concentración de radón en agua es la procedencia del agua, siendo considerablemente más elevadas las concentraciones en aguas subterráneas que en aguas superficiales como ríos, lagos, embalses etc.

Sin embargo, cuando se analiza la concentración de radón, son todos los parámetros anteriores y alguno más no mencionado, los que influyen. Pero la imposibilidad de analizar estos parámetros de manera conjunta dificulta en gran medida la capacidad de asociar la proporción en la que influye cada uno de ellos.

## 2.3 Las aguas subterráneas y los acuíferos

Como se ha indicado en apartados anteriores, el radón es soluble en agua, y está presente tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas. De la misma manera que ocurre con este gas en los suelos, el radón se distribuye de manera muy desigual en las aguas. Por ejemplo, el agua de los lagos, ríos, arroyos e incluso la del mar, reflejan una incidencia muy baja de radón (por debajo de 2 Bq/L). Sin

embargo, las aguas extraídas de fuentes subterráneas como pozos, manantiales, acuíferos o sondeos presentan valores más elevados.

La explicación de esta diferencia es que las aguas subterráneas fluyen a través de formaciones rocosas que pueden contener uranio, radio y torio. Las aguas subterráneas que se extraen de fuentes localizadas en rocas graníticas, rocas volcánicas ácidas, sieníticas y pegmatíticas poseen unos niveles que oscilan entre los 50 y los 500 Bq/L. Aguas subterráneas obtenidas en fuentes situadas en rocas sedimentarias como calizas, areniscas y pizarras, así como rocas intermedias y rocas volcánicas básicas, por lo general, presentan concentraciones de radón que varían entre 5 a 70 Bq/L [24].

En la mayor parte de los estudios, el foco de interés se centra en las aguas subterráneas que se encuentran sobre rocas con altos niveles de radón, para poder de esta manera evaluar la exposición de la población por el consumo de agua. En este tipo de investigaciones se suelen también buscar correlaciones entre los valores de distintos radionucleidos en agua y otros parámetros como la estructura geológica, el contenido de distintos elementos químicos de la roca madre y disequilibrios en la serie del uranio [25].

La preocupación que causa la concentración de radón en agua de consumo se intensifica cuando el origen de esta es subterráneo. En el Real Decreto 3/2023 de 10 de enero, se exigen controles específicos de radón y mayores frecuencias de muestreo cuando la procedencia del agua es subterránea. Las captaciones de agua superficial presentan una probabilidad bastante más reducida de presentar valores de radiactividad superiores a los paramétricos. A medida que se incrementa la profundidad en la corteza terrestre, crece el número de formaciones geológicas ricas en uranio. Si las aguas subterráneas son profundas e inmóviles (fósiles), la probabilidad de que las concentraciones sean elevadas se dispara. La carencia de movimiento en las aguas favorece la concentración por el hecho de que la agitación y turbulencia del agua implican desprendimiento y desgasificación de radón.

El estudio y análisis de la recarga de los acuíferos es de gran relevancia, para extraer datos referidos a cantidad de agua, procedencia, calidad y zonas susceptibles de albergar flujos subterráneos.

En primer lugar, se diferenciará entre acuíferos, aguas subterráneas y masas de agua subterráneas. Se considera acuífero (ver figura 2-7) a una o varias capas subterráneas de roca u otros estratos geológicos con una porosidad y permeabilidad suficientes para permitir un flujo significativo de aguas subterráneas o la extracción de una cantidad sustancial de estas. En cuanto a las aguas subterráneas, se definen como todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo. Por último, se pueden describir las masas de agua subterránea como un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos.

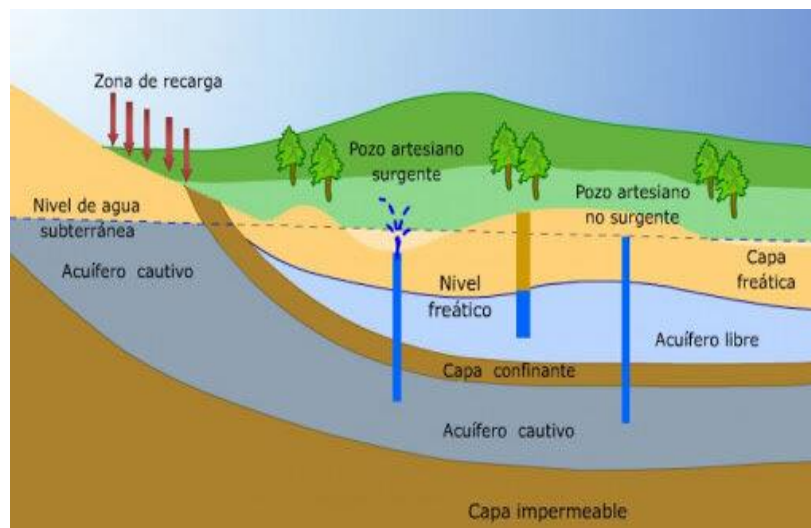


Figura 2-7 Esquema general de un acuífero [26]

## 2.4 Análisis geológico de la Comunidad de Galicia

El basamento de Europa central y occidental está formado por el Orógeno Varisco que en la península ibérica se denomina Macizo Ibérico [27]. En realidad, la gran variedad geológica presente en Galicia destaca a nivel mundial. Desde el precámbrico, que tuvo lugar hace más de 650 millones de años, Galicia ha sido modelada con el paso de los años en los diferentes periodos.

Durante el Paleozoico, se formaron las rocas más antiguas. Posteriormente, los procesos tectónicos y la orogenia hercínica dieron forma a la región. Fue durante este periodo, que comprende desde el devónico hasta el carbonífero (hace unos 380 millones de años) cuando se produjeron muchas de las formaciones geológicas que existen actualmente en la península ibérica, entre las que se encuentra la cordillera cantábrica y el sistema central. Las formaciones graníticas propias de algunas zonas del oeste de Galicia se formaron en este periodo. Las formaciones peninsulares que se produjeron en esta época son las grandes responsables de los elevados valores paramétricos en determinadas zonas del país.

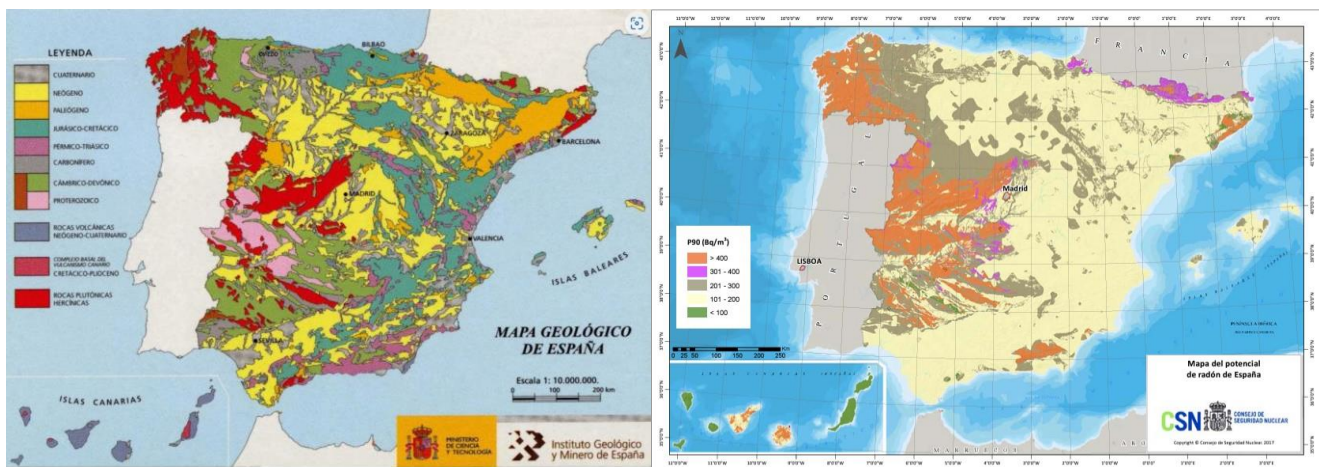


Figura 2-8 Izquierda: Mapa geológico de España [28]. Derecha: Mapa de potencial de radón de España [29]

Se puede apreciar en la 2-8, el impacto directo que las rocas plutónicas hercínicas han supuesto en la concentración de radón de la península ibérica. Se puede observar como las zonas con valores de potencial de radón superiores a  $400 \text{ Bq/m}^3$  (señaladas en naranja en la imagen superior derecha) tienen una estrecha relación con aquellas zonas ricas en rocas plutónicas hercínicas (señaladas en rojo en la imagen superior izquierda).

En los periodos posteriores tienen lugar numerosos procesos como la separación y colisión de placas tectónicas, grandes ascensos y descensos del nivel del mar y un considerable arrasamiento del relieve. El periodo que terminó de modelar la orografía peninsular fue el terciario (hace 65 millones), donde se formaron las grandes cadenas montañosas ibéricas, que han llegado hasta la actualidad. Los Pirineos y los Picos de Europa al norte, y las Béticas al sur [30].

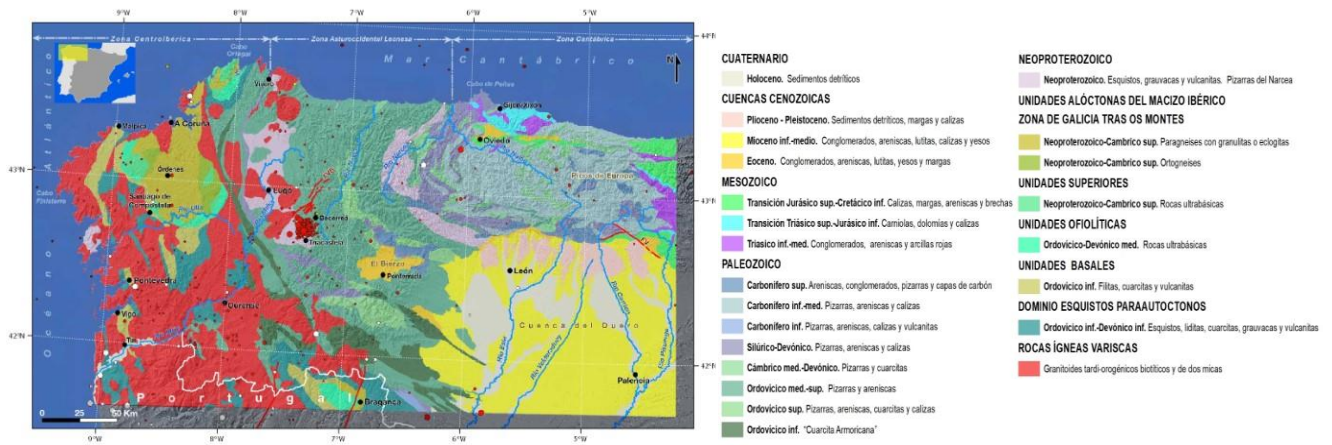


Figura 2-9 Geología de Galicia [27]

De las formaciones geológicas en Galicia (ver figura 2-9) cabe destacar las rocas ígneas variscas que se encuentran principalmente en la zona occidental de la Comunidad, más concentradas en las Rías Bajas. Estas rocas ígneas son principalmente granitoides alcalinos y granitoides calcoalcalinos. Las mayores contribuyentes a las elevadas concentraciones de radón en Galicia son estos dos tipos de granitoides. Esta información se puede contrastar con la figura 1-4 del apartado 1.4, donde se muestra el porcentaje de mediciones de radón superiores a los 300 Bq/m<sup>3</sup> en las ciudades gallegas más pobladas. El área donde la concentración de rocas granitoides es más elevada se corresponde con el sur de la Comunidad de Galicia (Ourense y Pontevedra).

El orden de magnitud de actividad radiactiva procedente de la superficie de rocas graníticas puede llegar a alcanzar los 1000 Bq/m<sup>2</sup> mientras que los valores medios de otros tipos de roca no suelen superar los 100 Bq/m<sup>2</sup>. En un estudio sobre los factores que afectan a la capacidad de las rocas de los acuíferos de emanar radón se determinó la cantidad de actividad radiactiva asociada al radón en diferentes tipos de rocas y los resultados fueron los que se exponen a continuación (ver tabla 2-1):

Sample ID	Total activity (Rn <sub>t</sub> )	Activity per surface area (A <sub>su</sub> )	Exhalation rate (F)
	Bq	Bq/m <sup>2</sup>	Bq·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>
GNS	0.42	1744	13.2 ± 1.32
GNT	0.49	1061	8.1 ± 0.81
SVG	0.47	385	2.9 ± 0.29
LSP	0.76	29	0.2 ± 0.02
LLB	0.74	61	0.4 ± 0.04
SVL	0.68	25	0.2 ± 0.02

Tabla 2-1 Radiactividad y tasa de emanación de radón de diferentes tipos de rocas [31]

-GNS: Gneiss<sup>1</sup>

-GNT: Granito

-SVG: Granito tamizado

<sup>1</sup> Es una roca metamórfica que se forma a partir de rocas preexistentes, generalmente ígneas, mediante un proceso denominado metamorfismo. En cuanto a su apariencia, suele presentar bandas o capas alternas de minerales que le proporcionan un aspecto singular.

-LSP: Loess<sup>2</sup> Sierra de los Padres

-LLB: Loess Lobería

-SVL: Loess tamizado

Se puede observar como en el caso de los distintos tipos de granitos la actividad por unidad de superficie es del orden de cientos de Becquerels, superando incluso los 1000 Bq/m<sup>2</sup>. Sin embargo, se muestra en la tabla como el resto de los materiales tienen una actividad inferior a los 100 Bq/m<sup>2</sup>.

## 2.5 Métodos de medida de concentración de radón

### 2.5.1 Conceptos teóricos de radiactividad

Es importante conocer algunos aspectos básicos referentes a la radiactividad y a las cadenas de desintegración radiactiva porque en la mayoría de los casos la manera de medir la cantidad de radón se basa en contabilizar el número de desintegraciones por unidad de tiempo.

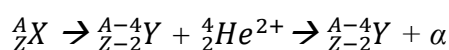
Existen tres grandes cadenas naturales de desintegración radiactiva y sus elementos principales o de los cuales parten son el uranio-238, el uranio-235 y el torio-232. La prolongada vida media de estos elementos hace posible que existiesen desde las primeras etapas de la Tierra y continúen en nuestro planeta actualmente. Sus periodos medios de desintegración son 238U ( $T_{1/2} = 4500$  millones de años), 235U ( $T_{1/2} = 700$  millones de años) y 232Th ( $T_{1/2} = 14000$  millones de años). Estos periodos son del orden de magnitud de la edad de la Tierra.

En estas cadenas radiactivas existen elementos radiactivos intermedios durante el decaimiento y todas ellas finalizan con la formación de un isótopo estable de plomo. La serie del uranio-238 está compuesta por 19 radioisótopos, la serie del uranio-235 está compuesta por 17 radioisótopos y la serie del torio-232 está compuesta por 12 radioisótopos. En todas estas cadenas existe un isótopo del radón (Radón-222 en la cadena de desintegración del Uranio-238, torón (Radón-220) en la del Torio-232 y Radón-219 en la del Uranio-235).

Estas cadenas de decaimiento son posibles gracias a las desintegraciones alfa y beta. Mediante estas, se forman nuevos isótopos con una vida media que varía desde microsegundos hasta millones de años.

### Desintegración alfa

La desintegración alfa es una forma de desintegración radiactiva donde un núcleo atómico emite una partícula alfa y se transforma en un núcleo con 4 unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico [32]. Se puede considerar como la liberación espontánea de núcleos de helio (partícula  $\alpha$  o  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ) a partir de núcleos atómicos más pesados, mediante un proceso de fisión nuclear espontánea. La ecuación que define este proceso es la siguiente:



Donde X es el núcleo padre, Y el núcleo hijo, Z es el número atómico y A el número másico.

Un ejemplo de esta desintegración se podría exponer a través del Uranio-238 o del Radio-226:



Este proceso se produce de manera espontánea ya que es energéticamente favorable. Es decir, la masa del núcleo descendiente más la masa de la partícula alfa es inferior a la masa del núcleo padre (que ahora tiene 2 protones, 2 neutrones y 2 electrones menos). El núcleo padre tiene tras la emisión de la partícula alfa una configuración más estable al existir menos protones y neutrones en su núcleo. Además,

<sup>2</sup> Es un tipo de sedimento eólico formado principalmente por tierra blanda, normalmente limo o arcilla.

la partícula alfa posee energía cinética, lo cual contribuye a la liberación neta de energía durante el proceso. Este balance de energía se representa mediante la siguiente expresión:

$$E = [M_{Z,A} - (M_{Z-2, A-4} + M_{2,4})] c^2$$

Donde  $M_{Z,A}$ ,  $M_{Z-2, A-4}$  y  $M_{2,4}$  son las masas atómicas del núcleo padre, del núcleo hijo y de la partícula alfa [33].

### Desintegración beta

El decaimiento beta es un proceso mediante el cual un nucleido inestable emite una partícula beta para conseguir una optimización en la relación entre protones y neutrones que contiene el núcleo. La partícula beta puede consistir en un electrón ( $\beta^-$ ) o un positrón ( $\beta^+$ ). Este tipo de desintegraciones se caracteriza por la variación de neutrones y protones en el núcleo padre, pero la suma de protones y neutrones en el núcleo hijo, es decir, su número másico no varía frente al del núcleo padre. Este decaimiento se considera una fuerza nuclear débil o interacción débil bajo las leyes de la física

La diferencia fundamental entre un electrón o positrón y la partícula beta correspondiente es su origen nuclear: no se trata de un electrón ordinario arrancado de un orbital atómico [34]. Este proceso es propio de metales muy pesados y de algunos radionucleidos artificiales que poseen gran cantidad de protones.

