



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Gestión de la presencia de radón en lugares de trabajo:
determinación de concentraciones y evaluación de riesgos en la
ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Cristina Camacho Martín

DIRECTORES: Rosa Devesa Rey
Lorena González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Gestión de la presencia de radón en lugares de trabajo:
determinación de concentraciones y evaluación de riesgos en la
ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El radón es un gas radioactivo de origen natural, muy desconocido y a la vez muy dañino. Según la Organización Mundial de la Salud es el segundo causante de cáncer de pulmón. Proviene del uranio, presente en las rocas graníticas, por lo que la Escuela Naval Militar (ENM) se encuentra en una zona susceptible de presentar altas concentraciones de radón.

En este trabajo, se pretende elaborar un mapa de concentraciones de radón en la ENM y estimar las dosis efectivas. Para lograrlo, se realizan 28 mediciones en diferentes estancias, hallando la concentración media anual de cada una y la dosis efectiva anual a la que se encuentran expuestos diferentes colectivos: personal, profesorado y alumnos. Se observa que el 34% de las estancias está por encima del límite que marca la normativa de 300 Bq/m³, lo que puede dar lugar a dosis efectivas anuales elevadas. Sin embargo, los límites legales de dosis no están tan claros, dando lugar a cierta polémica.

Se concluye que existe la necesidad de tomar medidas de mitigación, habiendo comprobado la gran efectividad que tiene la ventilación en la disminución de la concentración. Asimismo, se considera clave la concienciación del personal acerca de los efectos de radón.

PALABRAS CLAVE

Concentración, Dosis Efectiva, Mitigación, Radón, Riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Creo que es muy importante valorar a quienes tenemos cerca, por eso no me gustaría cerrar esta etapa de mi vida sin antes dar las gracias.

A mi familia, quien me ha apoyado y motivado en todo momento. A mis compañeras, mejor dicho, amigas de la promoción 421-151 quienes han estado mano a mano en las malas, en las buenas y en las mejores, y por supuesto a Lolo, el mejor amigo que se pueda tener. A mis tutoras, Rosa y Lorena, por hacer este último tramo mucho más llevadero y por todos los consejos que me han dado. Sin olvidar a Marta García-Talavera y Arturo Vargas Drechsler, quienes han respondido a todas mis dudas, sirviendo de gran ayuda para la realización de este trabajo.

¡Que lo que este por venir sea aún mejor!

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Calidad del ambiente interior	7
1.2 ¿Qué es el radón?	7
1.3 Justificación	8
1.4 Objetivos	9
1.5 Metodología y estructura de la memoria.....	10
2 Estado del arte	12
2.1 Riesgos del radón	12
2.1.1 Radioactividad	12
2.1.2 Efectos sobre la salud	13
2.1.3 Radón y cáncer de pulmón	16
2.1.4 Otras enfermedades	18
2.2 Normativa.....	19
2.2.1 Legislación en España	19
2.2.2 El radón en la prevención de riesgos laborales.....	21
2.2.3 Comisión Internacional de Protección Radiológica	21
2.2.4 Otros países.....	22
2.3 Unidades de medida y dosis efectiva	23
2.4 Factores determinantes en la presencia de radón en interiores	24
3 Desarrollo del TFG.....	26
3.1 Descripción de la Escuela Naval Militar.....	26
3.2 Mediciones de radón	28
3.2.1 Equipo de medición	28
3.2.2 Colocación del equipo y periodo de medición	29
3.2.3 Criterios para la selección de espacios de medición.....	29
3.3 Estancias medidas	30
4 Metodología de cálculo y resultados	35
4.1 Desarrollo de la metodología de cálculo	35
4.1.1 Estimación de la concentración media anual de radón	35
4.1.2 Cálculo de las horas de exposición	36

4.1.3 Estimación de la dosis efectiva.....	42
4.2 Concentraciones medias anuales de radón.....	45
4.3 Dosis efectivas anuales	49
4.3.1 Controversia en el límite de dosis efectiva a aplicar	49
4.3.2 Dosis efectivas anuales para diferentes colectivos	50
4.4 Gestión del riesgo.....	58
4.4.1 Medidas de mitigación.....	58
4.4.2 Concienciación acerca del radón	61
5 Conclusiones y líneas futuras	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Líneas futuras	64
6 Bibliografía.....	66
Anexo I: Unidades.....	70
Anexo II: Encuesta	71
Anexo III: Concentraciones de radón.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Mapa litológico de España (tomada de [5])	8
Figura 1-2 Mapa del potencial de radón en España y en Galicia (elaboración propia a partir de [6])	9
Figura 1-3 Metodología del presente TFG (elaboración propia)	10
Figura 2-1 Fuentes de radiación natural y artificial (elaboración propia en base a [10])	12
Figura 2-2 Series radioactivas naturales (elaboración propia).....	13
Figura 2-3 Proceso carcinogénico según el modelo multietapa (tomada de [15]).....	14
Figura 2-4 Cadena de desintegración del Uranio-238 (elaboración propia).....	15
Figura 2-5 Proceso de inhalación de radón y efecto en la salud (tomada de [16])	15
Figura 2-6 Riesgo relativo de cáncer de pulmón en función de la concentración media de radón residencial en el análisis agrupado europeo (tomada de [3])	17
Figura 2-7 Límites de concentración de radón en diferentes países (elaboración propia).....	22
Figura 2-8 Cálculo de la dosis efectiva mediante modelo dosimétrico (elaboración propia).....	24
Figura 2-9 Vías de entrada de radón en viviendas (tomada de [47])	24
Figura 3-1 Escuela Naval Militar (elaboración propia)	26
Figura 3-2 Medidor Radon Eye RD 200 y aplicación móvil "Radon Eye" (tomada de [49])	28
Figura 3-3 Funciones aplicación móvil Radon Eye (elaboración propia)	28
Figura 3-4 Fechas de medición (elaboración propia).....	30
Figura 3-5 Patio de Aulas – Puntos de medición (I) (elaboración propia)	31
Figura 3-6 Planta baja "Marqués de la Victoria" - Puntos de medición (II) (elaboración propia)	32
Figura 3-7 Planta baja edificio "Príncipe de Asturias" - Puntos de medición (III) (elaboración propia)	32
Figura 3-8 Edificio "Almirante Bonifaz" - Puntos de medición (V) (elaboración propia).....	33
Figura 3-9 Planta baja edificio "Isaac Peral" - Puntos de medición (IV) (elaboración propia).....	33
Figura 3-10 Planta alta edificio "Isaac Peral" - Puntos de medición (V) (elaboración propia)	34
Figura 4-1 Fragmento de la medición del aula 17 (elaboración propia).....	35
Figura 4-2 Ejemplo de horario Aspirantes 1º "Semana B" (tomada de [52])	37
Figura 4-3 Calendario académico 2020-2021 (tomada de [52])	38
Figura 4-4 Esquema de comportamiento del radón en interiores (elaboración propia en base a [55]) ..	43
Figura 4-5 Modelo del tracto respiratorio (tomada de [56])	43
Figura 4-6 Epitelio respiratorio (elaboración propia)	44
Figura 4-7 Porcentaje de estancias según el valor de concentración medio (elaboración propia).....	47
Figura 4-8 Concentración de radón en el aula 10 (elaboración propia).....	48
Figura 4-9 Mapa de concentraciones de radón de la ENM (elaboración propia)	49
Figura 4-10 Porcentaje según el rango de dosis anual efectiva (elaboración propia).....	57
Figura 4-11 Efectividad de las distintas soluciones (tomada de [57])	60

Figura 4-12 Concentración de radón en la oficina de Correos (elaboración propia).....	61
Figura 4-13 Ejemplo de ficha para el aula 17 (elaboración propia).....	62
Figura A-1 Concentración de radón en el aula 17 (elaboración propia).....	72
Figura A-2 Concentración de radón en el aula 14 (elaboración propia).....	72
Figura A-3 Concentración de radón en el aula 21 (elaboración propia).....	73
Figura A-4 Concentración de radón en el aula 18 (elaboración propia).....	73
Figura A-5 Concentración de radón en el aula 10 (elaboración propia).....	74
Figura A-6 Concentración de radón en el aula 1 (elaboración propia).....	74
Figura A-7 Concentración de radón en el aula 9 (elaboración propia).....	75
Figura A-8 Concentración de radón en el aula 15 (elaboración propia).....	75
Figura A-9 Concentración de radón en la oficina de Correos (elaboración propia).....	76
Figura A-10 Concentración de radón en sastrería (elaboración propia).....	76
Figura A-11 Concentración de radón en la biblioteca histórica (elaboración propia).....	77
Figura A-12 Concentración de radón en el CAI (elaboración propia).....	77
Figura A-13 Concentración de radón en cocina (elaboración propia).....	78
Figura A-14 Concentración de radón en la farmacia (elaboración propia).....	78
Figura A-15 Concentración de radón en despacho de Jefatura de Instrucción (elaboración propia).....	79
Figura A-16 Concentración de radón en el taller de electrónica (elaboración propia).....	79
Figura A-17 Concentración de radón en el aula 43 (elaboración propia).....	80
Figura A-18 Concentración de radón en el laboratorio de motores (elaboración propia).....	80
Figura A-19 Concentración de radón en el cuarto del Suboficial de Guardia (elaboración propia).....	81
Figura A-20 Concentración de radón en la piscina (elaboración propia).....	81
Figura A-21 Concentración de radón en el pabellón deportivo (elaboración propia).....	82
Figura A-22 Concentración de radón en el casino de alumnos (elaboración propia).....	82
Figura A-23 Concentración de radón en la biblioteca de alumnos (elaboración propia).....	83
Figura A-24 Concentración de radón en Jefatura de Mantenimiento (elaboración propia).....	83
Figura A-25 Concentración de radón en la lavandería (elaboración propia).....	84
Figura A-26 Concentración de radón en el aula 56 (elaboración propia).....	84
Figura A-27 Concentración de radón en una camareta del cuartel A.F.M (elaboración propia).....	85
Figura A-28 Concentración de radón en un estudio del cuartel A.F.M (elaboración propia).....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Riesgo de cáncer de pulmón por exposición al radón en interiores basado en el análisis agrupado de diferentes estudios (elaboración propia a partir de [3]).....	16
Tabla 2-2 Estudios sobre el radón residencial y el cáncer de pulmón (elaboración propia en base a [28]).....	17
Tabla 2-3 Dosis anuales absorbidas por órganos y tejidos por inhalación de radón (elaboración propia a partir de [30])	18
Tabla 4-1 Horas de permanencia en diferentes estancias según el curso (elaboración propia)	38
Tabla 4-2 Horas de exposición del grupo 6 de Aspirantes de 1º (elaboración propia).....	39
Tabla 4-3 Horas de exposición del grupo 5 de Aspirantes de 2º (elaboración propia).....	39
Tabla 4-4 Horas de exposición del grupo 1 de Guardiamarinas de 2º (elaboración propia)	40
Tabla 4-5 Horas de exposición del grupo 1 de Alféreces de Fragata (elaboración propia).....	40
Tabla 4-6 Horas de exposición del grupo 6 de Aspirantes de 1º (elaboración propia).....	41
Tabla 4-7 Horas de exposición de un profesor "tipo" (elaboración propia)	42
Tabla 4-8 Horas de exposición del distinto personal de la ENM (elaboración propia)	42
Tabla 4-9 Dosis efectiva por inhalación de radón en lugares de trabajo (elaboración propia en base a [11]).....	44
Tabla 4-10 Concentraciones de radón en las diferentes instalaciones de la ENM (elaboración propia).....	45
Tabla 4-11 Continuación concentraciones de radón en las diferentes instalaciones de la ENM (elaboración propia)	46
Tabla 4-12 Dosis efectiva anual del grupo 6 de Aspirantes de 1º (elaboración propia)	51
Tabla 4-13 Dosis efectiva anual del grupo 5 de Aspirantes de 2º (elaboración propia)	51
Tabla 4-14 Dosis efectiva anual del grupo 1 de Guardiamarinas de 2º (elaboración propia).....	52
Tabla 4-15 Dosis efectiva anual del grupo 1 de Alféreces de Fragata (elaboración propia)	52
Tabla 4-16 Dosis efectiva de un alumno de la ENM a lo largo de cuatro años (elaboración propia)	53
Tabla 4-17 Dosis efectiva anual de un profesor "tipo" (elaboración propia).....	53
Tabla 4-18 Dosis efectiva anual de Correos (elaboración propia).....	54
Tabla 4-19 Dosis efectiva anual en sastrería (elaboración propia)	54
Tabla 4-20 Dosis efectiva anual de la farmacia (elaboración propia).....	54
Tabla 4-21 Dosis efectiva anual del CAI (elaboración propia)	55
Tabla 4-22 Dosis efectiva anual de la biblioteca histórica (elaboración propia)	55
Tabla 4-23 Dosis efectiva anual del taller de electrónica (elaboración propia).....	55
Tabla 4-24 Dosis efectiva anual de la lavandería (elaboración propia).....	56
Tabla 4-25 Dosis efectiva anual de Jefatura de Mantenimiento (elaboración propia).....	56
Tabla 4-26 Dosis efectiva anual del despacho del Comandante de Brigada en Jefatura de Instrucción (elaboración propia)	56
Tabla 4-27 Dosis efectiva anual de la biblioteca del cuartel A.F.M (elaboración propia)	57

Tabla 4-28 Soluciones de protección en función del promedio anual de concentración de radón
(elaboración propia en base a [57]).....59

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Calidad del ambiente interior

La norma UNE 171330 (Parte 1 – Diagnóstico de calidad ambiental interior) [1], define como Calidad Ambiental en Interiores a *“las condiciones ambientales de los espacios interiores, adecuadas al usuario y la actividad, definidas por los niveles de contaminación química, microbiológica y por los valores de los factores físicos.”*

Hoy en día, el ser humano pasa la mayor parte de su tiempo en espacios cerrados, ya sea en oficinas, escuelas, centros comerciales o casas, respirando aire que puede estar contaminado por diferentes fuentes, constituyendo un factor de riesgo importante para la salud. De hecho, una mala calidad del aire interior puede provocar efectos desde irritación de ojos, picor de nariz o dolor de garganta, hasta enfermedades de mayor relevancia como asma, insuficiencias respiratorias o incluso cáncer. Sin embargo, una buena calidad ambiental tiene múltiples beneficios como el bienestar, el confort e incluso un aumento de la productividad [1]. El número de personas afectadas por el deterioro de las condiciones ambientales ha dado lugar a la mejora en el control de éstas, por ejemplo, con el diseño de edificios con sistemas de ventilación mecánica.

Las fuentes de contaminación que disminuyen la calidad del ambiente interior son diversas, la mayoría se encuentran en el propio edificio, ya sea por los materiales de construcción, los sistemas de ventilación o la antigüedad del edificio, pero también pueden ser externas como la inmisión de radón [2]. El radón juega un papel fundamental en la calidad ambiental, siendo uno de los principales factores de riesgo, como se expone a lo largo del presente trabajo.

1.2 ¿Qué es el radón?

“El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población general después del tabaco”, así empieza el Manual de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre el radón [3].

Pero ¿qué es? El radón es un gas radioactivo, incoloro, inodoro e insípido con una vida media de 3,8 días. Proviene de la desintegración del radio (Ra-226) que a su vez proviene del uranio (U-238), presente de forma natural en suelos y rocas fundamentalmente de granito. Al emanar del subsuelo y debido a su estado gaseoso, asciende hacia la superficie y se diluye rápidamente en la atmósfera, por lo que las concentraciones de radón no alcanzan valores muy significativos en exteriores. Sin embargo, el problema viene dado cuando se acumula en lugares cerrados como viviendas, ya que al ser más denso que el aire, se concentra en mayor parte en las plantas bajas.

Los efectos del radón sobre la salud han sido objeto de investigación desde que en el siglo XVI se observó una mayor mortalidad por enfermedad respiratoria en mineros de Europa Central, pero no fue hasta el siglo XX cuando se averiguó que era el radón la causa de esas enfermedades [3]. Desde entonces, numerosos estudios se han llevado a cabo analizando la relación entre el radón en interiores y el cáncer de pulmón. Este gran desconocido fue clasificado en 1988 como carcinógeno humano por el Centro Internacional de Investigación sobre el Cáncer (CIIC) y como se ha mencionado anteriormente, es la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco.

No se conoce un umbral por debajo del que la exposición al radón no suponga ningún peligro, no obstante, la OMS en su manual sobre el radón ha establecido un nivel de referencia medio anual de 100 Bq/m^3 y no deberá superar en ningún caso los 300 Bq/m^3 ya que, conforme lo citado por la OMS: *“La mayoría de los casos de cáncer de pulmón inducidos por el radón están provocados por concentraciones de radón bajas o moderadas, y no por concentraciones elevadas, dado que en general es menor el número de personas expuestas a concentraciones elevadas de radón en interiores.”* [3]

1.3 Justificación

El radón, como se ha visto, procede del uranio, y se encuentra en gran parte en el granito, un material que se encuentra contenido en las rocas de la corteza terrestre y que se compone en un 67% de sílice (SiO_2) [4]. En la Figura 1-1 se puede comprobar que en el norte y oeste de España la mayor parte del suelo es de tipo silíceo, lo que explica la posibilidad de hallar altas concentraciones de radón.



Figura 1-1 Mapa litológico de España (tomada de [5])

Adicionalmente y de acuerdo con los estudios realizados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Galicia es la comunidad más afectada en España en cuanto a la concentración de radón (Figura 1-2).

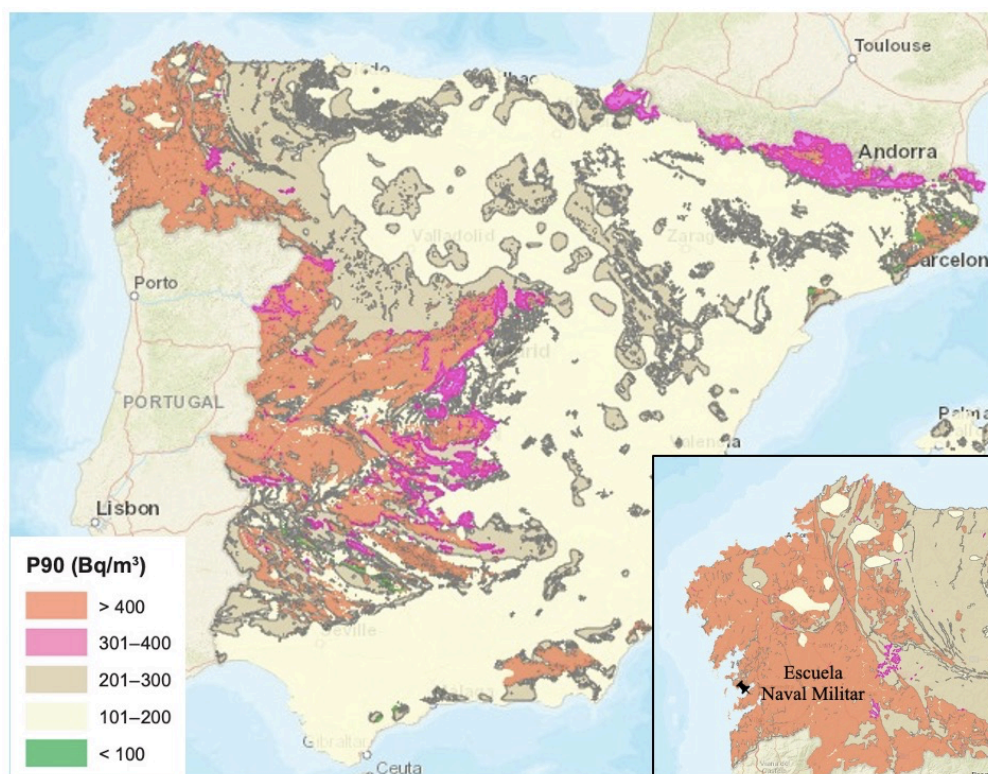


Figura 1-2 Mapa del potencial de radón en España y en Galicia (elaboración propia a partir de [6])

Como se observa en la Figura 1-2, que muestra el potencial de radón en España, la ENM se encuentra ubicada en una zona con percentil 90 mayor de 400 Bq/m³. Esto significa que un porcentaje elevado de los edificios es susceptible de presentar concentraciones de radón muy altas.

Por ello y en base al Trabajo de Fin de Grado (TFG) del ahora Alférez de Navío Muñoz Yébenes [7], quien introdujo la problemática del radón y realizó mediciones en algunos edificios de esta escuela y al TFG del Alférez de Navío García Denia [8], quien se centró en el Centro Universitario de la Defensa y propuso medidas de mitigación, se sabe que en algunos puntos concretos de la Escuela Naval Militar existen altas concentraciones de radón.

En esta escuela no solo conviven cada día cientos de futuros oficiales de la Armada, sino que también hay numerosos profesores y personal civil que trabajan en ella, de manera que, por lo anteriormente mencionado, se considera fundamental identificar otras zonas potencialmente peligrosas por presentar altas concentraciones de radón y evaluar el riesgo al que están sometidos los trabajadores y alumnos, motivación que da pie a la realización del presente trabajo.