La desintegración beta se puede basar en distintos esquemas básicos. En uno de ellos un neutrón se convierte en un protón, un electrón y un antineutrino<sup>3</sup> (decaimiento  $\beta^-$ ). Otro tipo de desintegración beta es el decaimiento  $\beta^+$ , que se basa en la transformación de un protón en un neutrón, un positrón y un neutrino. Por último, se clasifica también como desintegración beta a la captura electrónica. En todos estos decaimientos varía el número de protones y neutrones del núcleo, pero se mantiene constante el número de nucleones (protones más neutrones).

Las desintegraciones alfa y beta al igual que la mayoría de las reacciones nucleares, inducen un estado excitación al núcleo final. Seguidamente, se produce una reacción gamma, en la que se liberan fotones de una elevada energía de manera espontánea con el fin de alcanzar un estado de excitación menor. A su vez, tiene lugar en el núcleo un proceso paralelo denominado “conversión interna”. En este proceso, se expulsa un electrón de la capa interna utilizando la energía disponible del estado de excitación. Esto desemboca en que un electrón de una capa más externa ocupa el lugar del electrón eyectado y se emiten rayos X [33].

A continuación, se muestran las cadenas de decaimiento del **Uranio-238** (ver figura 2-10) y del **Torio-232** (ver figura 2-11), representadas desde el Radio-226 y Radio-224 respectivamente. La cadena de desintegración en la que se encuentra el radón-219 no se representa debido a que es menos común en comparación con estas. En ellas, se pueden apreciar los distintos isótopos que intervienen, sus vidas medias y las reacciones que conforman la propia cadena de desintegración:

---

<sup>3</sup> Es una partícula subatómica neutral perteneciente a la familia de los neutrinos. Se define como la antipartícula del neutrino, es decir, tiene propiedades totalmente opuestas a este. Los antineutrinos se pueden originar en diversas reacciones nucleares como la desintegración beta. En definitiva, son fundamentales en el ámbito nuclear y astrofísico.

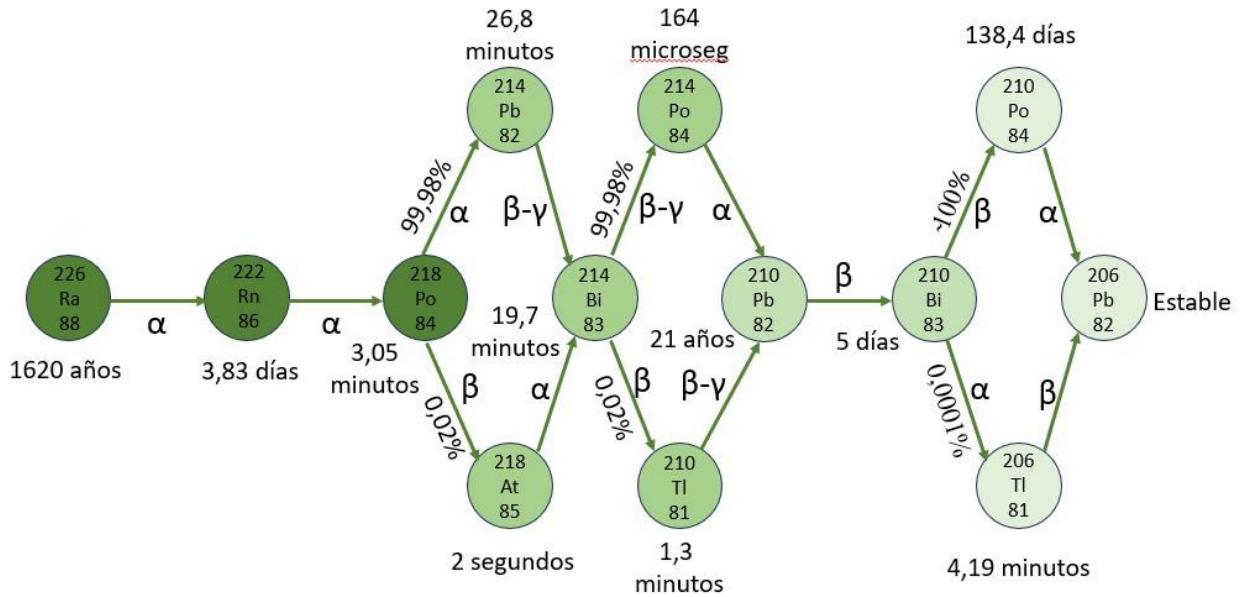


Figura 2-10 Cadena de desintegración del Radio-226

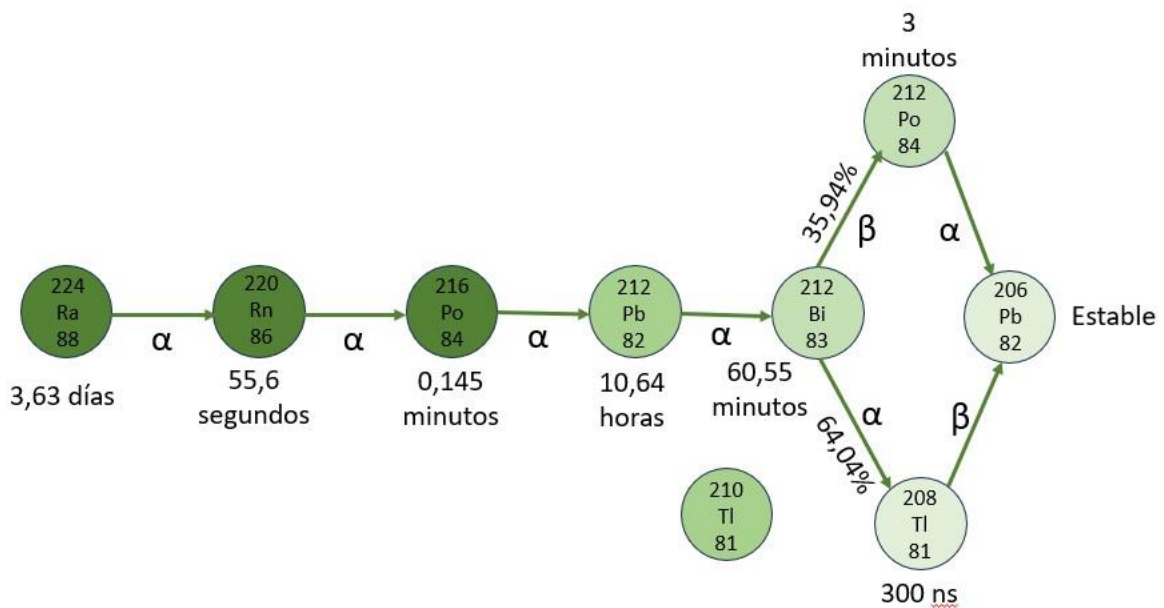


Figura 2-11 Esquema de la cadena de desintegración del Radio-224

En el esquema de la figura 2-10 se puede observar como el tiempo medio de desintegración del torón es inferior a un minuto, frente a los más de 3 días que tiene el radón-222 (figura 2-11). Esto hace que se le dé menos prioridad al estudio del torón en este trabajo. Su corto periodo de semidesintegración hace menos probable su presencia en cualquier medio.

### Ley de desintegración radiactiva

La ley de desintegración radiactiva establece que la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo decaiga es una constante, independiente del tiempo. Esta ley describe la tasa de desintegración nuclear y es conocida en el mundo de la física como una ley universal que explica el funcionamiento y el comportamiento estadístico de una gran cantidad de nucleidos [35].

Es decir, el radionucleido no tiene “memoria” y un núcleo no “envejece” a medida que transcurre el tiempo. A esta constante de desintegración se le denomina lambda ( $\lambda$ ). Durante la desintegración, un núcleo inestable se descompone al azar y de manera aleatoria para formar un núcleo distinto. Este parámetro puede variar para los diferentes tipos de núcleos. Es por esto por lo que existe un amplio intervalo en cuanto a tasa de desintegración según sea el núcleo de un isótopo u otro.

El número de desintegraciones radiactivas por unidad de tiempo, es decir, la actividad de la muestra radiactiva se relaciona con la constante de desintegración a través de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N(t)$$

Donde  $N$  es el número de núcleos radiactivos para un instante de tiempo ( $t$ ). La actividad se mide en Becquerelios, es decir, en desintegraciones por segundo ( $1 \text{ Bq} = 1 \frac{\text{desintegración}}{\text{s}}$ ). Si integramos esta ecuación, entonces obtendremos la actividad de una muestra en un determinado instante  $A(t)$ . La ecuación resultante teniendo en cuenta que el número de núcleos en el instante  $t = 0$  es  $N_0$ , es la que se muestra a continuación:

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

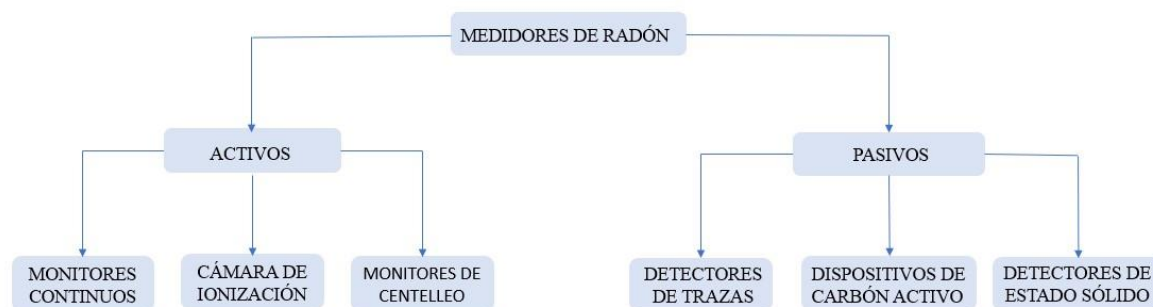
Resulta también relevante conocer el concepto de periodo de semidesintegración, que se puede definir como el tiempo para que el número inicial de núcleos de un determinado isótopo se reduzca a la mitad  $N(t) = N_0/2$ . Este parámetro se puede relacionar con la constante de desintegración radiactiva mediante la siguiente ecuación:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

La comprensión del funcionamiento de la cadena de desintegración del radón-222, de las desintegraciones alfa y beta, de la ley de desintegración radiactiva y del periodo de semidesintegración resulta trascendental para entender los principios en los que se basan la mayoría de los aparatos que miden la concentración de radón. Estos instrumentos, por norma general, miden la concentración de radón contabilizando el número de partículas alfa (u otras como las gamma) emitidas. La diferencia entre los distintos métodos suele ser la rapidez a la hora de mostrar los resultados, la precisión en la medición, la capacidad de aislar las partículas alfa emitidas por el radón-222 de las partículas alfa de otros isótopos etc.

### 2.5.2 Clasificación de los distintos métodos

Los aparatos destinados a medir radón se pueden clasificar según sean activos o pasivos (ver figura 2-12). Los denominados activos requieren alimentación constante para funcionar y proporcionan lecturas en tiempo real, permitiendo un monitoreo continuo. Mientras que los pasivos no requieren alimentación para operar y registran la exposición acumulada en un determinado periodo de tiempo.



**Figura 2-12 Clasificación de los medidores de radón**

El método que se utiliza en los diferentes casos variará en función de una serie de factores, como el propósito de la medición, la duración del proceso de monitoreo, el entorno y el ambiente concreto en una medición y la precisión que se requiera. Dependiendo de lo que se pretenda priorizar, cada método presentará determinadas ventajas e inconvenientes, por lo que será de vital importancia escoger el método más adecuado teniendo en cuenta el fin y los objetivos de la medición, además de las condiciones del lugar. Estos son los métodos principales según el mecanismo empleado:

- Detectores de centelleo: En ellos son utilizados cristales o líquidos que poseen la propiedad de emitir luz (centelleo) cuando las partículas alfa inciden sobre ellos. Esta propiedad se aprovecha para correlacionar la cantidad de centelleos con la concentración de radón.
- Detectores con cámara de ionización: El funcionamiento general de este método se basa en medir la ionización producida por las partículas alfa emitidas por el radón y los productos inmediatos de su cadena de descomposición (Po-218, Pb-214, Bi-214 y Po-214...) para posteriormente utilizar la corriente generada como herramienta de medición de radón. Puede dar resultados en breves períodos de tiempo comprendidos entre 10 min y 1 hora, que informan del comportamiento del radón a lo largo del día [36]. Ofrecen numerosos datos con gran precisión, pero su coste es elevado.
- Detectores de trazadores nucleares: Un trazador radiactivo es un compuesto químico en el que uno o varios átomos han sido sustituidos por un radioisótopo. Con la monitorización de su decaimiento radiactivo, es posible utilizar un radiotrazador para estudiar el mecanismo de las reacciones químicas [37]. Consisten en dispositivos de pequeño tamaño capaces de registrar las trazas generadas por partículas alfa emitidas por el radón y sus subproductos de descomposición en una película sensible. Estos trazadores se pueden colocar en distintos puntos de una vivienda, edificio o instalación para medir la exposición a lo largo del tiempo.
- Detector de partículas alfa de estado sólido: Se trata de un dispositivo que utiliza un material semiconductor (normalmente silicio), que convierte la radiación alfa directamente en una señal eléctrica. Son muy robustos y determinan electrónicamente la energía emitida por cada partícula alfa. Con este dispositivo se puede tener conocimiento de la radiación asociada a cada isótopo.
- Monitoreo continuo: Estos sistemas permiten medir la concentración de radón en interiores para evaluar la exposición a este gas. Al ser continuo, es capaz de proporcionar una visualización general de las variaciones y oscilaciones que sufre la concentración a lo largo de un determinado periodo de tiempo.
- Filtros de carbón activo: Los filtros de carbón activo son dispositivos compuestos por gránulos de carbono que necesitan adsorber el radón ambiental durante 48 h. El análisis de los resultados es rápido pudiendo disponer de los resultados aproximadamente 4-5 horas después de finalizar

las medidas. Se trataría de una medida rápida y de coste moderado. La información ofrecida por estos sensores es una imagen instantánea como resultado del promedio de actividad en los dos días que dura la exposición [36]. Los filtros de carbón activado se utilizan principalmente para absorber y retener gases, incluido el radón, en un proceso llamado adsorción. Cuando el aire o el agua contaminados con radón pasan a través del filtro de carbón activado, las moléculas de radón se adhieren a la superficie porosa del carbón. Luego, la concentración de radón atrapado en el filtro puede ser medida mediante métodos específicos de análisis, como la espectrometría gamma.

### 2.5.3 Dispositivos más utilizados en medición de radón

Existen multitud de aparatos de medida de radón. El uso de uno u otro dependerá entre otras cosas del fin de la medición. En este apartado se detallarán las características de dispositivos de diferentes marcas y empresas alrededor del mundo.

#### **ATMOS**

Este instrumento cuenta con la cámara de ionización de impulsos de disolución de energía más sensible del mundo. Sus características y manera de operar son muy similares a las del RTM 1688-2. Su bajo peso, hace posible su utilización in situ o en el laboratorio. Cuenta también con un rápido tiempo de respuesta y una gran precisión gracias a su bomba y a su análisis de gran eficacia.

Con el ATMOS (ver figura 2-13) se podrán obtener medidas de concentración de radón en 10 minutos con un margen de error inferior al 10%. Esto repercute en que su utilidad para hacer numerosas medidas en un mismo día es superior a la de otros instrumentos. Mediante una serie de sensores el ATMOS es también capaz de proporcionar datos precisos sobre la temperatura, la humedad relativa y la presión.

Tiene altas prestaciones en cuanto a capacidad de memoria y batería. Esto lo hace muy útil para ser portado y realizar ensayos fuera del laboratorio. Entre las áreas de aplicación habituales del ATMOS se encuentran la inspección de inmuebles y las mediciones de seguimiento tras una actuación, aunque constituye también un instrumento de referencia común para las cámaras de calibración [38].



Figura 2-13 Instrumento ATMOS marca RADONOVA [38]

#### **RAD-7**

Las modalidades de uso se pueden dividir en seis categorías principales:

1. Monitoreo continuo del radón que se encuentra en el aire
2. Muestreo buscando radón o torón

3. Evaluación de las muestras de captura de aire
4. Medición de radón en el agua
5. Evaluación del gas del suelo
6. Medición de emisión de radón y torón proveniente de objetos y superficies

Este dispositivo (ver figura 2-14) utiliza un detector de partículas alfa de estado sólido. Como ya se ha explicado, este aparato es capaz de discernir el radón del torón y de discernir la señal del ruido. Esta técnica, conocida como espectrometría alfa, es muy ventajosa para aplicaciones de rastreo o de muestreo de captura. Hay muy pocos instrumentos a parte del RAD-7 que sean capaces de hacer esto [39].

Otra de las características que convierte a este en uno de los instrumentos más elegidos a nivel mundial es su insignificante radiación de fondo. Se define como la lectura proporcionada por el instrumento en unas condiciones donde no exista radón en la muestra de aire. Si se desea realizar un monitoreo de nivel bajo, es imprescindible que la radiación de fondo tenga unos valores muy bajos y estables. Esto se consigue en el RAD-7 gracias a la gran calidad que posee por su excelente detector de partículas alfa y su especial análisis de espectros en tiempo real. El RAD-7 es inmune al plomo-210 capaz de afectar negativamente a otros instrumentos.

Otro de los modos de funcionamiento de este instrumento es el de rastreo. Rastrear significa tomar lecturas rápidas de algunos puntos al azar. La utilidad de este modo es la de conocer valores aproximados de concentración de radón en cortos periodos de tiempo. De esta manera, los resultados obtenidos no son tan exhaustivos, pero no es necesario esperar tanto como en el monitoreo continuo [39].