1.4 Objetivos

Una vez expuesta la problemática asociada a la presencia del radón y su prevalencia en los suelos sobre los que se levanta la ENM, se plantean en el presente TFG los siguientes objetivos:

- Elaborar un mapa amplio sobre las concentraciones de radón en la ENM y así poder identificar zonas de alto riesgo. Para lograr este objetivo, se colocarán medidores en diferentes espacios no estudiados en los TFG previos, y que se consideran relevantes.
- Estimar la dosis efectiva, para conocer y evaluar el riesgo al que se encuentra expuesto el distinto personal de la ENM, el profesorado y los alumnos a lo largo de un año. Con este fin, será necesario entender previamente los mecanismos por los que el radón es dañino para la salud y desarrollar una metodología de cálculo que permita determinar la dosis efectiva anual a partir de la concentración de radón y del tiempo de exposición de los diferentes colectivos.

- Realizar un estudio de la normativa vigente sobre el radón. De esta forma, se pretenden establecer los límites de concentración y dosis en espacios laborales para así poder compararlos con los obtenidos en este trabajo para la ENM.
- Tras el análisis de los resultados obtenidos y en función de estos, proponer medidas de mitigación para reducir el riesgo debido al radón de los diferentes colectivos presentes en la ENM.

1.5 Metodología y estructura de la memoria

El propósito de este apartado es indicar la metodología empleada (Figura 1-3) para alcanzar los objetivos y a su vez, cómo se estructura el presente TFG.

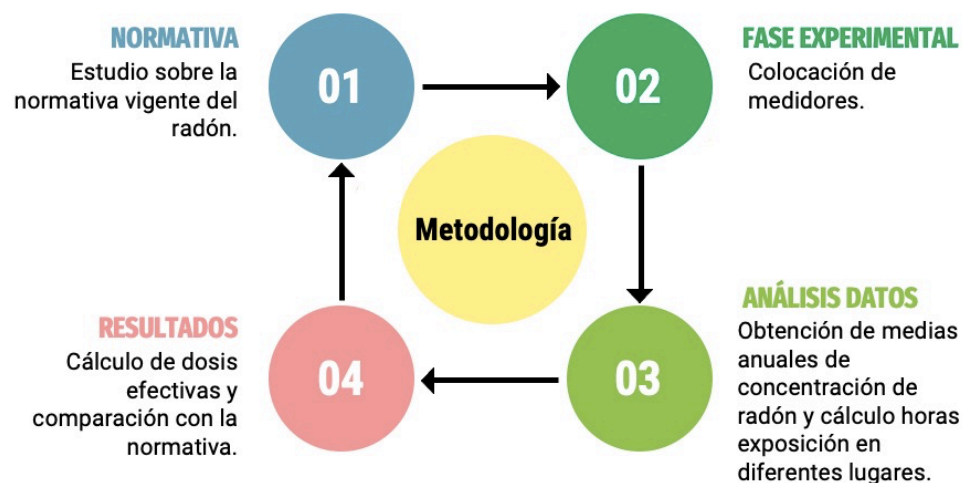


Figura 1-3 Metodología del presente TFG (elaboración propia)

Una vez introducida en este primer capítulo la problemática de la presencia de radón en interiores y sus objetivos, se pasan a exponer en el Capítulo 2 los riesgos asociados al radón y cómo afecta al cuerpo humano. Se introduce también la normativa a nivel nacional, lo que resulta fundamental para conocer los límites y poder aplicarlos en apartados posteriores, así como las políticas llevadas a cabo en diferentes países. Además, en este capítulo se expone la definición del concepto de dosis efectiva y las unidades empleadas a lo largo del trabajo. Por último, se estudian brevemente los factores determinantes sobre la presencia de radón en interiores.

En el Capítulo 3 (Desarrollo del TFG), primero se describen la ubicación y las instalaciones de la Escuela Naval Militar, donde se lleva a cabo el presente trabajo. A continuación, se explica la fase experimental, es decir, la colocación de los medidores de radón. Para ello, se indican los criterios empleados para la selección de las estancias donde realizar la medición, se precisan los espacios de medición seleccionados y sus correspondientes periodos de tiempo. Una vez transcurrido el periodo de medición, se realiza el análisis de los datos mediante Excel.

En el siguiente capítulo, el número 4, tras obtener los datos de las mediciones, se expone la metodología de cálculo desarrollada para hallar las concentraciones medias anuales de radón en las diferentes estancias y los resultados obtenidos. Asimismo, se explica la metodología empleada para determinar la dosis efectiva anual, mostrando los resultados alcanzados para alumnos, profesores y otro personal de la ENM, lo que hace necesario estimar previamente las horas de exposición de estos colectivos. Se plantea también en este capítulo la controversia existente en la normativa sobre los límites a aplicar en las dosis. Por este motivo y al resultar la normativa ambigua y desactualizada, se contacta con dos profesionales para aclarar diferentes aspectos sobre ello; Marta García-Talavera, jefa del departamento de radiación natural del Consejo de Seguridad Nuclear y Arturo Vargas Drechsler, doctor ingeniero industrial especializado en dosimetría y radiofísica médica. Para finalizar, se

proponen unas medidas de mitigación y de concienciación al personal para reducir los riesgos de exposición al radón en la ENM.

En el Capítulo 5, se enuncian las conclusiones extraídas del TFG y se plantean posibles líneas futuras de investigación acerca de este tema.

En último lugar, se muestra la bibliografía utilizada y mediante diferentes anexos se detalla en mayor profundidad algún aspecto del presente trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Riesgos del radón

2.1.1 Radioactividad

Teniendo en cuenta que el radón es un elemento radioactivo y que por tanto su toxicidad se debe a ello, resulta necesario introducir la radioactividad. La desintegración o radioactividad es un fenómeno aleatorio, por el cual un átomo inestable emite radiación hasta convertirse en un átomo estable.

Además de la radiación producida por fuentes antropogénicas, existe la radiación natural que, en cambio, como su nombre indica procede de la naturaleza. Ambas interactúan con el cuerpo humano de la misma forma, por lo que ninguna es más peligrosa que otra. Sin embargo, la gran diferencia existente es que todos los seres humanos están expuestos a radiación natural y tal y como se aprecia en la Figura 2-1, el 34% de ésta proviene del radón [9].

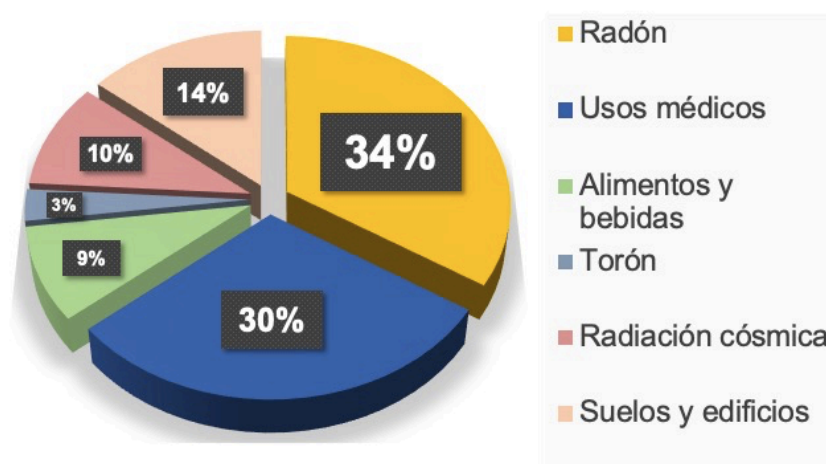


Figura 2-1 Fuentes de radiación natural y artificial (elaboración propia en base a [10])

En cuanto al radón, existen tres tipos de isótopos, ^{222} , ^{220} y ^{219} , que comúnmente se conocen como radón, torón y actinón, respectivamente. Todos ellos son productos de la desintegración del radio, concretamente del Radio-226, 224 y 223 que a su vez proceden de las tres series de desintegración radioactiva natural (Figura 2-2), la del Uranio-238, la del Torio-232 y la del Uranio-235 [11].

Aproximadamente el 80 % de todo el radón en el ambiente es Radón-222, por lo que en este TFG se referencia como “radón” al isótopo del Radón-222 procedente del Uranio-238 [12].

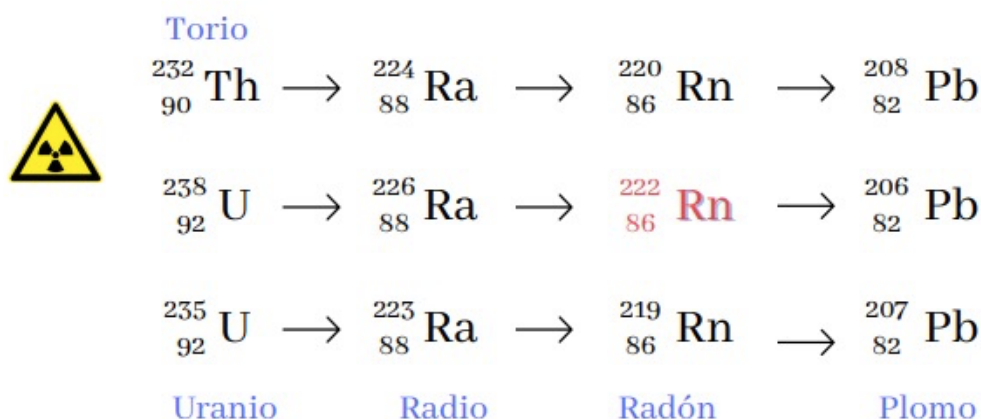


Figura 2-2 Series radioactivas naturales (elaboración propia)

Como se ha mencionado, en el proceso de desintegración, los elementos químicos radioactivos emiten radiación denominada ionizante por su gran cantidad de energía liberada. La radiación ionizante tiene suficiente energía como para arrancar electrones de las capas externas de los átomos a los que impacta produciendo alteraciones en tejidos orgánicos.

Existen tres tipos de radiación ionizante:

- Partículas alfa: están formadas por dos neutrones y dos protones. Esta es la más ionizante, pero la menos penetrante, una hoja de papel puede detener estas partículas.
- Partículas beta: tienen la misma carga que los electrones. Estas partículas son menos ionizantes, pero más penetrantes, pudiendo ser frenadas con una hoja de metal fina.
- Radiación gamma: son ondas electromagnéticas, no poseen masa ni carga eléctrica. Tienen gran poder de penetración en la materia, deteniéndose al atravesar una pared de plomo u hormigón.

2.1.2 Efectos sobre la salud

El radón, está clasificado como carcinógeno humano debido a su peligro para la salud. Sus efectos, si bien no son pocos, la mayoría de ellos siguen en investigación.

Según el Consejo Seguridad Nuclear (CSN) el ser humano puede estar expuesto de tres formas a la radiación; de forma externa (las fuentes de radiación se encuentran situadas fuera del cuerpo), por contaminación de la piel (material radiactivo depositado en la piel) o por exposición interna. Esta última se produce por ingestión de agua o alimentos contaminados o por inhalación de partículas en el aire, como es en el caso del radón [13].