El rastreo en este instrumento se considera también de elevada calidad, ya que el aparato es capaz de detectar exclusivamente las radiaciones de aquellos isótopos que resulten importantes para el rastreo e ignora las desintegraciones de otros isótopos sobrantes. En definitiva, es capaz de medir únicamente la concentración de radón sin que interfieran las desintegraciones procedentes de otras cadenas de desintegración.

Este instrumento de medida posee un modo de trabajo que le permite medir la concentración de radón en agua mediante el accesorio RAD H<sub>2</sub>O. Este modo tiene una gran exactitud, en un rango bastante amplio de concentraciones y ofrece las lecturas una hora más tarde de tomar la muestra. [40].



Figura 2-14 Instrumento RAD-7 de RUDIDGE [39]

## ALPHA E

Es un dispositivo de medida de radón en edificios, espacios exteriores y minas con resolución temporal. Su mecanismo de funcionamiento no es tan sofisticado como la de los aparatos anteriores, pero tiene una buena relación calidad precio (ver figura 2-15). Su rapidez es bastante inferior a la de instrumentos como el RAD-7 o el RTM 1688-2. Por norma general, se alcanza en la medición un 80% del valor real transcurridas dos horas. No obstante, el tiempo variará en función de la cantidad de radón existente.

Sus grandes cualidades en cuanto a ligereza y sus funciones lo hacen adecuado para determinar exámenes referentes a las dosis y exposición personal al radón en los centros de trabajo. Este dispositivo calcula de manera automática la exposición acumulada. Además, su pequeño tamaño lo hace ideal para portarlo encima y realizar mediciones en ámbitos subterráneos

El principio de funcionamiento se basa en la detección de partículas alfa al igual que el RTM 1688-2. El aire se introduce en el monitor y gracias a un sensor se detectan los decaimientos del gas radón a través de las partículas alfa.

El sensor es capaz de medir el campo eléctrico (que como se verá posteriormente, cuando se explique el funcionamiento del RTM 1688-2 es proporcional al número de partículas alfa y por lo tanto a la concentración de radón) y muestra la concentración de radón en aire en  $Bq/m^3$ . Este instrumento no permite al usuario la opción de medir la concentración de radón presente en el agua.



Figura 2-15 Instrumento ALPHA E de RADONOVA [41]

## AIRTHINGS HOME

Es un monitor para medir radón de bajo coste y de uso sencillo con un diseño específico destinado al uso de particulares en viviendas (ver figura 2-16). Es una manera fiable de cerciorarse de que los niveles en un hogar no sobrepasan los recomendados sin la necesidad de contratar un equipo especializado de medición de gas radón. Sin embargo, el AIRTHINGS HOME tampoco ofrece al usuario la posibilidad de medir en agua.



Figura 2-16 Instrumento Airthings Home [42]

El aparato es muy manejable por su pequeño tamaño (cabe en un bolsillo) y no necesita conexión a la red eléctrica ya que funciona con tres pilas que tienen una vida media de 2 años.

En la pantalla se muestran dos resultados de concentración de radón diferentes. En la parte superior se muestra el nivel medio de radón a largo plazo, es decir, en los últimos 365 días o desde la última vez que las pilas fueron cambiadas. En la parte inferior se muestra la media registrada a corto plazo, es decir, en los últimos 7 días.

Sus características y prestaciones lo hacen más asequible para su uso por particulares. Este instrumento le ofrece al usuario información aproximada de los niveles de radón en su hogar o lugar de trabajo. No obstante, la precisión y la sensibilidad ofrecidas son más pobres que la de otros equipos de medida.

## 2.6 Medidor RTM 1688-2 SARAD

Es un monitor de medida universal que permite medir la concentración de radón y torón en distintos medios. Con este monitor se pueden analizar muestras con bajas concentraciones de radón en cortos periodos de tiempo debido a su alta sensibilidad y al método de espectroscopia alfa utilizado. Puede medir la concentración de radón en aire, identificar las distintas entradas de radón al interior de un habitáculo, además de medir el radón que contiene el agua o el suelo.

Sus aplicaciones se asemejan a las del RAD-7 y entre ellas se encuentran las siguientes:

1. Determinación de la concentración de radón y torón en el aire
2. Determinación de la concentración de radón en muestras de agua o agua corriente.
3. Medición de la concentración de radón en suelos en proyectos de construcción o investigaciones geofísicas.
4. Localización de entradas de radón en edificios.
5. Proporciona medidas de exhalación y emanación de radón.
6. Puede utilizarse como una estación autónoma para monitorear concentración en edificios o sistemas.

Este aparato mide la concentración de radón o torón mediante detectores de ionización en una cámara basándose en espectrometría alfa. La concentración de radón es medida a partir de los isótopos

en los que decae el radón-222. Es decir, tras decaer el radón y durante un periodo de tiempo determinado, los núcleos de Po-218 se cargan positivamente debido a que algunos electrones de la capa de valencia son arrancados por las partículas alfa generadas durante el decaimiento. El aparato consta de un detector semiconductor capaz de coleccionar estos iones mediante la fuerza de un campo eléctrico. El aparato realiza un recuento del número de iones recolectados por el campo eléctrico. El número de iones de Polonio-218 será directamente proporcional a la cantidad de radón que contiene la cámara.

El RTM 1688-2 tiene dos modos básicos de funcionamiento, uno rápido y otro lento. El primero tiene la ventaja de ofrecer resultados de manera más veloz y su respuesta frente a cambios en la concentración es considerablemente más rápida, pero presenta más carencias en cuanto a precisión. La razón de esta diferencia es que el modo rápido solo tiene en cuenta la concentración de radón procedente del decaimiento del Polonio-218. Sin embargo, el modo lento tiene en cuenta la concentración basándose en el decaimiento tanto del Polonio-218 como del Polonio-214.

No obstante, el tiempo para mostrar la concentración medida es mayor ya que antes de decaer en Polonio-214, el Polonio-218 decae en Plomo-214 y Bismuto-214 mediante emisiones beta (ver figura 2-5).

En el caso del torón, el descendiente directo es el Polonio-216. Este isótopo también sufre el proceso de ionización. En este caso no existe modo lento o rápido ya que el periodo de semidesintegración de los siguientes descendientes de la cadena es demasiado largo. El torón es muy útil para identificar entradas de radón en edificios porque el periodo de semidesintegración del Polonio-16 es de unos pocos segundos (ver figura 2-6). Los núcleos procedentes del decaimiento del torón se miden mediante espectroscopia de emisiones alfa al igual que con el radón-222.

### 3 METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este apartado se explicará en detalle las características del instrumento RTM 1688-2 y el montaje necesario para medir la concentración de radón en el agua. Además, se tratará de exponer y explicar el procedimiento seguido durante la toma de muestras, la medición de concentración de radón de estas, el análisis de otros parámetros químicos y como se llevó a cabo el registro de los resultados. Para alcanzar los objetivos propuestos en este TFG, el procedimiento que se siguió es el que se comentará a continuación.

#### 3.1 Uso del RTM 1688-2 SARAD

Durante el desarrollo del TFG, el uso del monitor se destinará exclusivamente a medir la concentración de radón en agua por lo que en el siguiente apartado se explicarán los detalles del montaje necesario para medir la concentración en dicho medio. Adicionalmente, se comentará el funcionamiento estándar para medir la concentración en aire, pero sin entrar en detalle.

A continuación, se muestra una imagen con los principales elementos y conexiones del aparato de medida (ver figura 3-1):



Figura 3-1 Esquema de los principales elementos y conexiones del monitor RTM 1688-2 [43]

**A: Display****B: Entrada USB****C: Palanca / Botón de operación****D: Luz****E: Conexión para protección interna frente a agua****F: Suministro eléctrico externo****G: Entrada de RS 232****H: Entrada de aire****I: Salida de aire****J: Filtro de polvo y partículas**

### 3.1.2 Características del instrumento

La fuente de alimentación del RTM 1688-2 puede proceder de las baterías internas de plomo de 12V del propio aparato o conectándolo directamente a la red eléctrica. La batería proporciona una autonomía de más de 24 horas y se debe cargar al menos cada 3 meses. Es importante tener en cuenta que el tiempo necesario para obtener una recarga total de la batería en caso de una descarga completa es de 8 horas.

El instrumento cuenta con un filtro que es fundamental para su correcto funcionamiento. Este filtro impide que los productos descendientes del radón penetren en la cámara de ionización. De esta manera solo se tomarán en cuenta para la medición los decaimientos procedentes del radón y no los de otros isótopos que podrían introducirse en la cámara sin la presencia del filtro.

Para no deteriorar la cámara interna de ionización, el aparato tiene una protección adicional para medir la concentración en agua que consiste en un pequeño tanque de acero inoxidable (ver figura 3-2) que impide la entrada de agua en el monitor. Si el montaje a la hora de medir se realiza correctamente, no debería ser necesario el filtro debido a que el agua no llega hasta él. En el caso de cometer errores en el montaje y de llegar el agua hasta el tanque, este cuenta con un flotador que actúa como barrera al notar la presencia de agua. En el caso de que esto ocurra, el usuario deberá parar el aparato inmediatamente. Es crucial el impedimento de entrada de agua en la cámara ya que podría provocar daños graves.



**Figura 3-2 Protección frente a la entrada de agua [43]**

Antes de comenzar una medición se realizará el montaje según el ámbito en el que se desee medir (las especificaciones del montaje serán explicadas más adelante). Para llevar a cabo una medición se pulsa una vez el botón de “TOGGLE”. Según el modo en el que se haya configurado el aparato, aparecerá en pantalla el tiempo de espera necesario para que se muestre el primer resultado (1, 5, 10, 15, 30, 60 o 120 minutos).

Una vez aparezca en pantalla el primer resultado se podrán ver los distintos datos medidos pasando a páginas siguientes a través del botón de “TOGGLE” (El aparato tiene un total de cinco páginas y en cada una de ellas se muestra diferentes datos (ver figura 3-3)). El primer resultado se mostrará en pantalla de la siguiente manera:

Radon\* 18:27  
 853Bq/m<sup>3</sup> ±8%  
 #34 117/120Min

Si se pulsa el botón una vez se mostrarán los resultados de la segunda página, referidos al torón:

Thoron 18:27  
 124Bq/m<sup>3</sup>±16%  
 #34 117/120Min

Los resultados ofrecidos en la tercera página están referidos a sensores adicionales que muestran parámetros como la temperatura, la presión, la humedad relativa y el voltaje:

Ambient 18:27  
 21.5°C 987mbar  
 46% rH 12.3V

La cuarta página muestra las concentraciones medias de radón y torón desde que se comenzó a medir hasta el último intervalo medido:

Average 68.0Hrs  
 Rn: 519Bq/m<sup>3</sup>  
 Tn: 141Bq/m<sup>3</sup>

Por último, se muestra en la quinta página la fecha y hora de inicio de la medición, la configuración de la alarma y la bomba seleccionada:

>>17.04.06 11:32  
 ALM: 720Bq/m<sup>3</sup>  
 CONT. SNIFF216

Se puede acceder al menú de ajuste del intervalo de medida presionando el botón “TOGGLE” durante 6 segundos. Para ajustarlo no podrá estar la medición en marcha. Se podrá escoger entre los intervalos mencionados anteriormente. Para seleccionar el intervalo deseado es necesario volver a presionar el botón durante 6 segundos.

También se puede configurar el modo de operar de la bomba que puede ser continuo o bombeo de intervalo. En el modo continuo la bomba funciona durante toda la medición mientras que en el modo de intervalo la bomba cesa su funcionamiento en los primeros 5 minutos de cada nuevo intervalo. Para intervalos de 1 minuto o de 5 minutos solo se puede seleccionar el modo continuo.

La alarma que tiene incorporada el sistema se establecerá en el nivel donde lo desee el usuario, emitiendo un pitido por segundo si se sobrepasa el límite. Para reestablecerla, se pulsa el botón “TOGGLE”.

### 3.1.3 Error estadístico

El decaimiento radiactivo es una medida estadística sobre el tiempo que tarda en desintegrarse una cierta fracción de una muestra radiactiva. Es decir, aunque la concentración de radón sea constante en el tiempo, el número de núcleos ( $N$ ) que han decaído durante un intervalo será diferente al número de núcleos decaídos en otros intervalos con la misma duración. Por lo tanto,  $N$  varía alrededor del valor medio de los intervalos considerados. Si se realizase una medida con un número de intervalos infinito, el valor medio proporcionado se correspondería con el valor verdadero de  $N$ . Si se realiza una medida con un número de intervalos limitado, el valor de  $N$  estará por encima o por debajo de ese valor

verdadero. Esta diferencia entre el valor proporcionado y valor real de  $N$  se le denomina “Error Estadístico”.

Para cada medición de radón, el valor lleva asociado un error para un determinado intervalo de confianza. Los intervalos de confianza más utilizados son 1, 2 o 3 sigma ( $\sigma$ ) que se corresponden con una probabilidad del 68,3%, 95,45% y 99,73%. En el caso de este instrumento, el intervalo de confianza utilizado es  $1\sigma$ . Por ejemplo, si obtuviésemos un valor  $430 \text{ Bq/m}^3$  con un error estadístico  $1\sigma \pm 15$  significaría que:

El valor real de concentración de radón se encuentra con una probabilidad del 68,3% entre los valores  $365,5$  ( $430 \text{ Bq/m}^3 - 15\%$ ) y  $495,5$  ( $430 \text{ Bq/m}^3 + 15\%$ ).

Existe una ecuación que relaciona el error estadístico relativo para un intervalo de confianza de  $k$ -sigma con el número de cuentas ( $N$ ) detectadas:

$$E [\%] = 100\% * k * \sqrt{N} / N$$

En el caso del RTM 1688-2 SARAD el intervalo de confianza es  $1\sigma$  por lo tanto  $k$  en esta ecuación tendrá un valor de 1 y el error dependerá únicamente del número de cuentas. La conclusión percibida de esta ecuación es simple. Se puede reducir a que cuanto más elevado sea el número de cuentas, menor será el error y por lo tanto mayor será la precisión en la medición.

A su vez, el número de cuentas ( $N$ ) depende de dos parámetros. Por un lado, la sensibilidad del aparato que es una constante específica (es el doble de alta en el modo lento que en el modo rápido) y por el otro, el intervalo de integración escogido. La relación entre el valor de la concentración de radón medida  $C_{RN}$  y el número de cuentas  $N$  en un intervalo de integración  $T$  viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{RN} = N / (T * S)$$

Donde  $C_{RN}$  es la concentración de radón,  $N$  el número de cuentas,  $T$  el intervalo de integración y  $S$  la sensibilidad.

### 3.1.4 Uso del instrumento para medir radón en agua

La medida de la concentración de radón en una muestra de agua se basa en el estado de equilibrio que tiene lugar al transcurrir un determinado periodo de tiempo entre la concentración de actividad de radón en agua y en aire en el interior de un sistema cerrado.

La relación entre la concentración de actividad en aire y en agua depende exclusivamente de la temperatura de la muestra. Esta dependencia se puede expresar a través del coeficiente de Oswald que indica que la solubilidad de radón en agua disminuye con un aumento de la temperatura de agua.

$$K_{Oswald} = C_{RN} (\text{agua}) / C_{RN} (\text{Aire})$$

Por otro lado, este coeficiente se puede aproximar para un rango de temperaturas entre  $0^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$  por la siguiente función:

$$K_{Oswald} = 0,425 * e^{[(0,05 * (-) \text{temperatura}) + 0,1]}$$

La concentración absoluta en el interior de la cámara estará determinada por la concentración de radón existente en la muestra de agua y en la relación entre el volumen de aire total y el volumen de agua. Cuanto más alto sea el volumen de agua comparado con el volumen de aire, más elevado será el nivel esperado de actividad en el volumen de aire. Al tratarse de un sistema cerrado, el nivel de actividad en su interior se puede considerar constante (esa actividad puede pasar de aire a agua y viceversa pero no salir del sistema ya que se consideran nulas las fugas al exterior). Por lo tanto, se puede afirmar que la relación entre la concentración en aire y la concentración en agua se establece de la siguiente forma:

$$A(\text{agua}) = A_1(\text{agua}) + A(\text{aire})$$

Donde  $A(\text{agua})$  es la actividad total en el volumen de agua,  $A_1(\text{agua})$  es la actividad en el agua remanente tras la desgasificación y  $A(\text{aire})$  se refiere a la actividad en el volumen de aire.

También se puede afirmar que la concentración de actividad ( $C_A$ ) en una muestra equivale a la cantidad de actividad total entre el volumen total de la muestra. Es decir, como  $C_A = A/V$ , se puede establecer que:

$$C_A(\text{agua}) * V(\text{agua}) = C_{A1}(\text{agua}) * V(\text{agua}) + C_A(\text{aire}) * V(\text{aire})$$

Donde  $V(\text{agua})$  es el volumen de agua total de la muestra,  $C_{A1}(\text{agua})$  es la concentración de actividad de la muestra de agua después de la desgasificación,  $V(\text{aire})$  es el volumen total (cámara, parte del matraz que contiene aire y tubos) y  $C_A(\text{aire})$  es la concentración de actividad en el aire en el interior del sistema sellado tras la desgasificación.