La exposición a radiación provoca interacciones con la materia que tienen como consecuencia alteraciones, lesiones o daños físicos, químicos o biológicos en el medio irradiado, esto es lo que se conoce como efectos de la radiación. Los efectos que produce el radón son estocásticos, es decir, aquellos que, al aumentar la dosis de radiación recibida, aumenta la probabilidad de que ocurran, por consiguiente, no existe un umbral por debajo del cual se sepa que no se producirá ningún efecto. Dentro de los efectos estocásticos, se clasifican en hereditarios o somáticos.

Los hereditarios ocurren cuando las radiaciones ionizantes provocan un daño genético en las células germinales, por tanto, en la descendencia de la persona irradiada. Sin embargo, si la célula modificada es una célula somática, el efecto se producirá en el propio individuo expuesto y pueden

aparecer de forma inmediata o al cabo de años, siendo el de mayor relevancia la aparición de cáncer [13] [14].

Esta enfermedad se desarrolla cuando una célula se vuelve maligna y se multiplica de forma incontrolada, creando tumores o neoplasias. Este proceso depende del tipo de célula, del mecanismo de acción del carcinógeno implicado y del tipo de cáncer que se origine. Hoy en día, el modelo aceptado para describir el proceso carcinogénico es el modelo multietapa, siendo estas las siguientes: iniciación, conversión, promoción y progresión (Figura 2-3).

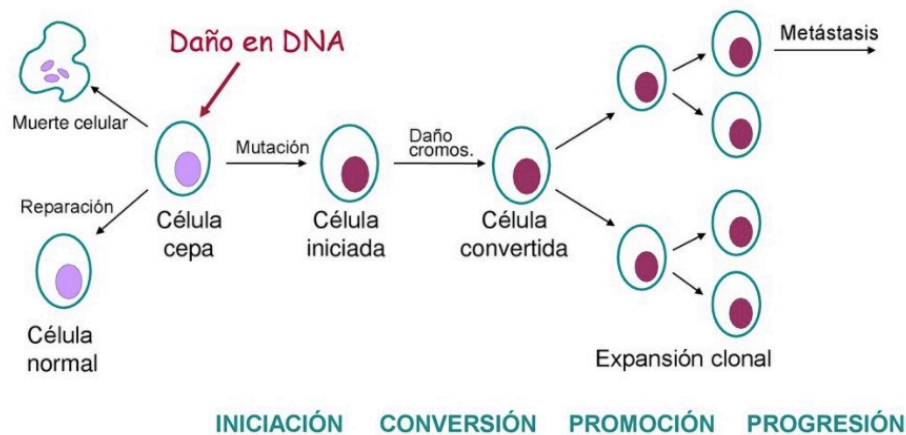


Figura 2-3 Proceso carcinogénico según el modelo multietapa (tomada de [15])

Estocástico significa que algo ocurre al azar y de naturaleza aleatoria, por lo tanto, basta con una exposición única al agente iniciador. Cuando una célula irradiada, en vez de morir o permanecer inalterada, se convierte en una célula cepa, corresponde a la etapa de iniciación. Posteriormente, las células acumulan mutaciones genéticas adicionales, esto se conoce como conversión. Tras la mutación de la célula, tiene lugar la promoción, proceso que requiere de una exposición prolongada (normalmente es reversible si el daño es eliminado) y ocasiona la proliferación de las células convertidas. Por último, en la etapa de progresión, las células pre-neoplásicas acumulan cambios celulares y adquieren una capacidad invasiva y metastásica [15].

Una vez conocido el principal efecto de la radiación y su desarrollo en el cuerpo humano, se explica a continuación cómo afecta la exposición al radón y su relación con el cáncer.

Como se ha visto, el gas radón proviene del Uranio-238 y del Radio-226, ambos en estado sólido a diferencia del radón. Siguiendo su cadena de desintegración se producen otras partículas sólidas radioactivas de vida media muy corta, de segundos y minutos, hasta llegar al Plomo-210 que, aunque es más estable debido a su vida media de veintiún años, posteriormente, vuelve a desintegrarse en descendientes de vida corta hasta el Plomo-206, elemento estable (Figura 2-4). Durante el proceso, se emite radiación ionizante, siendo la más peligrosa y dañina, la radiación alfa.

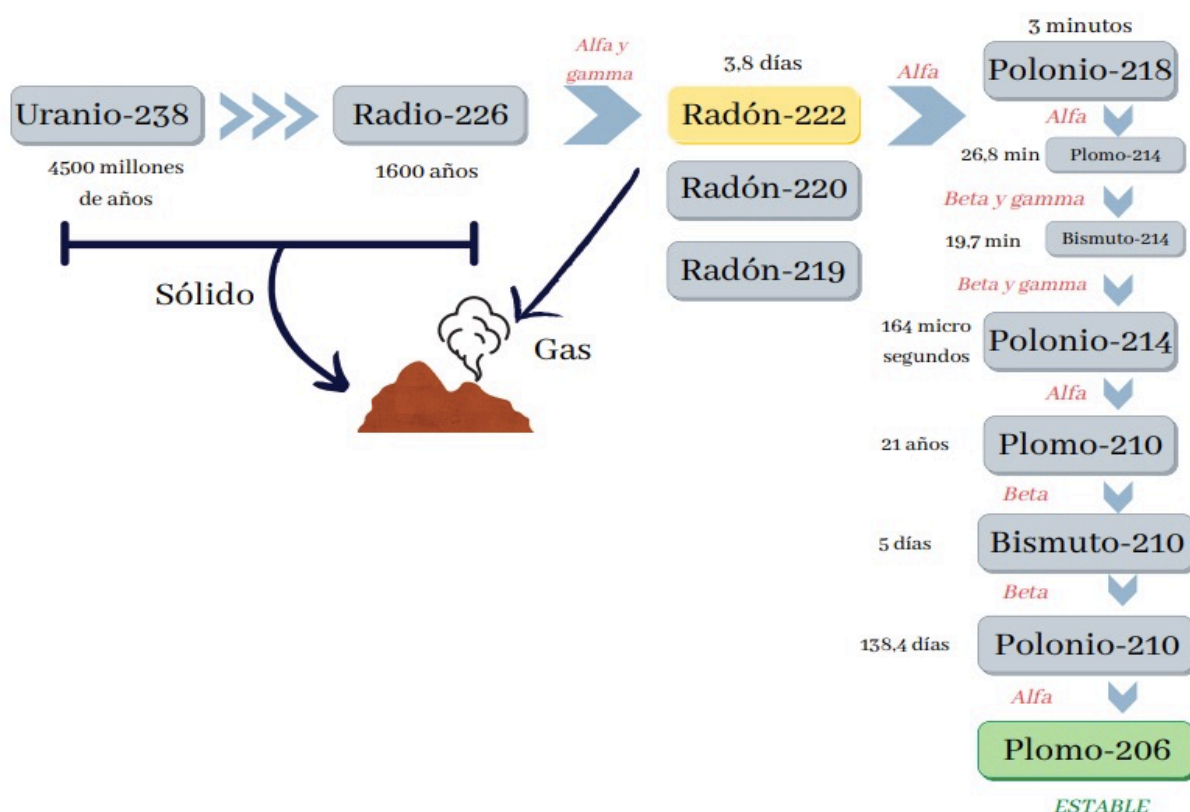


Figura 2-4 Cadena de desintegración del Uranio-238 (elaboración propia)

El problema se da cuando el radón al diluirse en la atmósfera y desintegrarse en sus descendientes sólidos de vida corta (Figura 2-4), éstos, se adhieren a las partículas de polvo del aire y al inhalarlas se introducen en nuestro cuerpo.

El aire inhalado por los pulmones atraviesa los alvéolos y se transfiere a la sangre, llegando así las partículas radioactivas a los tejidos de todo el cuerpo. Desde la sangre de las venas pasa de nuevo al pulmón, donde una parte se exhala y el resto vuelve a iniciar el mismo ciclo.

De esta forma, gran parte de los descendientes del radón se depositan en las células de las vías respiratorias (Figura 2-5) y siguiendo su cadena de desintegración emiten radiación ionizante que puede llegar a dañar el ADN provocando cáncer de pulmón [11].

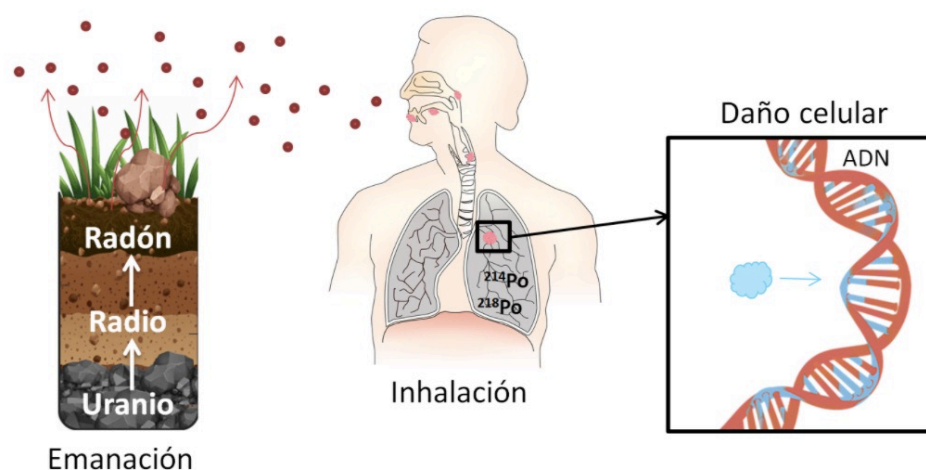


Figura 2-5 Proceso de inhalación de radón y efecto en la salud (tomada de [16])

La inhalación no es la única forma de introducir radón en nuestro cuerpo, el agua es también una vía importante de ingesta. Los investigadores han postulado que el radón ingerido se absorbe tanto en el estómago como en el intestino delgado [11].

2.1.3 Radón y cáncer de pulmón

Desde 1980 se han llevado a cabo numerosos estudios para conseguir relacionar el radón en interiores y el cáncer de pulmón, pero ninguno tenía el tamaño suficiente para demostrarlo.

Con el fin de estimar el riesgo de cáncer de pulmón debido a la exposición de radón, se agruparon los resultados obtenidos en diferentes estudios realizados. Para ello, fue necesario tener en cuenta los antecedentes de tabaquismo de los individuos y otros factores relevantes para así agrupar los datos de forma homogénea.

Se realizaron tres análisis: el análisis agrupado europeo (incluyendo datos de trece estudios [17]), el análisis agrupado norteamericano (abarcó siete estudios) y el análisis agrupado chino (dos estudios [18]). El riesgo estimado por exposición se basó en un periodo de tiempo de cinco a treinta años antes del diagnóstico de cáncer de pulmón, excepto para el análisis europeo que fue de cinco a treinta y cinco años [3] [19]. Los resultados de estos estudios se muestran a continuación (Tabla 2-1).