Si se inserta esta ecuación en la ecuación del coeficiente de  $K_{OSWALD}$ , quedaría de la siguiente manera:

$$C_A(\text{agua}) = \{C_A(\text{aire}) * [K_{Oswald} * V(\text{agua}) + V(\text{aire})]\} / V(\text{agua})$$

A través de esta ecuación se pueden obtener resultados de concentración de radón en agua a partir del resto de parámetros. No obstante, no será necesario introducir los valores en la ecuación para cada muestra porque el fabricante proporciona un Software (“RADON IN WATER CALCULATOR”) capaz de calcular la concentración a partir de una serie de parámetros. Se introducirán los datos referentes a la concentración en aire (proporcionada por el RTM SARAD 1688-2), la temperatura (mostrada también por el monitor en cada medición) y los volúmenes totales tanto de agua como de aire en el circuito cerrado (que deberán ser valores conocidos por el usuario). El montaje necesario para medir la concentración de radón en agua es el que se muestra a continuación (ver figura 3-4):

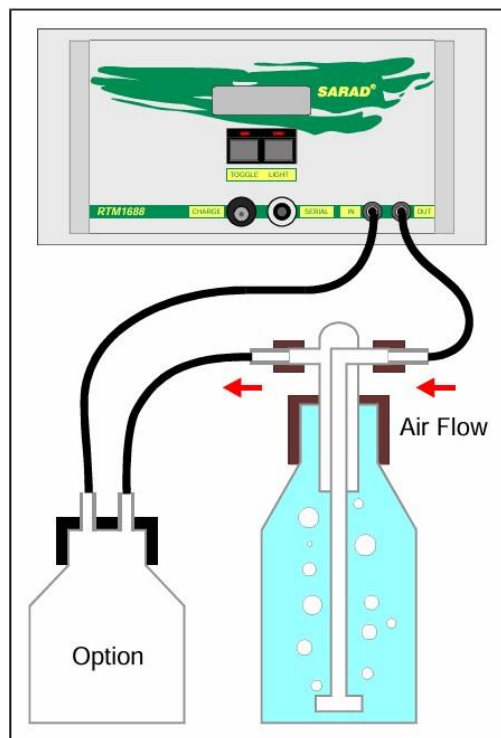


Figura 3-3 Montaje para medir la concentración de radón en agua [44]

El radón disuelto en el agua se desgasifica gracias al aire que entra en el matraz procedente de la salida del monitor. A continuación, este gas sale del matraz siguiendo la corriente de aire y pasa por el filtro opcional de acero inoxidable que sirve de seguro para que no penetre agua en el monitor. Posteriormente, el aire pasa a través del tubo por la entrada al monitor.

Finalmente, la concentración de radón en aire es medida en el interior de la cámara de ionización y el aire sale nuevamente hacia el matraz, completando así el ciclo cerrado. El aire es impulsado durante todo el ciclo mediante una bomba interna. En este caso, la bomba es de membrana, que resulta ser la más adecuada ya que minimiza las pérdidas por fugas en el circuito cerrado.

### **3.2 Metodología general**

Antes de comenzar a captar muestras se identificó la ubicación de las fuentes y lavaderos, además de tratar de localizar aquellas que resultan más interesantes para este trabajo. Para ello, resultó muy útil el uso de unos mapas realizados por los Ayuntamientos de Marín [45] y de Bueu [46] que recogen gran parte de los lavaderos y fuentes de dichos Ayuntamientos. A partir de ellos, se trató de localizar las fuentes más accesibles de tal manera que tuviesen una separación que permitiese obtener una distribución lo más uniforme posible dentro del área de estudio. También se intentó que el agua recolectada procediese de fuentes que, por su apariencia o por su localización, fuesen más frecuentadas por los usuarios.

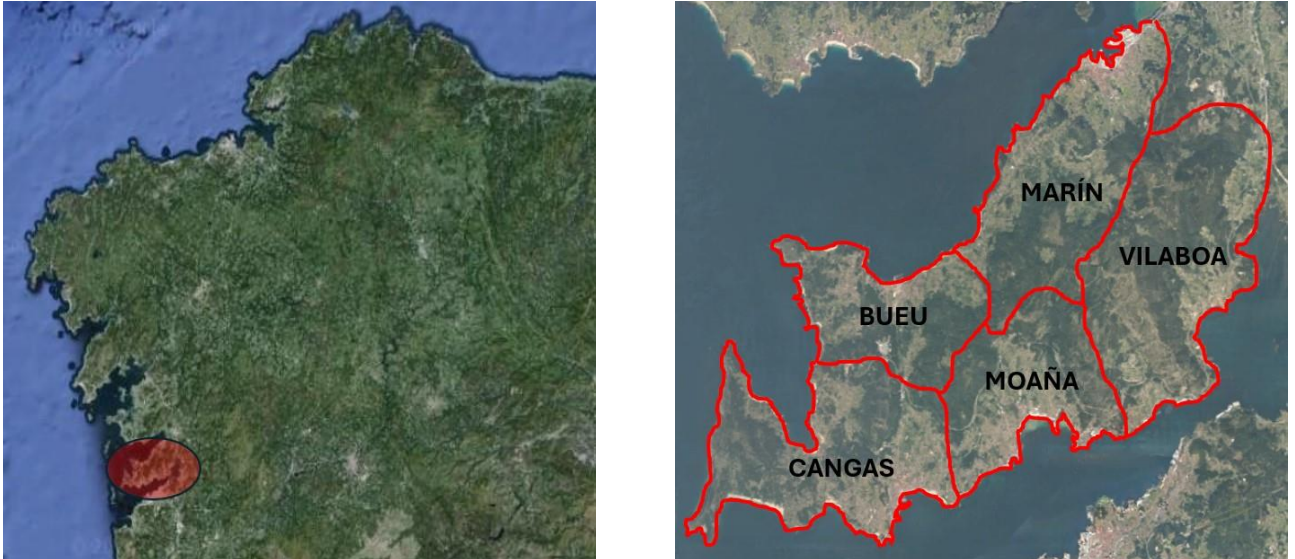
En definitiva, el trabajo previo de localización e identificación de fuentes se basó en tres parámetros:

- Accesibilidad: El relieve de la península resulta ser bastante irregular, lo que puede dificultar el acceso a las fuentes y como consecuencia entorpecer el proceso de recolecta de muestras. Además, se trató de no acudir a fuentes que conllevaran trayectos de más de 30 minutos.
- Distribución espacial: Es importante que las fuentes estén distanciadas entre sí. De no ser así, los resultados obtenidos serían más pobres al tratarse de un estudio de una determinada zona geográfica.
- Uso de las fuentes: Si el agua de las fuentes analizadas no es utilizada por el ser humano, es inútil analizar su radiactividad o cualquier otro parámetro relacionado con su aptitud para el consumo.

En este trabajo, el análisis de la concentración de radón en agua se ha dividido en varios subapartados. En primer lugar y representando el pilar fundamental sobre el que se han sustentado las bases de este trabajo, se ha tomado el mayor número de muestras en el área que abarca la Península del Morrazo (ver figura 3-5) acorde al tiempo y los medios disponibles, logrando recolectar más de 50 muestras para conocer el comportamiento de la concentración de radón en el agua de la zona. En concreto, estas muestras tienen su origen en los Ayuntamientos de Bueu, Marín y Moaña.

Además, se han analizado varias muestras procedentes de la Escuela Naval Militar de Marín, lugar donde el radón ha sido objeto de estudio en los últimos años por los elevados niveles observados. También se ha tratado de encontrar métodos viables para reducir el radón en el agua. Estos dos métodos se basaron en el tiempo transcurrido entre la toma de una muestra y su análisis y el tiempo de agitación de la muestra antes de su análisis.

A raíz de estudiar en qué medida afecta el tiempo transcurrido entre la recogida de la muestra y su análisis, se trató de hallar un coeficiente aproximado capaz de proporcionar un dato sobre la concentración de radón original en función de las horas que hayan pasado entre la toma de la muestra y el análisis de esta.



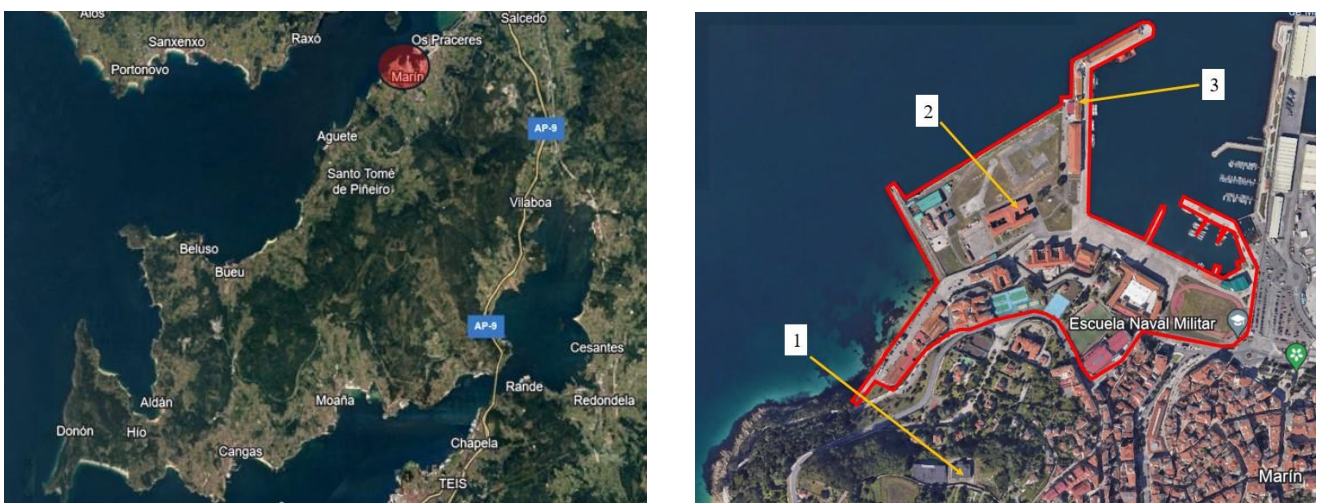
**Figura 3-4** Localización de la Península del Morrazo en Galicia y división en municipios

Con el fin de mantener la calidad en el orden y en la organización de los resultados obtenidos, se elaboró una hoja Excel para recoger los datos obtenidos en cada una de las muestras. En esta hoja Excel también se introdujeron los datos referentes a los experimentos de eliminación de radón en las muestras, acompañados de gráficos que muestran dichos datos de manera más visual.

### 3.2.1 Muestras en la Escuela Naval Militar

La Escuela Naval Militar está situada en el Ayuntamiento de Marín y desde hace varios años se han realizado múltiples análisis en diferentes trabajos de fin de grado por ser un lugar con gran potencial en cuanto a concentración de radón se refiere. Para continuar recabando información sobre este gas en la Escuela Naval Militar, se tomaron 3 muestras de agua en diferentes puntos de esta (ver figura 3-6).

Las muestras procedían del depósito que abastece a la propia Escuela (1), un grifo del cuartel de alumnos Almirante Francisco Moreno (2) y un grifo del edificio de investigación del Centro Universitario de la Defensa (3). Fueron tomadas el 27 de febrero, el 29 de febrero y el 5 de marzo respectivamente. El análisis de cada una de las muestras fue ejecutado el mismo día que se recogieron para evitar de esta manera que se desgasifique parte del radón.



**Figura 3-5** Izquierda: Situación de la Escuela Naval Militar en la península del Morrazo. Derecha: Lugares escogidos para la toma de muestras

### 3.2.2 Muestras en la Península del Morrazo

Para facilitar la localización de los distintos lavaderos y fuentes de Marín y Bueu se contó con mapas realizados por los ayuntamientos de estos municipios (ver figuras 3-7 y 3-8). Ambos mapas resultaron ser útiles y aceleraron el proceso de recolecta de agua.

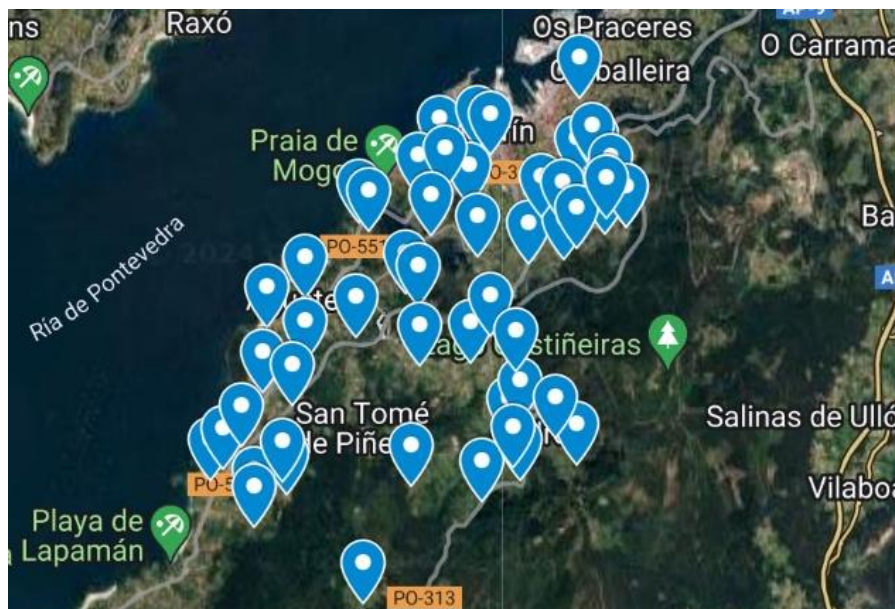


Figura 3-6 Mapa de fuentes y lavaderos en Marín [45]



Figura 3-7 Mapa de fuentes y lavaderos de Bueu [46]

El análisis de estas muestras se inició el 21 de febrero de 2024, analizándose la última de ellas el 18 de marzo de 2024. En este periodo de tiempo se lograron analizar un total de 52 muestras, de las cuales 21 tenían su origen en Marín, 10 procedían de Bueu y 20 se obtuvieron en Moaña.

Además, se tomaron hasta un total de 22 muestras de “Fonte de Moreira” en Marín. De estas 22 muestras, 9 de ellas se analizaron a lo largo de dos días en intervalos de 6 horas. El fin de esto fue hallar un resultado de concentración de radón cada 6 horas en un periodo de 48 horas. Exceptuando la muestra

que se analizó justamente tras ser recogida, el resto se dejó en recipientes abiertos (ver figura 3-9) para permitir que el radón pudiese desgasificarse y salir del recipiente hasta que llegase el momento del análisis de cada muestra. Este experimento se repitió con otras 9 muestras, con la única diferencia de que en esta ocasión los recipientes permanecieron cerrados hasta su análisis.



**Figura 3-8 Recipientes de agua número 2, 3, 4 y 5 abiertos procedentes de Fuente Moreira con sus horas de análisis anotadas – Elaboración propia**

Las 4 muestras restantes se analizaron con el fin de realizar distintos periodos de tiempo de agitación. Se agitaron un total de 3 muestras, analizando la primera de todas sin agitación previa, para establecer la concentración de radón de la que se partía. Una de ellas se agitó durante 5 minutos, la siguiente durante 10 y la última durante 15 minutos.

Estas agitaciones consistían en remover el agua de la muestra con la botella cerrada durante un periodo de tiempo de aproximadamente 2 minutos, trasvasar el agua a otro recipiente que se dejaba abierto durante 30 segundos para facilitar la salida de radón, cerrarlo y repetir el proceso. El proceso se repetía tantas veces como el tiempo total de cada agitación lo permitiese.

El objeto de estos análisis fue comprobar la medida en la que influyen el paso del tiempo y la agitación a la disminución de la concentración de gas radón en agua.

Además, de algunas fuentes se cogieron dos muestras y se analizó una por la mañana (tras haberla tomado) y otra por la tarde (pasadas unas horas de su recogida). Esto se materializó con el fin de respaldar con un mayor número de fuentes el hecho de que nivel de radón disminuye a lo largo del tiempo.

### 3.3 Metodología en las mediciones

Las muestras extraídas eran tomadas en botellas de al menos 500 ml, ya que esta era la cantidad elegida para hacer el equilibrio entre volumen de agua y de aire. Con un volumen de agua de 500 ml, un volumen de aire de 450 ml y un intervalo de monitoreo de 5 minutos se tiene que el límite de detección con un intervalo de confianza  $2\sigma$  es de 0,150 Bq/L aproximadamente.

En los recipientes donde quedaban recogidas las muestras de 0,5 litros se anotaba la hora y el lugar de recogida de estas. Posteriormente, eran transportadas al Laboratorio de Investigación del Centro Universitario de la Defensa, donde se encontraba el RTM 1688-2 de la marca SARAD para realizar los análisis pertinentes. Con este instrumento cabe la posibilidad de analizar las muestras in situ, pero se consideró más cómodo y viable para este trabajo analizarlas en el laboratorio. En un mismo día se analizaban desde una única muestra hasta siete.

No se consideró conveniente recoger más muestras en un mismo día ya que el paso de las horas implicaba un descenso notable en la concentración de las muestras analizadas. El proceso que se siguió una vez se tenían las muestras en el laboratorio fue el siguiente:

En primer lugar, se realizaba el montaje necesario para medir la concentración de radón en la muestra de agua tal y como se muestra en la imagen (ver figura 3-10) y se pulsaba el botón “TOGGLE” para comenzar a medir.



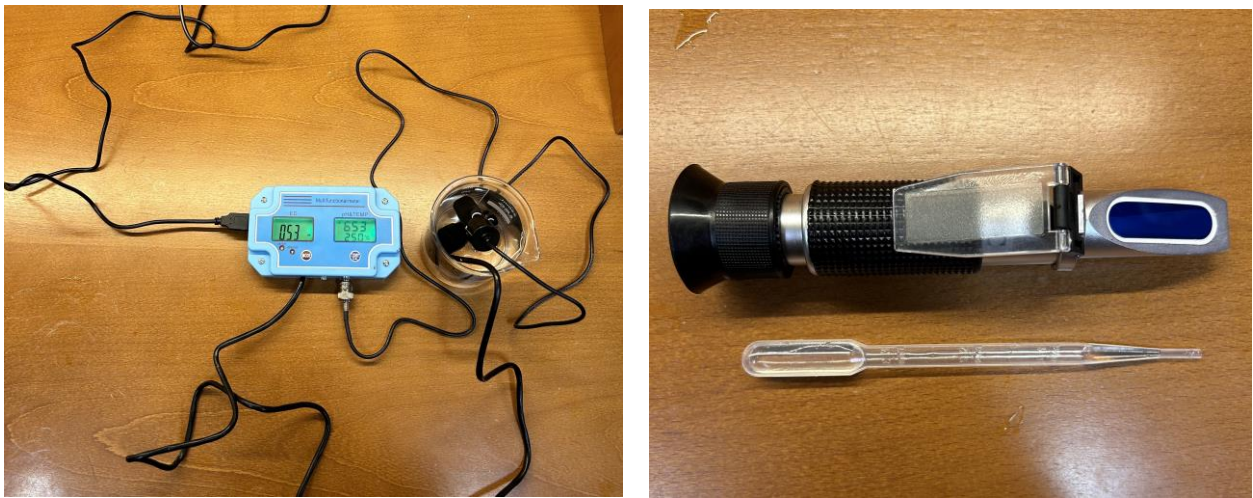
**Figura 3-9 Monitor midiendo radón de la muestra de agua – Elaboración propia**

A continuación, se esperaba el tiempo necesario para que el monitor ofrezca resultados precisos. Según el documento específico sobre la utilización del RTM 1688-2, es recomendable aguardar un tiempo de 30 minutos para obtener resultados óptimos. En concreto, se pulsa “TOGGLE” una vez para comenzar a medir, se espera durante 25 minutos (5 intervalos de 5 minutos cada uno) y se apaga el monitor pulsando “TOGGLE” durante 4 segundos. Finalmente, se vuelve a encender el monitor y se espera a que muestre la primera medición a los cinco minutos. Será esta última la que se escogerá como resultado de la medición. Se puede acceder a las distintas opciones de resultados como se muestra en la figura 3-3.

Posteriormente se analizaron parámetros como el pH y la conductividad mediante un detector de agua multiparámetro de la marca Irfora. Este instrumento, proporciona también datos sobre la temperatura del agua. No obstante, los datos de temperatura se extrajeron del RTM 1688-2 ya que reflejan una mayor precisión. Para completar el análisis de las muestras se utilizó un refractómetro portátil para medir la salinidad del agua.

Por último, se analizaron más de 15 parámetros químicos a través de bandas colorimétricas que funcionan mediante reacciones químicas específicas que producen un cambio de color observable a simple vista o con la ayuda de un lector de bandas, que en este caso se encontraba en la propia bolsa. El principio de funcionamiento de las bandas colorimétricas se basa en la interacción entre la muestra líquida y una sustancia química impregnada en la banda. Cuando la muestra entra en contacto con la banda, ocurre una reacción química que resulta en un cambio de color. Este cambio de color está relacionado con la concentración del parámetro químico que se está midiendo.

Cabe destacar que la precisión de las bandas colorimétricas es limitada. Estas bandas proporcionan mediciones semicuantitativas, lo que significa que dan una indicación aproximada de la concentración del parámetro químico en la muestra en lugar de una medición precisa.



**Figura 3-10 Izquierda: Detector multiparámetro de la marca Irfora. Derecha: Refractómetro portátil**

En el caso del detector multiparámetro (ver imagen izquierda de la figura 3-11), cuenta con una entrada USB, que está directamente conectada a la red eléctrica. Cuenta con dos sondas conectadas con el instrumento que han de ser introducidas en agua para proporcionar medidas. El instrumento cuenta con dos pantallas. En la de la izquierda se muestra la conductividad medida en mS/cm o  $\mu\text{S/cm}$  según en que unidades se desee medir (en este caso  $\mu\text{S/cm}$ ). En la pantalla de la derecha se muestra una medida correspondiente al pH en la parte superior y una medida de la temperatura justamente debajo.

Para utilizar el refractómetro portátil para medir la salinidad (ver imagen derecha de la figura 3-11) se ha de añadir una pequeña cantidad de agua con la probeta mostrada en la imagen sobre la zona azul zafiro. Posteriormente, se observa a través de la mirilla el porcentaje de salinidad.

El análisis se daba por finalizado una vez se introducían unas bandas colorimétricas en el recipiente que contiene la muestra.



**Figura 3-11 Izquierda: Leyenda de las bandas colorimétricas en la bolsa. Derecha: Banda colorimétrica tras permanecer 30 segundos en una muestra de agua**

Para medir los parámetros químicos con una banda colorimétrica (ver figura 3-12) se ha de depositar esta durante un periodo de tiempo de al menos 30 segundos. A continuación, se extrae esta y se observan los resultados de manera visual. Estas bandas ofrecen niveles aproximados sobre los siguientes parámetros además de los intervalos que abarca para cada uno de ellos. Los valores paramétricos han sido extraídos directamente del el Real Decreto 3/2023 de 10 de enero explicado en el apartado 2.1.3, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.

<b>PARÁMETRO QUÍMICO</b>	<b>RANGO BANDA COLORIMÉTRICA [MG/L]</b>	<b>VALOR PARAMÉTRICO [MG/L]</b>
<b>ALCALINIDAD TOTAL</b>	40-120	0,2
<b>PH</b>	6,8-8,4	6,5-9
<b>CARBONATO</b>	40-120	0,05
<b>DUREZA</b>	0-100	0,5
<b>ÁCIDO CIANÚRICO</b>	0-50	0,05
<b>COLORO TOTAL</b>	0-1	0,2
<b>COLORO LIBRE</b>	0-0,5	0,1
<b>BROMO LIBRE</b>	0	0,001
<b>NITRATO</b>	0-10	50
<b>NITRITO</b>	0-10	0,5
<b>HIERRO</b>	0-0,3	0,2
<b>CROMO</b>	0-2	0,025
<b>PLOMO</b>	0-15	0,005
<b>COBRE</b>	0-1	2
<b>MERCURIO</b>	0-0,002	0,001
<b>FLUORURO</b>	0-4	1,5

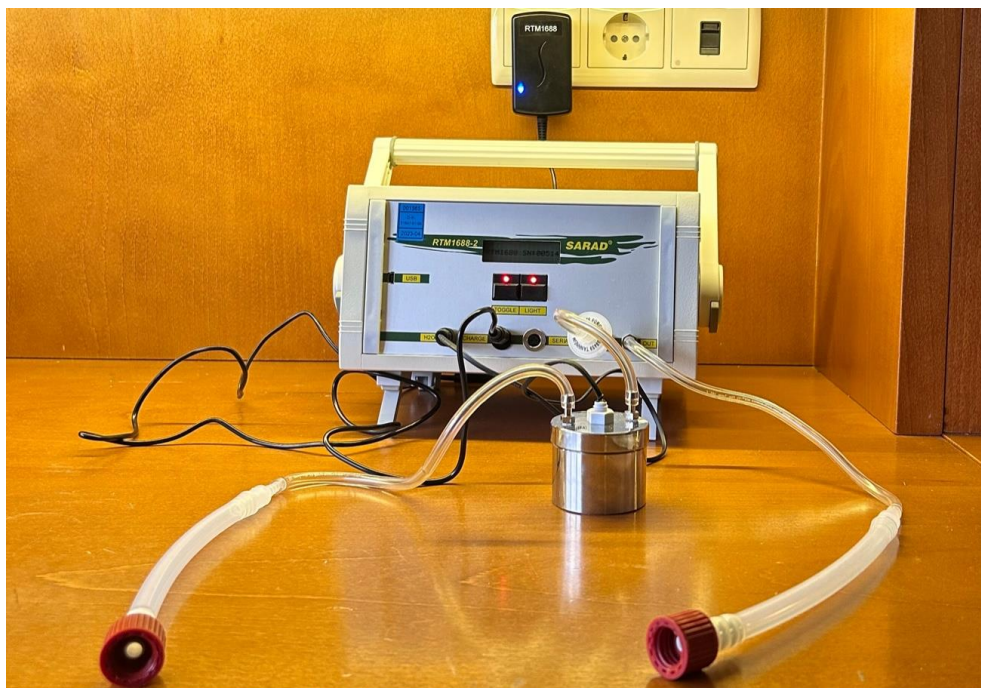
**Tabla 3-1 Parámetros químicos de las bandas colorimétricas**

Una vez retirada la banda colorimétrica se comenzaba con el proceso de registro de resultados que consistía en introducir en una hoja Excel el valor de la concentración de radón, la concentración de torón y de la temperatura mostrados por el RTM 1688-2.

A continuación, se anotaban los resultados de pH y conductividad mostrados por el detector multiparámetro tras introducir las sondas en el recipiente que contiene el agua de la muestra.

Posteriormente, se registraban los resultados de salinidad proporcionados por el refractómetro. Para ello, se depositaban varias gotas en el instrumento con la pipeta. Para finalizar, se tomaba una imagen de la banda colorimétrica que había sido introducida en agua durante 30 segundos.

Es importante recalcar que, entre la finalización del análisis de una muestra y el comienzo del análisis de la siguiente, se ha de dejar transcurrir un periodo de tiempo de al menos 15 minutos con el RTM 1688-2 en marcha para que los niveles de concentración de radón previos al comienzo de una medición sean los ambientales o cercanos a estos, tal y como se muestra en la imagen (ver figura 3-13).



**Figura 3-12 Monitor midiendo concentración de radón en aire**

Es decir, si al finalizar un análisis se inicia el siguiente de otra muestra justamente después, los datos de concentración proporcionados serán muy superiores al valor real. Esto se debe a que el volumen de aire en el circuito cerrado del montaje al analizar las muestras de agua es bastante reducido. Cuando el aparato extrae el radón contenido en el agua a través del burbujeo de desgasificación, la cantidad de radón contenido en la muestra de agua se transfiere a un volumen de aire acotado.

El resultado de este proceso es que el aparato mide cantidades de radón elevadas (al menos en comparación con las cantidades que suele medir en aire) y requiere entre 15 y 30 minutos para que el radón residual sea expulsado de la cámara de ionización y se comience a medir la siguiente muestra con niveles cercanos a los ambientales.

Cuanto más radón haya en una muestra, más tiempo de espera será necesario para comenzar a analizar la siguiente. La espera se hará con el aparato en marcha para facilitar la expulsión del radón de la muestra y para comprobar que se está produciendo una disminución progresiva. Por normal general, el tiempo de espera se daba por concluido cuando la concentración medida en aire era inferior a los 2000 Bq/m<sup>3</sup>.

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos en el análisis de las muestras y se establecerán las posibles relaciones entre los parámetros medidos y la concentración de radón. Se comentará y se comparará la magnitud de los resultados obtenidos con los límites establecidos por las leyes nacionales y en concreto por el Real Decreto de 10 de enero por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.

También se comentará la efectividad de los posibles métodos que se pueden utilizar para minimizar la concentración de radón en las aguas de consumo que exceden los niveles establecidos por la ley como límite.

### 4.1 Muestras en la Escuela Naval Militar

Las muestras analizadas en la Escuela Naval Militar se corresponden con las representadas en el mapa de la parte de la derecha de la figura 3-2 del apartado anterior. El número 1 de dicha figura se corresponde con el depósito de abastecimiento de la Escuela Naval Militar, el número 2 con el grifo del cuartel de alumnos Francisco Moreno y el número 3 con el grifo del laboratorio de investigación del Centro Universitario de la Defensa.

Estas tres muestras se tomaron el 5 de marzo, el 29 de febrero y el 27 de febrero respectivamente y fueron analizadas el mismo día de ser recogidas. En la muestra captada del depósito de abastecimiento se obtuvo una concentración de radón de 3,1 Bq/L y las muestras de los grifos se situaban entre 1 y 2 Bq/L (ver figura 4-1).



**Figura 4-1 Resultados en la Escuela Naval Militar**

A pesar de la preocupación generada en los últimos años en el personal que reside y trabaja en la Escuela Naval Militar a raíz de los elevados valores de concentración en aire obtenidos, la concentración de este gas en agua mostró valores muy bajos. No obstante, el valor de concentración de radón en el depósito de abastecimiento fue aproximadamente el doble que los otros dos valores registrados. Esto se debe a que probablemente el agua pierda cierta cantidad de radón en el transcurso desde el depósito a la ENM.

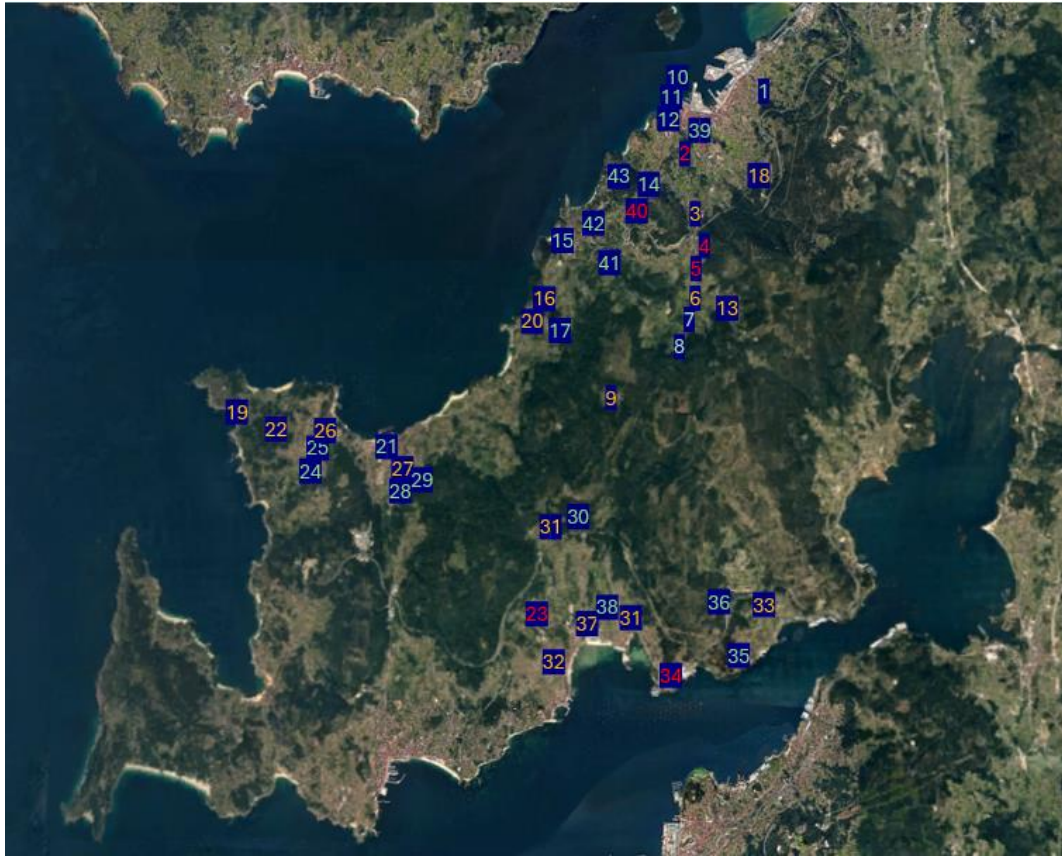
Estos valores la hacen apta para el consumo en cuanto a radiactividad y a partir de los resultados obtenidos se puede descartar la posibilidad de que exista radón en el agua de consumo de la Escuela Naval Militar.

Los niveles de pH en estas muestras fueron básicos en comparación con el resto de las muestras recogidas. Los niveles de conductividad en las muestras de la ENM también fueron bajos, las muestras reflejaron conductividades que oscilaban entre los 40 y los 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Por último, los resultados obtenidos a partir de las bandas colorimétricas se encontraban por debajo del valor paramétrico, siendo la presencia de gran parte de los parámetros prácticamente nula en el agua de estas muestras.

## 4.2 Resultado de las muestras analizadas en la Península del Morrazo

A continuación, se muestra un mapa con el origen y el nivel de concentración de radón de 43 lugares distintos en la Península del Morrazo entre los que hay manantiales, aguas de abastecimiento y pozos y (ver figura 4-2).



**Figura 4-2** Mapa de las muestras analizadas en la Península del Morrazo

Para proporcionar más información sobre la concentración medida en cada una de las muestras analizadas, se ha realizado una tabla con las concentraciones de radón en cada una de ellas (tabla 4-1). Las muestras que se tomaron en más de una ocasión se muestran una sola vez en la tabla, habiendo escogido el valor más elevado de todos los obtenidos.