Análisis agrupados	Nº de estudios incluidos	Nº de casos cáncer pulmón	Nº de controles	Periodo exposición (años)	Incremento porcentual del riesgo de cáncer de pulmón por cada 100 Bq/m ³ de aumento de la concentración de radón	
					Basado en el radón medido	Basado en radón medio a largo plazo
Europeo [17]	13	7148	14208	5 - 35	8	16
Norteamericano [20]	7	3662	4966	5 - 30	11	-
Chino [18]	2	1050	1995	5 - 30	13	-

Tabla 2-1 Riesgo de cáncer de pulmón por exposición al radón en interiores basado en el análisis agrupado de diferentes estudios (elaboración propia a partir de [3])

Como se observa en la Tabla 2-1, por cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración de radón, el riesgo aumenta, realizando la media entre los tres estudios, un 10%. En cambio, si se tiene en cuenta la variabilidad interanual de la concentración de radón, como en el estudio agrupado europeo, el coeficiente de riesgo final a largo plazo fue de un 16% por cada 100 Bq/m³.

Por otro lado, los resultados del estudio agrupado europeo indican una relación lineal (Figura 2-6) entre la dosis recibida y la respuesta, obteniendo datos sólidos de que existe riesgo incluso por debajo de los 300 Bq/m³, siendo este el valor límite establecido como referencia en España [21].

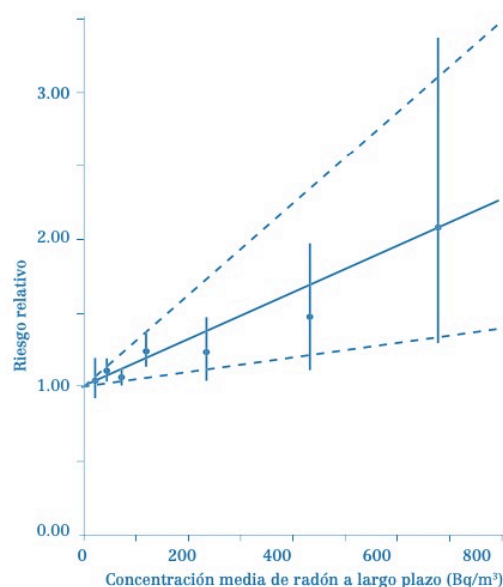


Figura 2-6 Riesgo relativo de cáncer de pulmón en función de la concentración media de radón residencial en el análisis agrupado europeo (tomada de [3])

Asimismo, en España también se han llevado a cabo estudios sobre la relación entre el cáncer de pulmón y el radón residencial, siendo los más destacables los incluidos en la siguiente Tabla 2-2.

Autor, año	Tipo, lugar	Tamaño Muestral	Resultados
Torres Durán et al. 2014 [22]	Galicia y Asturias, España	192 casos y 329 controles	Nunca fumadores. Riesgo de 2,42 (IC95% 1,45-4,06) para los expuestos a >200 Bq/m ³ comparados con los expuestos <100 Bq/m ³ .
Barros-Dios et al. 2012 [23]	Ourense y Santiago de Compostela, Galicia, España	349 casos y 513 controles	Riesgos de 1,87 (IC95% 1,21-2,88); 2,25 (IC95% 1,32-3,84) y 2,21 (IC95% 1,33-3,69) para los expuestos a 50-100, 101-147 y más de 148 Bq/m ³ comparados con los expuestos a menos de 50 Bq/m ³ respectivamente.
Llorca et al. 2007 [24]	Cantabria, España	86 casos y 172 controles	Riesgo de 0,95 (IC95% 0,33-2,65) para los expuestos a >37 Bq/m ³ , tomando como referencia los expuestos a menos de 37 Bq/m ³ .
Barros-Dios et al. 2002 [25]	Santiago de Compostela, Galicia, España	163 casos y 241 controles	Riesgos de 2,73 (IC95% 1,12-5,48); 2,48 (IC95% 1,29-6,79) para los expuestos a 37-35,1; 55,2-147,9 y 148 Bq/m ³ o más, tomando como referencia los expuestos a menos de 37 Bq/m ³ .
Barbosa-Lorenzo et al. 2015 [26]	Galicia, España	Población por municipios gallegos de 1980 a 2009	Correlación significativa entre RME por cáncer de pulmón en varones y la concentración de radón.
Barbosa-Lorenzo et al. 2017 [27]	Galicia, España	1932 individuos	Riesgo de 1,2 (IC95% 0,5-2,8), para los expuestos a 50 Bq/m ³ o más.

Tabla 2-2 Estudios sobre el radón residencial y el cáncer de pulmón (elaboración propia en base a [28])

En todos ellos se observa un riesgo de padecer cáncer de pulmón derivado de la exposición al radón, exceptuando el estudio realizado en Cantabria, debido a las bajas concentraciones existentes. Es preciso mencionar que los resultados del estudio del año 2002 participaron en el análisis agrupado europeo anteriormente citado.

Los estudios previamente mencionados se han realizado en términos de riesgo, si bien, no fue hasta el año 2010 cuando se realizó en Galicia el primer estudio que estima la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible al radón [29]. El principal resultado fue que entre un 3 y un 5% de las muertes son atribuibles exclusivamente al radón, sin embargo, cuando se combina la exposición al radón y al tabaquismo, la mortalidad atribuible es de un 22%, para los siempre fumadores expuestos a más de 148 Bq/m³ (nivel permitido en Estados Unidos) [29]. Además, se analizó también la mortalidad en exposiciones a concentraciones inferiores a 37 Bq/m³, dando resultados mayores ya que el número de individuos expuestos fue mayor. Es importante tener en cuenta que no existe un nivel de exposición al radón que no ocasione ningún riesgo, tal y como se demuestra en este estudio.

Por todo lo anterior, se concluye que existe una clara evidencia entre la exposición al radón en interiores y el cáncer de pulmón.

2.1.4 Otras enfermedades

El principal riesgo causado por la exposición al radón y a sus productos de desintegración es el cáncer de pulmón, tal y como se ha visto. Sin embargo, otros órganos y tejidos también reciben dosis de radiación, y es posible que se induzcan cánceres u otros daños [30].

La Tabla 2-3 representa la dosis por inhalación de radón para los niveles de acción recomendados (en Inglaterra). Estos cálculos dan una indicación de los órganos y tejidos que pueden estar en riesgo, sin embargo, los resultados de estos cálculos son aproximados.

Los cálculos de la Tabla 2-3 referentes a la dosis por inhalación de los productos de desintegración de vida corta del radón se muestran para dos supuestos, dependiendo de la solubilidad de los productos de desintegración. Estos supuestos se conocen como “tipo m” y “tipo f”, el primer tipo proviene de “moderate” es decir solubilidad moderada y el segundo de “fast”, rápida.

Órgano/tejido	Exposición a concentración de radón de 200 Bq/m ³ y a sus productos de desintegración (F=0,41)		
	Productos de desintegración tipo F	Productos de desintegración tipo M	Gas radón
Pulmón	35,8	159	1,2
Vías respiratorias extra torácicas	44,5	70,9	0,42
Estómago	0,19	0,08	0,06
Intestino delgado	0,17	0,05	0,06
Colon	0,16	0,02	0,05
Médula ósea	0,28	0,03	0,65
Superficie huesos	1,48	0,17	0,03
Hígado	0,43	0,05	0,09
Pecho	0,15	0,02	0,42
Riñón	5,2	0,54	0,05
Gónadas	0,15	0,02	0,05
Cerebro	0,15	0,02	0,06
Vejiga	0,21	0,02	0,05
Músculo	0,15	0,02	0,05
Feto	0,06	0,01	0,04
Piel	25	25	-

Tabla 2-3 Dosis anuales absorbidas por órganos y tejidos por inhalación de radón (elaboración propia a partir de [30])

Como se puede observar, la dosis recibida en la piel es la más elevada después de los pulmones y vías respiratorias. La mayoría de la radiación, en forma de partículas alfa de corto alcance será absorbida por las capas externas muertas de la piel, pero algunas pueden llegar a alcanzar las células en las que se originan los cánceres de piel.

Diferentes estudios se han llevado a cabo para comprobar la relación del radón con otro tipo de enfermedades.

El estudio realizado en 2012 en el sudoeste de Inglaterra [31] es un estudio ecológico, es decir, un estudio en el que se comparan dos grupos de personas para encontrar patrones con la aparición de determinadas enfermedades. Los resultados indican que, en aquellas zonas con mayores concentraciones de radón existen más registros de personas con cáncer de piel, si bien no hay suficientes datos epidemiológicos para poder afirmar esta evidencia. Posteriormente, en 2015, un estudio danés [32] concluye que la exposición residencial a largo plazo puede contribuir al desarrollo de cáncer de piel de células basales (la parte más profunda de la epidermis).

De la bibliografía analizada se puede deducir que, aunque no existe una evidencia científica comprobada al respecto, sí se han encontrado importantes indicios de que el radón puede ser un factor de riesgo para el cáncer de piel y se insta a seguir investigando sobre esta relación.

A lo largo de los años se han efectuado otras investigaciones como el efecto a largo plazo de la exposición al radón residencial en el riesgo de tumor cerebral. Se llevó a cabo un estudio de cohorte en Dinamarca [33] donde encontraron un vínculo entre ambos, pero demasiado débil para ser concluyente, si bien enfatiza en que debería ser cuestionado en futuros estudios.

Así mismo se hizo un estudio ecológico en Galicia [34], donde correlacionaron las concentraciones de radón en los diferentes municipios con la mortalidad por tumores malignos de 1999 a 2008. El estudio tuvo que enfrentarse a algunas limitaciones, tales como la falta de datos sobre el cáncer cerebral ya que no existe un registro de cáncer en la población en Galicia sino solo información acerca de la mortalidad, además de las escasas medidas de radón que disponían. Así, el estudio no fue determinante, aunque sugiere que podría existir una asociación entre el radón en interiores y la mortalidad por cáncer cerebral, si bien para tener mayor conocimiento es importante seguir indagando.

Por último, desde 1990 han sido numerosos los estudios llevados a cabo sobre el radón y la leucemia en niños, mayoritariamente en Inglaterra y Estados Unidos sin llegar a ninguna relación, es más, en algunos casos incluso fue inverso el riesgo de cáncer infantil con la concentración de radón.

Por tanto, actualmente no existe una base sólida que demuestre la asociación entre el radón y otro tipo de enfermedad, pero sí numerosas evidencias que dan pie a futuros estudios.

2.2 Normativa

2.2.1 Legislación en España

En España, fue en 2001 cuando apareció por primera vez el radón en la legislación [35]. Este reglamento establece en los artículos 62 y 63 del título VII, disposiciones relativas a las fuentes naturales de radiación, donde se recogen las actividades laborales que deben ser objeto de estudio en cuanto a las dosis recibidas por los trabajadores.