**Tabla 4-1** Concentración de radón en las muestras de la Península del Morrazo

Nº de muestra	Nombre	Tipo de muestra	Ayuntamiento	Concentración [Bq/L]	Error [%]
# 1	Fuente Pedreiras	Manantial	Marín	42,3	4
# 2	Lavadero Moreiras	Manantial	Marín	321,1	1
# 3	Fuente Pardavila	Manantial	Marín	135,1	2
# 4	Fuente Casal	Manantial	Marín	368,8	1
# 5	Fuente Pozo	Manantial	Marín	401,9	1
# 6	Lavadero Esperela	Manantial	Marín	117,8	2
# 7	Fuente Troncosa	Manantial	Marín	2,4	19
# 8	Lavadero Preguntas	Manantial	Marín	43,9	5

# 9	Fuente Pastoriza	Manantial	Marín	127,6	2
# 10	Grifo laboratorio investigación	Suministro	Marín	1,9	20
# 11	Grifo del cuartel alumnos Depósito	Suministro	Marín	1,2	15
# 12	abastecimiento ENM	Abastecimiento	Marín	3,1	20
# 13	Fuente Pereira	Manantial	Marín	121,2	3
# 14	Fuente Parque Porteliña	Manantial	Marín	2,3	15
# 15	Lavadero Loira	Manantial	Marín	0,4	23
# 16	Fuente Cruxeiras	Manantial	Marín	229,7	1
# 17	Lavadero Picotes	Manantial	Marín	94,3	2
# 18	Fuente Roza (Marín)	Manantial	Marín	284,1	1
# 19	Fuente Ancaradouro	Manantial	Bueu	155,5	2
# 20	Fuente Gándaras	Manantial	Bueu	132,5	2
# 21	Fuente Galos	Manantial	Bueu	68,1	3
# 22	Fuente Montemogos	Manantial	Bueu	163,3	2
# 23	Fuente Caballo	Manantial	Moaña	354,3	1
# 24	Fuente Roza (Bueu)	Manantial	Bueu	51,9	4
# 25	Fuente Parque Beluso	Manantial	Bueu	15,6	7
# 26	Lavadero Achadiza	Manantial	Bueu	205,5	2
# 27	Lavadero Civida	Manantial	Bueu	112,3	2
# 28	Lavadero Outeiro	Manantial	Bueu	19,3	6
# 29	Pozo Barrena	Manantial	Bueu	88,6	3
# 30	Fuente Xastre	Manantial	Moaña	250,5	2
# 31	Fuente Pastoriza	Manantial	Moaña	127,6	2

# 32	Fuente Martinga	Manantial	Moaña	147,4	2
# 33	Fuente Queixeiría	Manantial	Moaña	129,5	2
# 34	Fuente Cerval	Manantial	Moaña	453,8	1
# 35	Fuente Fontán	Manantial	Moaña	210,0	4
# 36	Depósito abastecimiento Palmás-Domaio	Abastecimiento	Moaña	91,7	5
# 37	Fuente Reibón	Manantial	Moaña	199,7	2
# 38	Pozo Meira	Manantial	Moaña	32,7	5
# 39	Fuente Finca Briz	Manantial	Marín	65,1	4
# 40	Fuente Castiñeiro	Manantial	Marín	526,4	1
# 41	Lavadero Españeiro	Manantial	Marín	8,5	10
# 42	Fuente Aguete	Manantial	Marín	91,9	3
# 43	Fuente Bagüín	Manantial	Marín	34,9	5

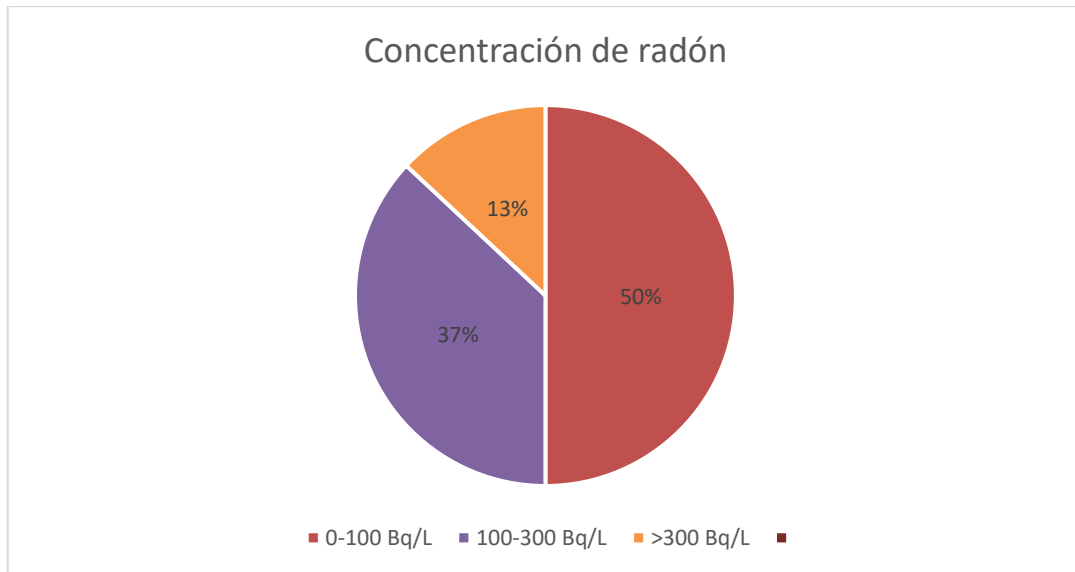
Aunque el número total de muestras recolectadas es 52, en el mapa se muestran menos muestras (43) ya que de algunas de las fuentes se tomaron dos o más muestras. El mapa muestra el origen de las fuentes con un número situado sobre esta. Adicionalmente, el número aparece de un color u otro dependiendo del nivel en la concentración de radón de la muestra.

La leyenda que se ha seguido en función de la concentración de radón es la siguiente:

- Color verde: Concentración inferior a 100 Bq/L
- Color naranja: Concentración entre 100 Bq/m<sup>3</sup> y 300 Bq/L
- Color rojo: Concentración superior a 300 Bq/L

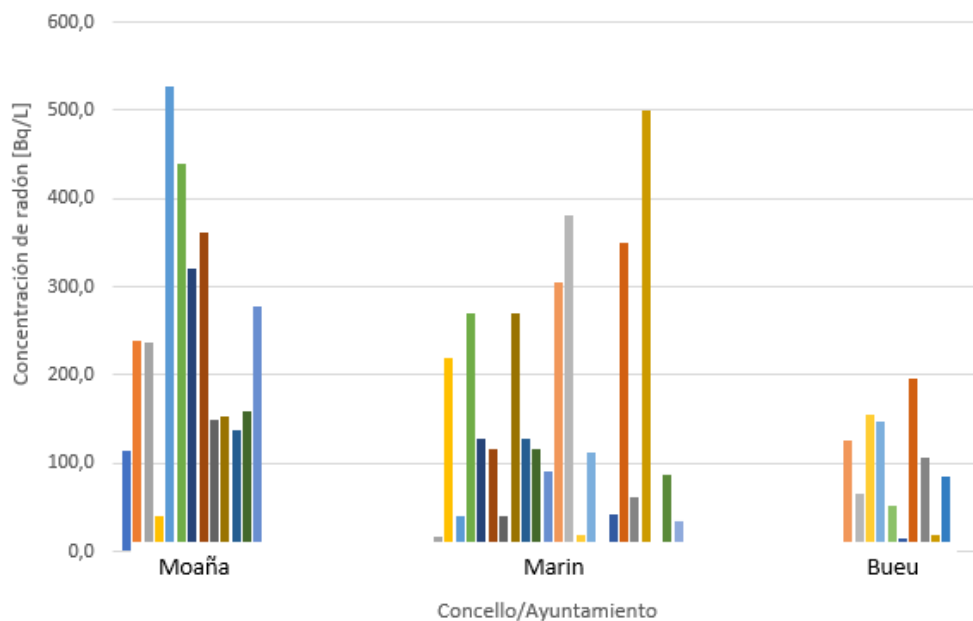
La normativa nacional actual obliga a tomar acciones correctoras a partir de los 1000 Bq/L y recomienda tomar medidas cuando la concentración supere los 100 Bq/L y sea inferior a 500 Bq/L. Sin embargo, en este trabajo se han considerado las muestras con concentraciones inferiores a 100 Bq/L como de riesgo bajo, entre 100 y 300 Bq/L como riesgo medio y las superiores a 300 Bq/L como riesgo alto.

Como se puede apreciar en la figura 4-1 y en la tabla 4-1 los niveles de radón en la Península del Morrazo oscilan entre valores muy cercanos a 0 y los 526,4 Bq/L. Todos estos valores entran dentro del rango aceptado por la normativa, que establece el límite en 1000 Bq/L. Entre todas las fuentes que se muestran en el mapa de la figura, un total de 20 muestras resultaron tener niveles en concentración de radón inferiores a 100 Bq/L, representando un 46,5% del total. Otras 17 muestras reflejaron concentraciones que se encontraban entre 100 y 300 Bq/L, simbolizando un 39,5%. Las muestras que superaron los 300 Bq/L fueron 6, es decir, un 14% (ver figura 4-3).



**Figura 4-3 Distribución de muestras en función de la concentración de radón**

A continuación, se muestra un gráfico (figura 4-4) donde se pueden visualizar las muestras analizadas agrupadas según el municipio donde hayan sido tomadas:

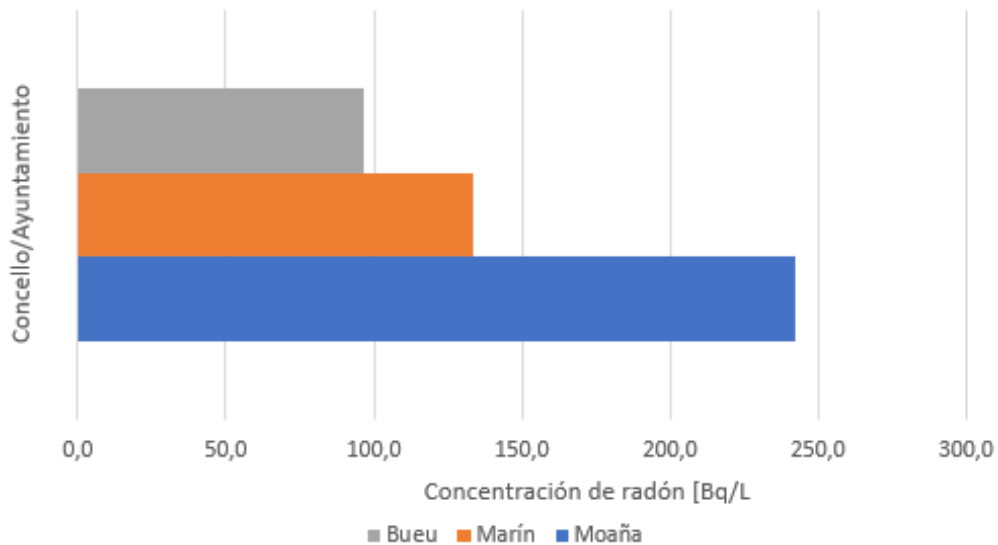


**Figura 4-4 Concentración de radón de las muestras según el municipio**

Este estudio estadístico presenta una fiabilidad limitada ya que el número de muestras tomadas en cada uno de los municipios difiere (13 en Moaña, 23 en Marín y 10 en Bueu). Las muestras procedentes de aguas de abastecimiento o aguas de suministro no han sido contempladas para este sondeo. Es decir, solo se tuvieron en cuenta las muestras recolectadas en pozos o manantiales.

Se puede comprobar en el gráfico que las muestras analizadas en Moaña presentan niveles de concentración más elevados que en los otros municipios. En Marín se observan desde valores muy bajos, cercanos a 0 Bq/L hasta 500 Bq/L. Sin embargo, en Bueu se observa que un 50% de las muestras está por debajo de los 100 Bq/L y el otro 50% no supera los 200 Bq/L.

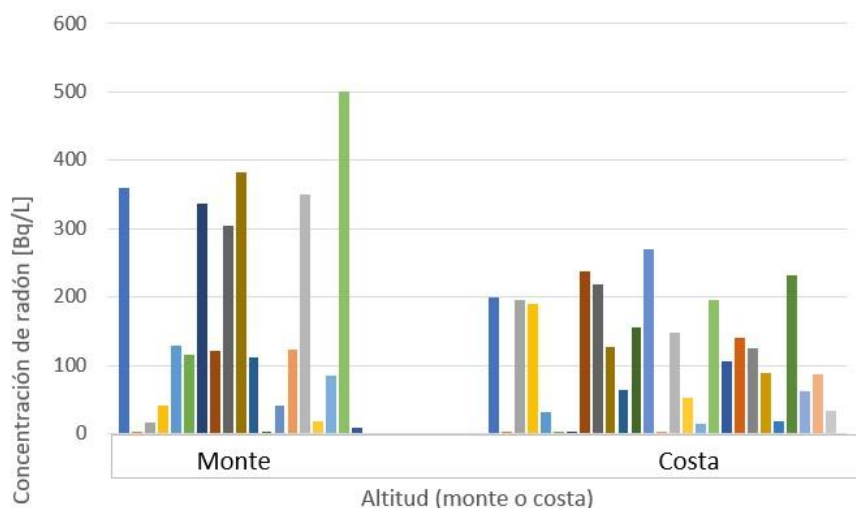
Para analizar estos datos de manera más visual, se muestra a continuación un gráfico (figura 4-5) donde se puede ver el valor medio de concentración de radón en cada uno de los municipios:



**Figura 4-5 Concentración media de radón de las muestras según el municipio**

El valor medio de concentración de radón en agua en Moaña supera los 240 Bq/L y es prácticamente el doble que el valor medio obtenido en Marín. El valor medio de las muestras procedentes de manantiales y pozos del municipio de Bueu se sitúa por debajo de los 100 Bq/L. Con las limitaciones mencionadas anteriormente, se puede afirmar que las concentraciones de las muestras tomadas en Moaña tienen valores más elevados que las muestras extraídas en Marín y en Bueu.

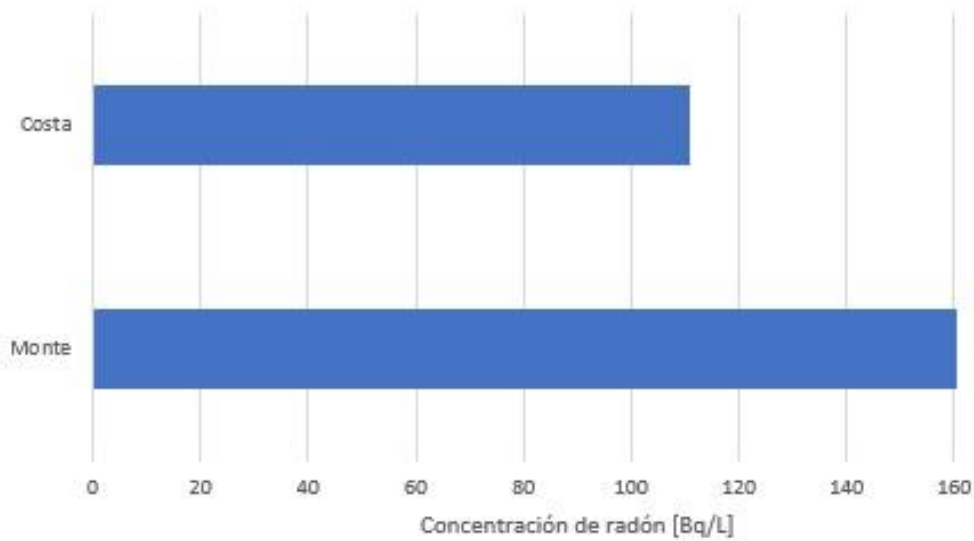
Para profundizar algo más en las muestras analizadas, se muestra a continuación una nueva clasificación en función de la altitud a la que se tomaron las muestras (figura 4-6), diferenciando entre los manantiales situados próximos a la “costa” y los que se encuentran en el “monte”. Para simplificar este análisis en función de la altura sobre el nivel del mar, se han considerado muestras de la “costa” aquellas que se encontraban entre 0 y 60 metros de altura sobre el nivel del mar y como muestras procedentes del “monte” a aquellas que superaban los 60 metros sobre el nivel del mar.



**Figura 4-6 Concentración de radón de las muestras según su altura sobre el nivel del mar**

La gráfica demuestra como las concentraciones de radón de las muestras tomadas en el “monte” son superiores a aquellas que se recogieron en las proximidades de la “costa”. Hasta 6 muestras tomadas en el “monte” superan los 300 Bq/L, mientras que ninguna muestra supera este valor en la “costa”. A

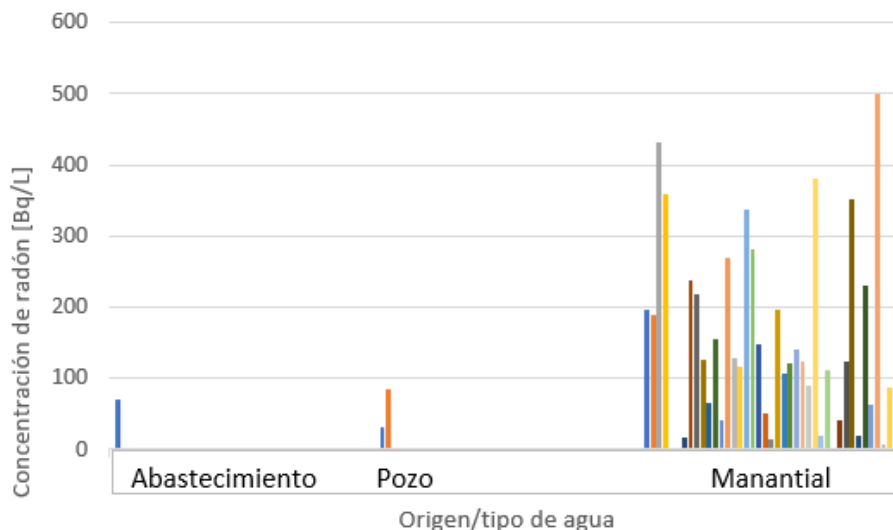
continuación, se muestra un gráfico (figura 4-7) con el valor medio de concentración en el “monte” y en la “costa” para contemplar la diferencia con mayor facilidad:



**Figura 4-7 Concentración media de radón de las muestras según su altura sobre el nivel del mar**

Observando el gráfico de la figura 4-7, que resume y generaliza los datos observados en la figura 4-6, se puede afirmar que, la concentración de radón media de las muestras recogidas a más de 60 metros de altura sobre el nivel del mar, es superior a la concentración de radón media de las muestras recogidas entre los 0 y los 60 metros sobre el nivel del mar. La concentración de radón media en el “monte” fue de 160 Bq/L mientras que la de la “costa” fue de 110 Bq/L.

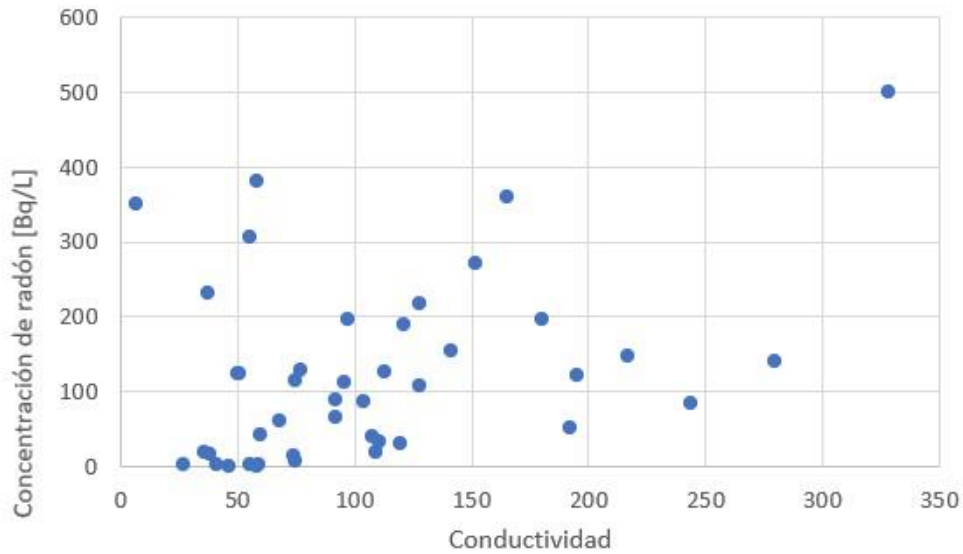
Para finalizar con el análisis de las muestras tomadas en la Península del Morrazo, se ha realizado una clasificación en función el tipo de agua de consumo, es decir, según el origen (manantial, pozo o abastecimiento). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4-8.



**Figura 4-8 Concentración de radón de las muestras según su origen**

La diferencia del número de muestras tomadas de manantiales frente a las recolectadas en pozos y zonas de abastecimiento es considerable. La gran mayoría de muestras se recolectaron en manantiales mientras que en pozos solo se recogieron 2 y en depósitos de abastecimiento 4. Esto hace que el análisis

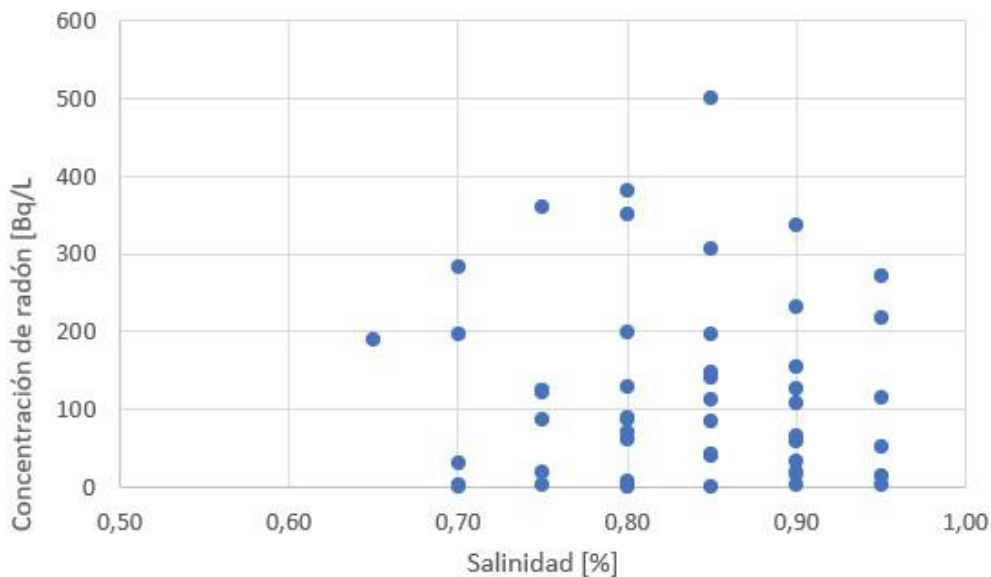




**Figura 4-10 Gráfico  $C_{Radón}$  – Conductividad**

En el eje de ordenadas se representa la concentración de radón en Bq/L y en el eje de abcisas queda representada la conductividad en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se puede apreciar un incremento en la concentración de radón a medida que aumenta la conductividad. Por ejemplo, los valores de concentración inferiores a los 100 Bq/L se asocian a valores de conductividad que oscilan en torno a los 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las muestras que presentan mayores valores en cuanto concentración de radón poseen conductividades que se sitúan entre los 100 y los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El siguiente parámetro analizado fue la salinidad. Este parámetro no mostró ningún tipo de relación con la cantidad de radón en cada una de las muestras. El refractómetro utilizado proporcionó valores de salinidad que se situaban entre el 0,6% y el 1%. Las conclusiones extraídas a partir de los experimentos de salinidad son que la salinidad no tiene incidencia directa en la concentración de radón (ver figura 4-6).



**Figura 4-11  $C_{Radón}$  - Salinidad**

En la gráfica se muestra la concentración de radón en Bq/L en el eje de abcisas y la salinidad en porcentaje en el eje de ordenadas. Como se ha mencionado anteriormente, no se aprecian resultados de

los que se puedan extraer conclusiones claras en cuanto a la dependencia entre la salinidad y la concentración de radón.

Finalmente, se analizaron los parámetros químicos dispuestos en las bandas colorimétricas. De la misma manera que sucedió con la salinidad, las bandas colorimétricas no permitieron discernir las diferencias entre las distintas muestras debido a sus propiedades y mecanismo de funcionamiento explicados en el apartado 3.3. La proximidad entre los valores de los parámetros químicos de las muestras imposibilitó la detección de diferencias entre los colores reflejados por las bandas colorimétricas.

En un principio, se realizaron fotografías de las bandas colorimétricas de todas las muestras con el fin de hallar algún tipo de correlación entre alguno de los parámetros químicos y la concentración. Se ha decidido no incluir los resultados referentes a los parámetros químicos ya que las bandas colorimétricas no resultaron ser lo suficientemente precisas como para obtener resultados válidos.

### **4.3 Análisis de los métodos utilizados para disminuir la concentración de radón**

En este apartado, se discutirá la efectividad de los distintos métodos utilizados para prevenir y disminuir los elevados niveles de concentración de radón que se puedan hallar en determinadas aguas de consumo. Antes de comenzar el análisis de estos métodos, fue necesario localizar una fuente o lavadero que tuviese altas concentraciones de radón, además de ser accesible.

Para poder realizar este estudio, se analizó en primer lugar el agua de las fuentes más próximas a la Escuela Naval Militar. De entre todas ellas, se escogió una que cumpliera con los requisitos previamente mencionados. Estos son, proximidad, accesibilidad y una concentración de radón lo suficientemente alta como para analizar su decrecimiento. El lavadero escogido fue el “Lavadero Moreiras” (número 2 en el mapa de la figura 4-2), ya que fue el único de entre los más próximos donde se obtuvo una concentración de radón superior a los 300 Bq/L.

#### *4.3.1 Transcurso del tiempo*

Para analizar cómo afectó el tiempo en la concentración de las muestras, se tomaron 9 muestras del “Lavadero Moreiras” durante la tarde del día 11 de marzo de 2024 y otras 9 muestras la tarde del 13 de marzo de 2024. Tras ser recogidas, las muestras fueron llevadas a la Escuela Naval Militar para proceder con los análisis. La primera muestra se analizó a la mayor brevedad posible para referenciar la concentración de la que se partía. A partir de aquí, se analizó una muestra cada 6 horas hasta llegar a 48 horas.

Este experimento se hizo en dos ocasiones. En el primero de ellos, los recipientes reposaron abiertos hasta ser analizados (ver figura 4-7) y en el segundo, los recipientes se encontraban cerrados hasta llegado el momento de su análisis (ver figura 4-8). Adicionalmente, se muestra un gráfico con ambos experimentos para poder compararlos (ver figura 4-9).

Experimento con recipiente abierto

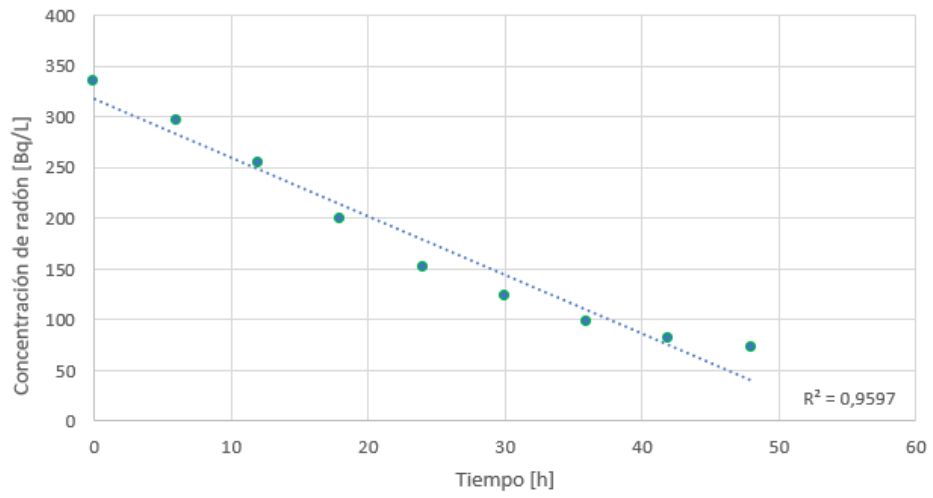


Figura 4-12 Experimento con recipiente abierto

Experimento recipiente cerrado

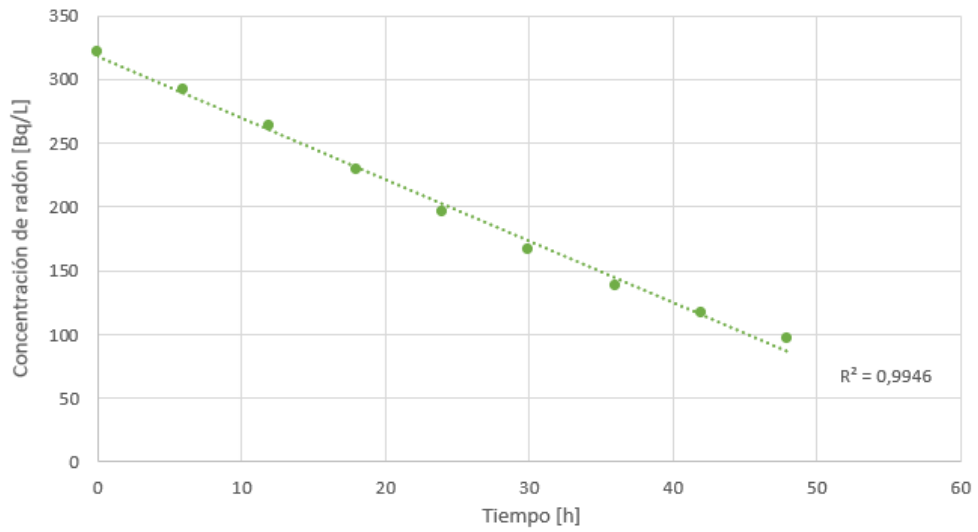
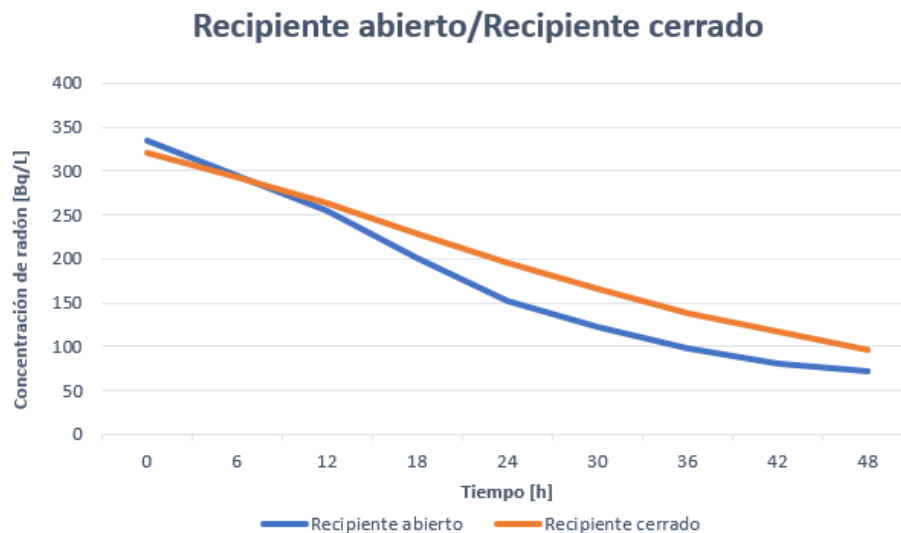


Figura 4-13 Experimento con recipiente cerrado



**Figura 4-14 Comparativa entre experimento con los recipientes de las muestras cerrados y abiertos**

Tras observar el comportamiento de la concentración de radón a lo largo del tiempo en las figuras anteriores, se puede afirmar que la concentración de radón a lo largo del tiempo en ambos experimentos se aproxima a un decrecimiento lineal. El coeficiente de regresión lineal se aproxima a 1 en ambos casos, siendo 0,9597 para el recipiente abierto y 0,9946 para el recipiente cerrado.

El experimento con los recipientes abiertos reflejó una disminución de concentración de radón aproximada de un 2% por hora durante las primeras 24 horas. En las segundas 24 horas, el decremento fue aproximadamente de un 1,5% por hora. En el caso del experimento de los recipientes cerrados la disminución fue aproximadamente de un 1,5 % por hora durante las 48 horas.

Al observar la gráfica del recipiente abierto, se aprecia cómo transcurridas 12 horas la concentración se ha reducido un 24,2% con respecto a la inicial y pasado un día la concentración es de 151,4 Bq/L, es decir, una reducción del 54,8% con respecto a la concentración inicial.

En el experimento del recipiente cerrado se aprecia como se reduce de manera similar al anterior. No obstante, la tasa de decrecimiento es ligeramente menor cuando el recipiente se encuentra cerrado. Transcurridas 12 horas, se redujo la concentración un 17,9% y tras 24 horas bajó un 39,0% con respecto a la concentración inicial.

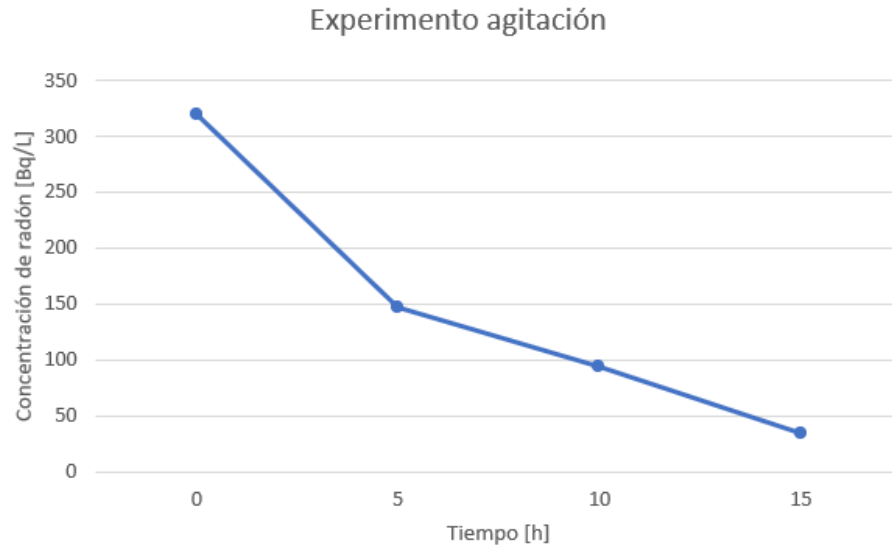
A partir del experimento con los recipientes cerrados, se ha hallado una ecuación a través de la cual se puede saber la concentración original de radón aproximada si se conoce la concentración de radón en un determinado momento y el tiempo transcurrido entre la toma de una muestra y su análisis:

$$C_{original} = \frac{C_{medida}}{0,9855^n}$$

Donde  $C_{original}$  es la concentración original (la incógnita),  $C_{medida}$  es la concentración de radón proporcionada por el RTM 1688-2 y  $n$  es el tiempo transcurrido entre la toma de una muestra y su análisis en horas.

### 4.3.2 Agitación de las muestras

Para realizar este experimento, se tomaron 4 muestras del “Lavadero Moreiras” en Marín el día 12 de marzo de 2024. La primera muestra se analizó lo antes posible para comprobar la concentración de radón de la que se partía. Las otras 3 muestras fueron agitadas durante periodos de tiempo cada vez mayores. La primera se agitó durante 5 minutos, la segunda durante 10 y la última durante 15 tal y como se explica en el apartado 3.2.2. Los resultados obtenidos se muestran a continuación (ver figura 4-10).