Más tarde, nació el Proyecto Internacional del Radón creado en 2005 en el que participaron más de treinta países. Su objetivo fue identificar estrategias de reducción de radón y sobre todo la concienciación al público acerca de este gran desconocido. El resultado del proyecto fue la publicación en 2009 del Manual sobre el radón en Interiores [3], centrado en la exposición residencial al radón y resaltando la importancia que tienen sus efectos sobre la salud. Propone que los países tomen como

nivel de referencia 100 Bq/m³, sin sobrepasar en ningún caso los 300 Bq/m³ y recomienda que elaboren su propio programa de acción contra el radón.

Posteriormente, en 2011, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) publica la instrucción IS-33 *“Sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición natural”* [36], estableciéndose en ella unos criterios radiológicos con relación a la concentración de radón en los puestos de trabajo.

“La instrucción es aplicable a los titulares de las actividades laborales en las que existan fuentes naturales de radiación [...]” [36] Siendo el caso del radón una fuente natural de radiación como se ha expuesto.

Se fijaron los siguientes límites de referencia, siendo valores promedio anuales.

“ [...]”

- *< 600 Bq/m³: no es necesario control.*
- *600-1000 Bq/m³: se debe aplicar un nivel bajo de control.*
- *1000 Bq/m³: se debe aplicar un nivel alto de control.”* [36]

Sin embargo, para lugares de trabajo con elevada permanencia de personas, el nivel se estableció en 300 Bq/m³ de concentración media anual.

No fue hasta 2013 cuando la Unión Europea publicó la Directiva 2013/59/Euratom [37] donde se establecen las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiación ionizante.

En esta se reduce el promedio de concentración anual a 300 Bq/m³ y en el caso de superarse se tienen que tomar medidas de corrección. Además, se establece una dosis efectiva de 6 mSv a partir de la cual se deben aplicar medidas de protección radiológicas y una dosis máxima de 20 mSv anuales [38]. Aunque esta directiva ya debería haber sido transpuesta a la normativa nacional, continúa aun en proceso mediante la redacción del nuevo Reglamento de Protección de la Salud contra Radiaciones Ionizantes, asunto que genera bastante polémica. Ahora bien, al haber pasado el plazo de transposición, cualquier persona puede exigir que se apliquen los requisitos de la Directiva 2013/59/Euratom [37] pero todavía no se puede exigir su cumplimiento. Es por ello que, en este TFG se toman de referencia los valores de dicha directiva.

Resulta necesario mencionar que debido a la confusa normativa acerca de la dosis de radón permitida se ha contactado con Marta García-Talavera, jefa del departamento de radiación natural del CSN, quién ha permitido aclarar todos estos valores.

Por otro lado, en el artículo 103 de dicha directiva, insta a que los Estados establezcan un plan de acción nacional para el radón.

“1. En aplicación del artículo 100, apartado 1, los Estados miembros establecerán un plan de acción a nivel nacional para hacer frente a los riesgos a largo plazo debidos a las exposiciones al radón en viviendas, edificios de acceso público y lugares de trabajo para cualquier vía de entrada del radón, ya sea el suelo, los materiales de construcción o el agua. El plan de acción tendrá en cuenta las cuestiones expuestas en el anexo XVIII y se actualizará de forma periódica.

2. Los Estados miembros garantizarán que se adopten las medidas adecuadas para impedir que el radón entre en los edificios de nueva construcción. Entre estas medidas se podrán incluir requisitos específicos en los códigos de edificación nacionales.

3. Los Estados miembros identificarán aquellas zonas en las que se espere que el promedio anual de concentración de radón en un número significativo de edificios supere el nivel de referencia nacional correspondiente.”

Para cumplir parte de lo establecido, España aprobó en 2019 la modificación del Código Técnico de la Edificación, incluyendo la sección HS6 “Protección frente a la exposición al radón” al documento básico de salubridad [39].

En esta nueva sección, se establecen las medidas para limitar la entrada de radón y que esta no supere los 300 Bq/m³; medidas constructivas en el caso de edificios por construir y medidas de mitigación en el caso de edificios existentes.

Contiene tres apéndices, siendo el *apéndice a* cuestiones de terminología, el *apéndice b* una clasificación de municipios en función del potencial de radón y el último, el *apéndice c*, sobre la determinación del promedio anual de concentración de radón en el aire en los locales habitables de un edificio, utilizado a lo largo de este TFG.

2.2.2 El radón en la prevención de riesgos laborales

La ley de Prevención de Riesgos Laborales tiene como objetivos la mejora de las condiciones de trabajo y la protección de la seguridad y salud de los trabajadores en el lugar de trabajo [40].

En el artículo 3 “*Ámbito de aplicación*” manifiesta que: “*En los centros y establecimientos militares será de aplicación lo dispuesto en la presente Ley, con las particularidades previstas en su normativa específica*”. Esta ley obliga a llevar una evaluación sobre los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, así como a realizar controles periódicos en el caso de que el resultado de esta evaluación lo hiciera necesario. Si en los resultados de la evaluación se observasen situaciones de riesgo, se deberán llevar a cabo actividades preventivas para eliminar o reducir y evaluar ese riesgo.

Años después, en 2006, en el cuadro de enfermedades profesionales se reconoce el radón como un causante de enfermedades profesionales tales como el cáncer de pulmón [41].

Adicionalmente, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, a lo largo de los años, ha publicado diferentes Notas Técnicas de Prevención (NTP) respecto al radón, estas son guías de buenas prácticas, es decir, sus indicaciones no son obligatorias, pero sirven para resaltar la importancia del radón y concienciar a la población de sus riesgos, estas son:

- NTP 440: Radón en interiores. En la siguiente nota técnica se describen características y propiedades del radón que permiten su entrada en los edificios, indicando también medidas para reducir su nivel en interiores [10].
- NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud. Se da una visión general sobre los efectos del radón sobre la salud cuando este se inhala, detallando los mecanismos de acción de las radiaciones sobre las células [42].
- NTP 728: Exposición laboral a la radiación natural. Introduce las fuentes naturales de radiación, así como las tres series radioactivas y da unas medidas de prevención fundamentales [9].

2.2.3 Comisión Internacional de Protección Radiológica

Por otra parte, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) que tiene como objetivo mejorar la protección frente a la radiación, divulga periódicamente documentos científicos y guías de recomendación. En cuanto al radón, son numerosas las publicaciones sobre los riesgos y recomendaciones para la protección de las personas frente a este gas noble tanto en viviendas como en el trabajo.

De todas ellas, cabe destacar las siguientes:

- Publicación 65 sobre la protección contra el radón en viviendas y lugares de trabajo. Fue publicada en 1993 y establecía los límites de acción en cuanto a concentración y dosis de radón en viviendas (estableció un rango entre 200 y 600 Bq/m³ y una dosis entre 3 y 10

mSv, asumiendo 7000 horas al año en el domicilio) y en puestos de trabajo (entre 500 y 1500 Bq/m³ y la misma dosis, aunque con diferente factor de conversión, estimando 2000 horas anuales en el lugar de trabajo) [43].

- Publicación 115, de 2010 sobre el cáncer de pulmón relacionado con el radón. Mediante numerosos estudios epidemiológicos y por primera vez, estudios sobre el cáncer de pulmón por exposición al radón en interiores, esta publicación tiene como objetivo estimar el riesgo de padecer este tipo de cáncer. Asimismo, debido a los resultados hallados, se redujo el nivel de referencia de 600 Bq/m³ a 300 Bq/m³ [19].
- Publicación 126, de 2014, sobre protección radiológica ante la exposición de radón. Actualiza las recomendaciones de protección contra el radón, así como insta a los diferentes países a establecer un nivel de referencia nacional tan bajo como sea posible en el rango entre 100 y 300 Bq/m³ [44].
- Publicación 137, de 2017, relativa a los cálculos sobre las dosis estimadas de exposición al radón. Esta es la publicación más actualizada de la ICRP en cuanto a cálculos de dosis, ofrece un valor de conversión de concentración a dosis para diferentes situaciones, resultado de cálculos dosimétricos y estudios epidemiológicos [11].

2.2.4 Otros países

Tras la Directiva 2013/59/Euratom [37], los países europeos continuaron desarrollando sus políticas frente al radón, pero con unas normas básicas comunes. Entre todos ellos, Reino Unido e Irlanda se caracterizan por ser de los más avanzados en cuanto a normativa y acciones para enfrentar este gas.

Reino Unido dispone de su propia página web [45] específica del gobierno con toda la información relacionada con el radón. Actualmente, su límite establecido es inferior al de España, siendo de 200 Bq/m³ (Figura 2-7) y tienen como objetivo que ninguna vivienda tenga concentraciones superiores a los 100 Bq/m³.

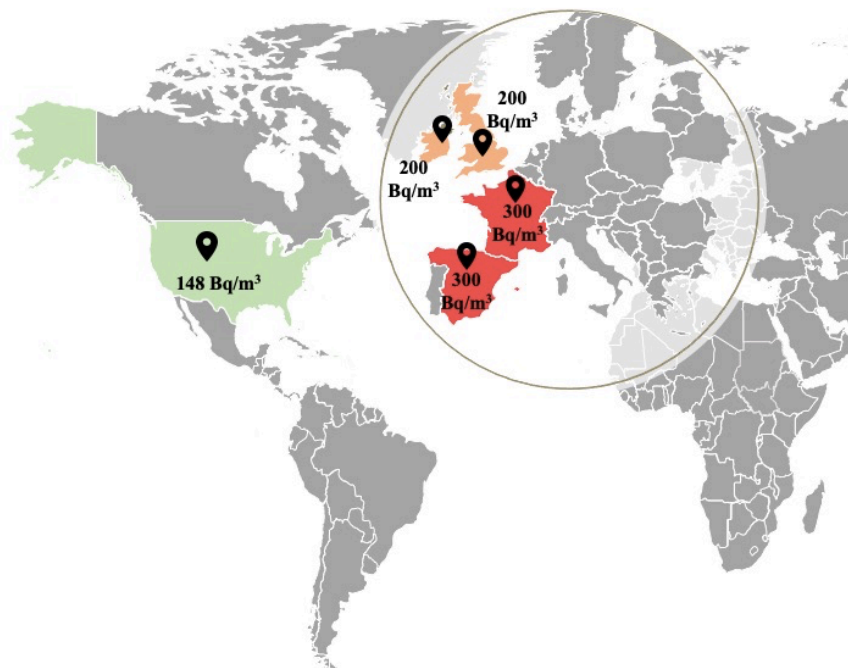


Figura 2-7 Límites de concentración de radón en diferentes países (elaboración propia)

En Irlanda, es la Agencia de Protección Medioambiental la encargada de la denominada Estrategia Nacional de Control de Radón. Es uno de los primeros países en intervenir, ya que desde 1998 deben aplicarse medidas contra el radón en la construcción de nuevos edificios, el límite establecido es el mismo que en Reino Unido, de 200 Bq/m^3 (Figura 2-7).

Francia, por su parte, desde 2004 tiene normativa para la protección en edificios públicos y va por el tercer plan nacional contra el radón, pero no fue hasta 2018 cuando bajó el límite de 400 Bq/m^3 a 300 Bq/m^3 (Figura 2-7). Además, se encargan de realizar inspecciones en instalaciones públicas como hospitales y colegios y según los resultados obtenidos, imponen medidas correctoras obligatorias.

Sin embargo, Estados Unidos es el país más avanzado en el control y protección de la población por radón. En 1988 se aprobó el acta de eliminación de radón interior y establece un nivel de referencia en 148 Bq/m^3 . Por otra parte, destinan gran cantidad de presupuesto a establecer programas de radón en los diferentes estados, informar al público y realizar mediciones en escuelas. Cabe destacar que todos los estados tienen una oficina encargada de protección contra el radón [46].

Por todo ello y para conseguir que la concentración de gas radón en interiores no suponga un peligro ni un riesgo, España debe seguir investigando y desarrollando nueva normativa, como se viene haciendo en los países pioneros en este ámbito.

2.3 Unidades de medida y dosis efectiva

Tras haber introducido tanto el radón y su radioactividad como los límites de la normativa, es necesario precisar las unidades en las que se mide su concentración y a qué hacen referencia, así como la importancia que tiene el cálculo de la dosis.

El bequerelio es la unidad del Sistema Internacional (SI) de radioactividad que mide una desintegración por segundo. En el presente trabajo, la concentración de radón se expresa en Bq/m^3 , es decir, en número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire.

Por otro lado, el radón al ser un gas radioactivo, se asocia su exposición a una dosis de radiación. Sin referencias en cuanto a las cantidades de dosis es difícil establecer un nivel de riesgo o medidas de protección radiológica, es por ello por lo que resulta imprescindible conocer la dosis anual efectiva del personal.

Para calcular esta dosis existen dos enfoques distintos, la dosis calculada a partir de estudios epidemiológicos y la calculada mediante dosimetría.

El estudio epidemiológico, también conocido como método de conversión de dosis, compara el daño estimado asociado a la exposición de radón por unidad de dosis efectiva. De este modo, la exposición al radón medida habitualmente en Bq/m^3 se convierte en una dosis efectiva medida en Sieverts (Sv). Esta conversión se determinó a partir de los estudios epidemiológicos de los supervivientes japoneses de la bomba atómica y de los mineros subterráneos. En la publicación 65 de la ICRP [43], la dosis efectiva de radón se obtuvo mediante este método.

Por otro lado, el enfoque dosimétrico se utiliza para calcular la dosis efectiva de cualquier tipo de radiación. Este método se basa en calcular primero la dosis absorbida, es decir, la energía transmitida por una radiación ionizante por unidad de masa del material irradiado. En cambio, los daños biológicos dependen también del tipo de partícula de la radiación incidente, conocido como ionización específica, por ejemplo, la radiación alfa causa daños más graves que la radiación gamma, ya que su ionización específica es mayor. Por tanto, a la dosis absorbida se le asigna un factor de ponderación (W_R) que depende del tipo de radiación y se obtiene la dosis equivalente. Sin embargo, no todos los órganos y tejidos son igual de sensibles a la radiación, de forma que los daños varían dependiendo del órgano o tejido irradiado [13]. Aplicando a la dosis equivalente un factor de peso a cada órgano (W_T) y tejido se obtiene la dosis efectiva, como se aprecia en la Figura 2-8.

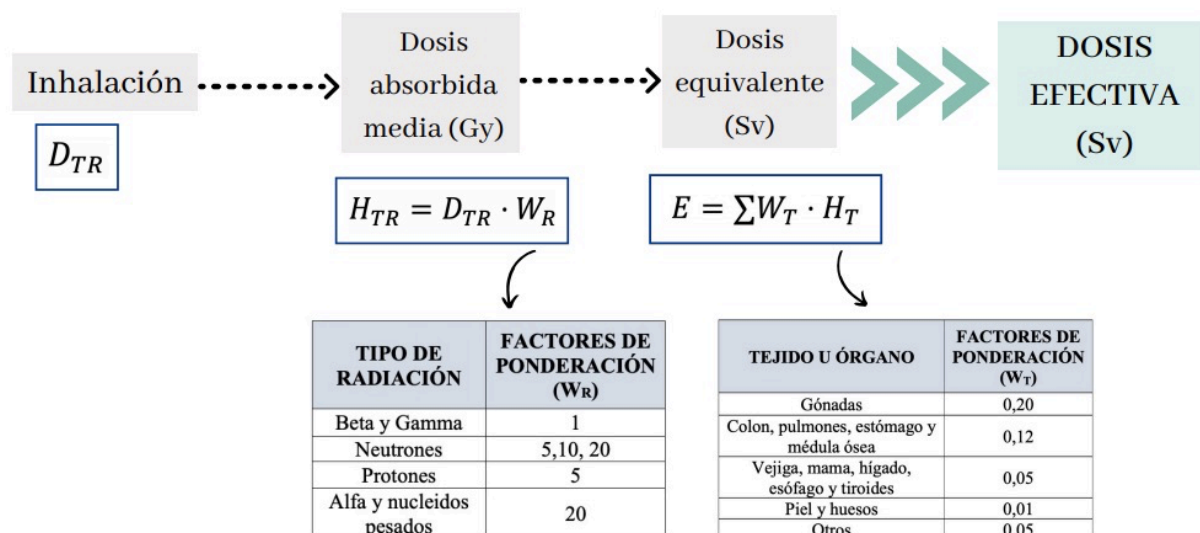


Figura 2-8 Cálculo de la dosis efectiva mediante modelo dosimétrico (elaboración propia)

2.4 Factores determinantes en la presencia de radón en interiores

Para poder cumplir la normativa vigente con medidas de mitigación apropiadas, además de saber qué es el radón y cómo afecta a la salud del ser humano, es necesario averiguar ¿cómo entra el radón en los edificios? Existen principalmente tres formas por las que el radón puede acceder a los edificios: mediante los materiales utilizados para la construcción, por el terreno en el que está construido el edificio y procedente de aguas subterráneas. El terreno en el que se encuentra el edificio, como se ha visto, contribuye en su mayoría a la entrada del radón en interiores.

Las posibles vías de entrada desde el terreno son, como se muestra en la Figura 2-9, a través de la solera a través de fisuras, grietas en los muros o incluso por los espacios alrededor de tuberías y cables.



Figura 2-9 Vías de entrada de radón en viviendas (tomada de [47])

El radón también puede llegar a través de los materiales de construcción, mediante materiales como ladrillos cerámicos, hormigones y yesos que contienen Radio-226. Generalmente, no suele

suponer el mayor riesgo ya que tienen una capacidad de liberar radón diez veces inferior a la que tiene el suelo [28] [47]. Por último, puede proceder de aguas subterráneas como pozos o manantiales. Una vez las rocas liberan radón en el agua y este se disuelve, puede acceder al interior de la vivienda por sumideros, desagües o grifos.

No solo es importante destacar las fuentes por las que el radón entra en los edificios, sino también hay que tener en cuenta que existen factores ambientales que influyen en las concentraciones de radón como la diferencia de presión, la humedad y la temperatura [48]. Por lo tanto, cabe esperar que las concentraciones de radón sufran grandes variaciones estacionales e incluso durante un mismo día [3].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción de la Escuela Naval Militar

Para comprender mejor el presente trabajo, se debe conocer primero la ubicación donde se va a llevar a cabo, así como una breve descripción sobre sus instalaciones.

La actual Escuela Naval Militar situada en Marín, municipio de Pontevedra, fue inaugurada en 1943. Durante su historia, han sido numerosas las reformas que se han llevado a cabo, incluso la construcción de cuarteles y edificios que en el pasado no existían.

Sin embargo, no ha sido posible obtener planos sobre la composición del suelo de la ENM para conocer los lugares en los que el radón pudiese tener mayor concentración. Por lo que la selección de los lugares donde se medirá la presencia de radón atiende a otros criterios.

Actualmente, la disposición y utilidades de los edificios es la indicada en la Figura 3-1. Las principales dependencias se describen a continuación:



Figura 3-1 Escuela Naval Militar (elaboración propia)

- *Edificio maniobra “Príncipe de Asturias” / Jefatura de Instrucción:* están los despachos de los diferentes oficiales aquí destinados y del Jefe de Instrucción.

- *Patio de aulas “Álvaro de Bazán”*: se encuentran diferentes aulas, así como sastrería, bazar, la biblioteca histórica, subdirección, Jefatura de Estudios, imprenta y servicios económico-administrativos. El edificio situado más al norte es el del Centro Universitario de la Defensa (CUD) con diferentes aulas y despachos de profesores. El edificio situado al este alberga la farmacia y Correos.
- *Dirección*: se encuentran los despachos del Comandante Director y Secretario de la ENM, entre otros.
- *Cuartel de alumnos “Almirante Francisco Moreno (A.F.M)”*: en este cuartel residen los aspirantes de primero y segundo y los guardiamarinas de primero. Se alojan en camaretas compartidas entre cuatro alumnos y disponen de un estudio cada dos camaretas. En la planta baja se encuentra la biblioteca de alumnos.¹
- *Cuartel de alumnos “Marqués de la Victoria”*: este cuartel es ocupado por los guardiamarinas de segundo y alféreces de fragata. Adicionalmente se halla el comedor de alumnos.²
- *Casino de alumnos “Almirante Bonifaz”*: en este edificio se encuentra además del casino de alumnos, Ayudantía Mayor y el Comandante de la Guardia. En la planta superior el salón de actos, una sala de proyecciones y diferentes cámaras de oficiales.
- *Cuartel de marinería “Méndez Núñez”*: se aloja el personal de marinería destinado en la ENM, utilizado mayoritariamente por el personal de guardia.
- *Enfermería y residencia de Suboficiales*
- *Residencia de Oficiales “Javier Quiroga”*
- *CECOM*: Estación radio y Centro de Comunicaciones.
- *Capilla*: donde tiene lugar la misa en la ENM, dos veces al día.
- *Galería de tiro*: utilizada para adiestramiento del personal, normalmente una vez por brigada cada cuatrimestre.
- *Factoría de subsistencias*: almacén de material, vestuario y comida de la ENM, además ejerce como arsenal de apoyo del patrullero Tabarca. Gestionado por el personal de Intendencia.
- *Barrio industrial*: se encuentran diferentes talleres, garaje, pañol de Infantería de Marina, lavandería y Jefatura de Mantenimiento.
- *Piscina y gimnasio “Guardiamarina Barrutia”*: pabellón deportivo de la ENM, donde se realizan las clases de piscina (cada grupo aproximadamente una hora semanal) y donde se pueden realizar diferentes actividades como fútbol sala, baloncesto o gimnasio.
- *Edificio “Isaac Peral”*: fundamentalmente aulas de clase y laboratorios. En la planta superior se encuentran algunos despachos de oficiales de la ENM.
- *Edificio de investigación CUD*: laboratorios de investigación del Centro Universitario de la Defensa. Además, en la planta de arriba del edificio se encuentra la banda de música donde realizan sus ensayos.
- *Núcleo de lanchas de instrucción*: dispone de material referente a las lanchas de instrucción (de mantenimiento, chalecos salvavidas, etc).