**Figura 4-15 Experimento de agitación**

La concentración inicial sin agitación es de 319,7 Bq/L. Se aprecia en el gráfico como 5 minutos de agitación son suficientes para disminuir la concentración más de un 50% con respecto a la concentración inicial. Con 10 minutos, la concentración es inferior a los 100 Bq/L y tras 15 minutos de agitación, la concentración era de 34,8 Bq/L. Por lo tanto, es un método adecuado para reducir la concentración de radón en agua.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

A continuación, se expondrán las conclusiones extraídas a raíz de los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo, especialmente en el apartado anterior:

- 1) Las muestras analizadas en los tres puntos de la Escuela Naval Militar reflejaron concentraciones cercanas a 0 Bq/L. Con estos resultados, se puede afirmar que la incidencia del radón en el agua de la Escuela Naval Militar es mínima. Como consecuencia, la normativa nacional referente a la concentración de radón en agua se cumple.
- 2) En un total de 24 fuentes, es decir, un 55,8 % del total, sería recomendable tomar medidas para mejorar la protección radiológica procedente del gas radón ya que la concentración se encuentra entre los 100 y los 500 Bq/L. De estas 24 muestras, todas proceden de manantiales y 12 tienen su origen en Moaña, 9 en Marín y 3 en Bueu. El resto de las fuentes presentaron niveles inferiores a los 100 Bq/L, por lo que se encuentran por debajo del límite recomendado por la ley.
- 3) Tal y como se podía presuponer antes de realizar este trabajo debido a los elevados niveles de concentración de radón en aire en Galicia por su suelo granítico, los resultados también son superiores a la media en España para la concentración en agua. Como consecuencia, sería preciso mejorar la protección radiológica frente al radón y concienciar a los habitantes de la Península del Morrazo.
- 4) En cuanto a la elaboración del mapa de la Península del Morrazo mostrado en la figura 4-2, se puede concluir que la concentración de radón en las muestras tomadas en Moaña era superior que los niveles de concentración obtenidos en Marín y Bueu. La causa más probable podría ser que Moaña se sitúa en la cara sur de la Península del Morrazo, mientras que Marín y Bueu se localizan en la cara norte. Es decir, los materiales de las rocas sobre los que se encuentran los manantiales en la cara sur de la Península del Morrazo son probablemente más ricos en uranio (y por lo tanto en radón) que los materiales que componen las rocas en la cara norte. Para obtener resultados que verifiquen si existe o no dependencia geográfica, sería conveniente realizar un estudio que contemple la altura sobre el nivel del mar de manera más precisa, tipo de material o roca sobre la que se encuentra el agua, además del origen y la distancia al mismo. También se detectaron relaciones entre la concentración de radón y el origen y la altura sobre el nivel del mar.

- 5) Se comprobó la correlación entre algunos de los parámetros analizados y la concentración de radón en el agua de las muestras. Tanto el pH como la conductividad mostraron tener relación con la cantidad de radón en las muestras. El pH y la concentración de radón tenían una relación lineal inversamente proporcional mientras que la conductividad y la concentración de radón mostraron una relación lineal directamente proporcional.
- 6) La salinidad no pareció tener correlación con el radón que contenían las muestras. Al tratarse de muestras de agua de consumo con características similares entre sí, el instrumento de medida difícilmente diferenciaba los valores de salinidad entre los que se estaba trabajando. En definitiva, en caso de existir algún tipo de correlación entre la concentración de radón y la salinidad, hubiese sido necesario un instrumento más preciso en este ámbito para lograr resultados más válidos.
- 7) Algo similar sucedió con los parámetros químicos de las bandas colorimétricas. La gran mayoría de muestras poseían valores muy similares en cuanto a alcalinidad, carbonato, dureza, ácido cianúrico, hierro, plomo, mercurio etc. lo que impedía clasificar las distintas muestras según estos parámetros.
- 8) A raíz de los resultados obtenidos en los experimentos destinados a disminuir la concentración de radón, se puede afirmar que, tanto el tiempo transcurrido entre la recogida de una muestra y su análisis como el tiempo de agitación son métodos eficaces para disminuir la cantidad de radón en las muestras.
- 9) Tras el experimento que estudió la disminución de radón en función del tiempo en recipientes cerrados, se logró hallar un coeficiente referido al decremento de radón por hora (reducción de 1,5% por hora aproximadamente). Es decir, se puede saber la concentración original de radón aproximada si se conoce la concentración de radón en un determinado momento y el tiempo transcurrido entre la toma de una muestra y su análisis a través de la ecuación:

$$C_{original} = \frac{C_{medida}}{0,9855^n}$$

Aunque esta ecuación se ha obtenido para una fuente en particular, se puede asumir que el comportamiento de reducción de radón es similar en otras fuentes y, por lo tanto, se puede utilizar la ecuación anterior para calcular la concentración en cualquier fuente de manera aproximada.

Las conclusiones expuestas se ven limitadas por el número de muestras analizadas (en la mayoría de las fuentes tan solo se tomó una muestra), así como por los instrumentos utilizados para medir algunos de los parámetros. Para confirmar estos resultados, sería necesario analizar un mayor número de muestras de cada fuente.

Por lo tanto, este Trabajo de Fin de Grado sirve para introducir la problemática del gas radón en agua, con el objetivo de generar conciencia y estimular su conocimiento en la sociedad en el ámbito del agua. Asimismo, sirve para tener una estimación aproximada de la concentración de radón en el agua de la Escuela Naval Militar y de la Península del Morrazo en general.

## 5.2 Líneas futuras

Este Trabajo de Fin de Grado sirve de motivación e impulsa las siguientes líneas de futuro:

- 1) Realizar un estudio más focalizado, analizando un mayor número de muestras en cada manantial, pozo o abastecimiento para comprobar posibles variaciones en función del tiempo por la meteorología u otros factores.
- 2) Propuesta de medidas que mejoren la protección radiológica frente al radón en aquellas fuentes que excedan los 100 Bq/L.
- 3) Análisis de aguas con elevados potenciales de concentración de radón (aguas de pozos, aguas termales o aguas de manantiales). Resultaría interesante tomar muestras de pozos privados de los que los habitantes en Galicia consumen agua.
- 4) Estudio de las posibles causas por las que hay tanta diferencia en la concentración de radón en las distintas fuentes.
- 5) Búsqueda de otros métodos para reducir la concentración de radón en agua, por ejemplo, el uso de filtros.
- 6) Si los próximos trabajos de este ámbito se realizan con el RTM 1688-2 o con otro instrumento que permita medir la concentración de radón en el suelo, sería interesante acompañar las medidas de concentración de radón en agua con medidas de concentración de radón del suelo que rodea las fuentes para hallar posibles correlaciones.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Ministerio de Sanidad - Áreas - Salud ambiental y laboral - Calidad de las aguas - Agua de consumo humano - Preguntas más frecuentes». Accedido: 23 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/saludAmbLaboral/calidadAguas/preguntasFrec.htm>
- [2] «Análisis de los riesgos derivados de la exposición de la población a las sustancias radiactivas en el agua de consumo humano».
- [3] «Tabla Periódica Interactiva de los Elementos». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fishersci.es/es/es/periodic-table.html>
- [4] «El radón y sus efectos en la salud». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- [5] CDCespanol, «Radón en la casa», Centers for Disease Control and Prevention. Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radon/index.html>
- [6] R. Barbosa-Lorenzo, A. Ruano-Ravina, S. Cerdeira Caramés, y J. M. Barros-Dios, «Radón residencial y cáncer de pulmón. Un estudio ecológico en Galicia», *Med. Clínica*, vol. 144, n.º 7, pp. 304-308, abr. 2015, doi: 10.1016/j.medcli.2013.11.034.
- [7] «Medición y remediación de gas radón en el agua | RADONSPAIN». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radonspain.com/radon-en-el-agua.htm>
- [8] M. Rey, «Comproba neste mapa os niveis de radon no teu concello», GCIencia. Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gciencia.com/saude/mapa-niveis-de-radon-galicia/>
- [9] «Trabajos Fin de Grado», Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/communities/aedd6382-f90b-4a69-a3a8-66d92a9e3d73>
- [10] «proyecto\_rd\_anejo\_iidbhs6.pdf». Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/proyecto\\_rd\\_anejo\\_iidbhs6.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/proyecto_rd_anejo_iidbhs6.pdf)
- [11] «Acueducto de Segovia: historia, descripción y construcción», Fundación Aquae. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/ciudad-vieja-y-acueducto-de-segovia/>
- [12] «Confederaciones Hidrográficas». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/funciones-estructura/organismos-publicos/confederaciones-hidrograficas.html>

- [13] «Planes hidrológicos de cuenca vigentes». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca.html>
- [14] «Plan Hidrológico Nacional». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/plan\\_hidrologico\\_nacional.html](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/plan_hidrologico_nacional.html)
- [15] «Directiva - 80/778 - ES - EUR-Lex». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A31980L0778>
- [16] «EUR-Lex - 01998L0083-19981225 - ES - EUR-Lex». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1998/83/1998-12-25>
- [17] «UNSCEAR\_1982\_Annex-D.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR\\_1982\\_Annex-D.pdf](https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_1982_Annex-D.pdf)
- [18] «BOE-A-2003-3596 Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.» Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-3596>
- [19] «BOE-A-2016-7340 Real Decreto 314/2016, de 29 de julio, por el que se modifican el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, el Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano, y el Real Decreto 1799/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula el proceso de elaboración y comercialización de aguas preparadas envasadas para el consumo humano.» Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-7340>
- [20] «BOE.es - DOUE-L-2013-82336 Directiva 2013/51/Euratom del Consejo, de 22 de octubre de 2013, por la que se establecen requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a las sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano.» Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2013-82336>
- [21] Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 314/2016, de 29 de julio, por el que se modifican el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, el Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano, y el Real Decreto 1799/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula el proceso de elaboración y comercialización de aguas preparadas envasadas para el consumo humano*, vol. BOE-A-2016-7340. 2016, pp. 53106-53126. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/07/29/314>
- [22] «BOE-A-2023-628 Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.» Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2023-628>
- [23] M. Rahimi, A. Asadi Mohammad Abadi, y L. Jabari Koopaei, «Radon concentration in groundwater, its relation with geological structure and some physicochemical parameters of Zarand in Iran», *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 185, p. 110223, jul. 2022, doi: 10.1016/j.apradiso.2022.110223.
- [24] L. M. O. Martins, A. J. S. C. Pereira, A. S. Oliveira, L. F. S. Fernandes, y F. A. L. Pacheco, «A new radon prediction approach for an assessment of radiological potential in drinking water», *Sci. Total Environ.*, vol. 712, p. 136427, abr. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136427.
- [25] «Una tesis comprueba en el río Mundo la idoneidad del radón para cuantificar el agua procedente de acuíferos | Noticias». Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doctorado.upct.es/noticias/una-tesis-comprueba-en-el-rio-mundo-la-idoneidad-del-radon-para-cuantificar-el-agua-procedente-de-acuiferos>
- [26] «¿Qué es un acuífero?», *Hidroambiente*. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hidroambientecr.com/notas/que-es-un-acufero>

- [27] «Descripción geológica de Galicia». Accedido: 17 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag\\_sismotectonicas/galicia.html](https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag_sismotectonicas/galicia.html)
- [28] «Mapas IGME - Portal de cartografía del IGME: Cartografía geológica». Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Default.aspx?language=es>
- [29] «Mapa Gas Radón», Radón Control Services®. Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.radoncontrol.es/mapa-gas-radon/>
- [30] «Geologia Historia Geologica Peninsula Iberica Periodo No Presencial.pdf». Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.edu.xunta.gal/centros/iessardineira/system/files/Geologia%20Historia%20Geologica%20Peninsula%20Iberica%20Periodo%20No%20Presencial.pdf>
- [31] M. Vital, S. Grondona, N. Dimova, y D. E. Martinez, «Factors affecting the radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) emanation from aquifer rock materials: Implications for radiological and groundwater tracer studies», *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 189, p. 110433, nov. 2022, doi: 10.1016/j.apradiso.2022.110433.
- [32] «Desintegración Alfa». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.quimica.es/enciclopedia/Desintegraci%C3%B3n\\_Alfa.html](https://www.quimica.es/enciclopedia/Desintegraci%C3%B3n_Alfa.html)
- [33] «Full text of “Física Quântica Eisberg E Resnick”». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://archive.org/stream/FsicaQunticaEisbergEResnick/F%C3%ADsica%20Qu%C3%A2ntica%20-%20Eisberg%20e%20Resnick\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/FsicaQunticaEisbergEResnick/F%C3%ADsica%20Qu%C3%A2ntica%20-%20Eisberg%20e%20Resnick_djvu.txt)
- [34] «Desintegración beta». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.quimica.es/enciclopedia/Desintegraci%C3%B3n\\_beta.html](https://www.quimica.es/enciclopedia/Desintegraci%C3%B3n_beta.html)
- [35] «¿Qué es la Ley de la desintegración radiactiva?» Accedido: 23 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-ley-de-la-descomposicion-radiactiva/?utm\\_content=cmp-true](https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-ley-de-la-descomposicion-radiactiva/?utm_content=cmp-true)
- [36] «Medición de concentración de radón - IGVS». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://igvs.xunta.gal/radon/medicion-de-concentracion?langId=es\\_ES](https://igvs.xunta.gal/radon/medicion-de-concentracion?langId=es_ES)
- [37] «Radiotrazadores». Accedido: 19 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/radiotrazadores>
- [38] «ATMOS», Radoninstruments.com (ES). Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://radoninstrument.com/es/product/atmos/>
- [39] «RAD7 - Radoninstruments.com (ES)». Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://radoninstrument.com/es/product/rad7/>
- [40] «RAD7 manual usuario.pdf».
- [41] «AlphaE», Radoninstruments.com (ES). Accedido: 15 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://radoninstrument.com/es/product/alphae/>
- [42] «Airthings Home | Monitor de Gas Radón - Radiansa». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.radiansa.com/p/airthings-home-monitor-de-gas-radon>
- [43] «man-rtm1688-2-en.pdf». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sarad.de/cms/media/docs/handbuch/man-rtm1688-2-en.pdf>
- [44] «AN-003\_RadonInWater\_EN\_17-01-24.pdf». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.sarad.de/cms/media/docs/applikation/AN-003\\_RadonInWater\\_EN\\_17-01-24.pdf](https://www.sarad.de/cms/media/docs/applikation/AN-003_RadonInWater_EN_17-01-24.pdf)
- [45] «Mapa – Lavadoiros de Marín». Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavadoirosdemarin.com/mapa/>
- [46] «A memoria da auga: fontes e lavadoiros – Concello de Bueu». Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://concellodebueu.gal/a-memoria-da-auga-fontes-e-lavadoiros/>

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

La presencia de elevados niveles de concentración de radón en el agua de consumo no solo plantea riesgos para la salud humana, sino que también tiene implicaciones ambientales significativas. No solo el agua se ve directamente contaminada a través de este gas, sino que también el radón liberado por el agua en interiores puede contribuir a la contaminación del aire interior.

Como se ha comentado a lo largo del desarrollo del trabajo, la contaminación radiactiva procedente del radón también afecta a las fuentes de agua de consumo, lo que requiere medidas de optimización de protección radiológica frente al radón para garantizar que el agua que llega a los hogares es apta para el consumo.

No obstante, estas medidas conllevarían un gran gasto público a nivel municipal ya que sería necesaria la instauración de sofisticados sistemas que requieren nuevas tecnologías para reducir el radón del agua. Por lo tanto, sería interesante encontrar un equilibrio entre la optimización frente a la protección radiológica en las fuentes que lo requieran y el dinero invertido en las obras pertinentes. Convendría hacer un análisis de manera óptima y económica para reducir directamente el radón que contienen las fuentes.

En resumen, es importante abordar los altos niveles de radón en el agua de consumo, sino también para preservar el medioambiente y mitigar los impactos negativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Sería necesario implantar medidas de regulación, mitigación y concienciación pública para abordar este problema de manera efectiva y garantizar un suministro de agua potable sostenible para las generaciones futuras.

## **ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES**

El radón es reconocido como un agente carcinogénico que puede provocar cáncer de pulmón si se inhala en niveles importantes. Por ende, surge una responsabilidad ética y social de preservar la salud pública y reducir al mínimo la exposición al radón procedente de aguas de consumo, en especial las procedentes de aguas subterráneas. Además, La escasa conciencia y comprensión acerca de los peligros asociados al radón puede propiciar una exposición excesiva. Por consiguiente, resulta crucial que la información relativa a los riesgos del radón esté ampliamente disponible y sea fácilmente accesible para el público.

En términos de justicia social, es fundamental abordar estos problemas de manera equitativa, asegurando que todas las personas tengan acceso a agua segura y saludable, independientemente de su origen socioeconómico o geográfico. Esto puede requerir políticas públicas que prioricen la inversión en infraestructura de tratamiento de agua y programas de educación pública sobre los riesgos del radón y cómo mitigarlos.

Por consiguiente, Es deber de los gobiernos establecer normativas y criterios para asegurar la protección del público y reducir al mínimo la exposición al radón en el aire dentro de los edificios. En el caso de que la gente acceda al agua de consumo a través de fuentes de suministro o pozos privados, será su propia responsabilidad la de reducir la concentración de radón en el agua si esta excede los límites. Para hacerlo, se podrían utilizar métodos desarrollados en este trabajo (agitación y espera entre la recolecta y el consumo de agua).

En resumen, la concentración de radón en el agua plantea importantes dilemas éticos y sociales que deben abordarse de manera integral y equitativa. Garantizar la seguridad y la salud de la población, así como abordar las desigualdades en el acceso a agua segura, son aspectos fundamentales de una sociedad justa y ética.