¹ Actualmente debido a reformas en el cuartel “Marqués de la Victoria” no se está siguiendo esta distribución.

² Actualmente debido a reformas en el cuartel “Marqués de la Victoria” no se está siguiendo esta distribución.

- *P-28 Tabarca*: Patrullero Tabarca con base en la ENM.

3.2 Mediciones de radón

3.2.1 Equipo de medición

El dispositivo de medición utilizado en este TFG es el medidor “Radon Eye RD 200” (Figura 3-2) del tipo de cámaras de ionización o medidores en continuo y fabricado por FTLAB, empresa surcoreana. Éste tiene un margen de error del 10%, un rango de medición desde los 7 Bq/m³ hasta los 3700 Bq/m³ y una capacidad de almacenamiento de datos de hasta un año [49].

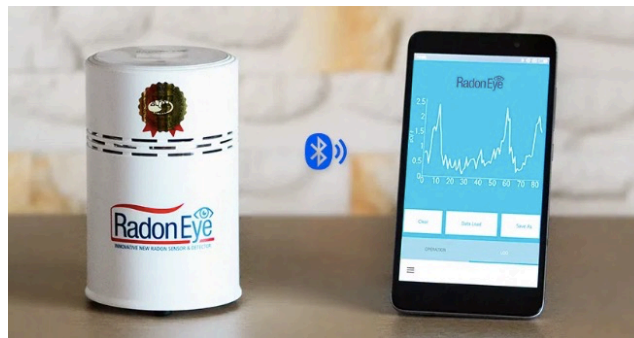


Figura 3-2 Medidor Radon Eye RD 200 y aplicación móvil "Radon Eye" (tomada de [49])

Estos equipos funcionan tomando muestras a intervalos regulares. En este caso, recoge medidas cada diez minutos y realiza la media de estas muestras cada hora, el número calculado aparece en la pantalla del dispositivo.

La utilización de estos equipos y la descarga de los datos generados es sencilla e intuitiva. Para gestionar los ajustes y los datos obtenidos en un periodo de tiempo, se utiliza la aplicación “RadonEye” (Figura 3-3), disponible tanto para Android como Iphone. Mediante un Smartphone conectado a Bluetooth se puede enlazar con los medidores, esto permite la visualización de la medición actual además de la opción de graficar los datos desde la colocación del dispositivo hasta el momento o la descarga y envío de un fichero con los datos obtenidos en formato “.txt” por correo electrónico u otros medios. La aplicación permite también la configuración de alarmas a partir de cierto valor medido o el intervalo de toma de muestras.



Figura 3-3 Funciones aplicación móvil Radon Eye (elaboración propia)

3.2.2 Colocación del equipo y periodo de medición

En cuanto a los criterios para la ubicación de los medidores en un espacio interior, se han seguido los expuestos en el punto 3.2 del apéndice C del DB-HS 6 “Protección frente a la exposición al radón” del Código Técnico de la Edificación [21], siendo estos los siguientes:

- *Los detectores se situarán a una altura entre 50 y 180 cm sobre el nivel del suelo, a una distancia de más de 30 cm de paredes o puertas, y a más de 10 cm de otros objetos.*
- *No deberán colocarse en el interior de elementos cerrados, como armarios, cajones o vitrinas.*
- *No deberán colocarse próximos a corrientes de aire (ventanas, ventiladores) ni exponerse directamente al sol o a otras fuentes de calor.*
- *Si fuera necesario colocarlos en lugares de humedad elevada ($HR > 70\%$) y se tratara de detectores alterables por ello según la especificación del fabricante, los detectores deberán recubrirse con una membrana que los proteja de la humedad sin interferir en el resultado de la medida de radón.*

Estos criterios se han seguido en todas las mediciones realizadas excepto en algunos casos donde no ha sido posible colocar el dispositivo a más de 10 cm de otros objetos debido a la distribución y objetos en la sala.

Asimismo, en el punto 3.3 [21] del mencionado apéndice se definen las condiciones durante la exposición, indicadas a continuación y especificando las modificaciones llevadas a cabo.

- En el periodo de medición los hábitos de ocupación deben ser los habituales. Además, en el caso de existir medios de protección frente al radón estos deben estar en régimen habitual de funcionamiento.

Esta indicación se ha cumplido en todas las mediciones a excepción de la primera toma de muestras durante el periodo festivo de navidad, detallado en el apartado 3.3 de este TFG. Si bien, es cierto que debido a la situación provocada por la Covid-19, los hábitos de ventilación han cambiado, manteniendo las estancias más aireadas.

- El edificio debe mantenerse cerrado (ventanas y puertas) en caso de ser un edificio no ocupado.

No se ha realizado ninguna medición en edificios no ocupados.

- La duración de cada periodo de medición debe ser de mínimo dos meses.

Según la Xunta de Galicia [47] para obtener una primera medición y conocer el nivel de radón, se permite un plazo corto de tiempo, por lo que se realizaron medidas durante un periodo mínimo de siete días. En todo caso, cuando la disponibilidad lo permita, se recomienda un periodo de dos meses.

- Si el edificio está situado en alguna de las zonas climáticas de invierno (definidas en el documento DB-HE “Ahorro de energía” [50]) el periodo de medición debe ser preferiblemente en la temporada de calefacción.

La Escuela Naval Militar al situarse en la provincia de Pontevedra, corresponde a una zona climática de invierno, por lo que esta directriz también se ha seguido, siendo los meses de medición (de diciembre a febrero), meses en los que la calefacción ha permanecido encendida.

3.2.3 Criterios para la selección de espacios de medición

Siguiendo igualmente el apéndice C del DB-HS 6 “Protección frente a la exposición al radón” del Código Técnico de la Edificación [21], los detectores deben localizarse:

- En las plantas donde exista mayor probabilidad de presentar niveles elevados de radón.
- En estancias donde haya permanencia de personas.
- Dentro de la estancia, en función de la configuración de ésta teniendo en cuenta los sistemas de calefacción, ventilación y refrigeración.

Para lograr realizar un mapa lo más amplio posible de la concentración de radón en la Escuela Naval Militar, los criterios para la selección de los puntos de medición han sido los expuestos a continuación, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente.

El primer criterio seguido ha sido la colocación de medidores en aquellas estancias con permanencia de personas, ya que debido a la naturaleza de este TFG es de gran importancia conocer las concentraciones donde haya alumnos o personal trabajando.

Asimismo, es cierto que dentro de la estancia a medir se ha tenido también en cuenta la situación de las ventanas, para que tuviese la menor influencia posible en la medición.

Posteriormente y como se ha visto, el radón, al ser más denso que el aire y emanar del subsuelo, se acumula en mayores concentraciones en los sótanos y plantas bajas. Por ello y al ser el terreno la fuente principal de radón, el siguiente criterio ha sido la elección de plantas bajas donde se estima que la concentración vaya a ser más alta. Cabe destacar que no todos los lugares medidos han sido plantas bajas, debido al primer criterio de selección.

Finalmente, debido a la duración temporal de este TFG, se ha dado prioridad a zonas que no se han medido previamente en otros TFG [7] [8], siendo estas las siguientes: el edificio de investigación, el despacho 115 del CUD, el aula 40 del edificio Isaac Peral y el comedor de alumnos.

3.3 Estancias medidas

Una vez explicado el dispositivo, así como el método utilizado para realizar las mediciones y los criterios para determinar las zonas de medida, se detallan a continuación los puntos de la ENM escogidos y las fechas en las que se han llevado a cabo las mediciones.

Los periodos de medición se detallan en la Figura 3-4 indicando el lugar de medición. Para una mejor visualización de estos, se añaden además los planos de los lugares seleccionados para la toma de muestras.

	DICIEMBRE												ENERO 2021												FEBRERO														
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	AULA 14 AULA 17																																						
2													AULA 18 AULA 10																										
3													AULA 15 AULA 1 AULA 9																										
1"	AULA 21																																						
4													SASTRERIA CORREOS BIBLIOTECA HISTÓRICA																										
5													CAI COCINA JEFATURA INSTRUCCIÓN FARMACIA																										
6													SALA ELECTRÓNICA AULA 43 SUBOFICIAL DE GUARDIA LABORATORIO MOTORES																										
7																									PISCINA PABELLÓN DEPORTIVO SEMINARIO BIBLIOTECA CASINO ALUMNOS														
8																									JEFATURA MANTENIMIENTO CAMARETA A.F.M ESTUDIO A.F.M AULA 56 LAVANDERÍA														

Figura 3-4 Fechas de medición (elaboración propia)

- PRIMER PERIODO: 18 diciembre 2020 – 28 diciembre 2020 y del 18 diciembre 2020 – 5 enero 2021.
- SEGUNDO PERIODO: 28 diciembre 2020 – 5 enero 2021

○ TERCER PERIODO: 5 enero 2021 – 12 enero 2021

Los tres primeros periodos de medición corresponden a las vacaciones de navidad, en que se escogieron aulas situadas en el Patio de Aulas donde normalmente los alumnos tienen clases programadas y debido a la actual situación provocada por la Covid-19 se ventilan con mayor frecuencia, por lo que, de haber medido en periodo lectivo, el valor no sería el propio de invierno. Ésta ha sido la razón principal para priorizar estos puntos de medida, ya que es donde los alumnos pasan gran cantidad de horas.

Durante el primer periodo se realizan mediciones en el aula 14, 17 y 21. Posteriormente los dos primeros medidores se cambian al aula 10 y 18. Sin embargo, en el aula 21 se observan altos valores de concentración, por lo que se decide dejar hasta el día 5 de enero de 2021. A continuación, se ubican en las aulas 15, 1 y 9 (Figura 3-5).

○ CUARTO PERIODO: 12 enero 2021 – 20 enero 2021

Una vez finalizadas las mediciones en las aulas, se mide en sastrería, Correos y la biblioteca histórica (Figura 3-5). En las tres estancias trabajan dos o más personas en horario laboral, lo que motivó situar los medidores en estos lugares.

Tras conocer sus hábitos de ventilación, coinciden en que, debido a la condición actual intentan mantener las ventanas abiertas, contrariamente a un invierno de un año normal.

En Correos, la puerta permanece abierta y la ventana ligeramente a lo largo de las horas de trabajo, igual que en la biblioteca histórica. En Sastrería, únicamente tienen la puerta abierta.

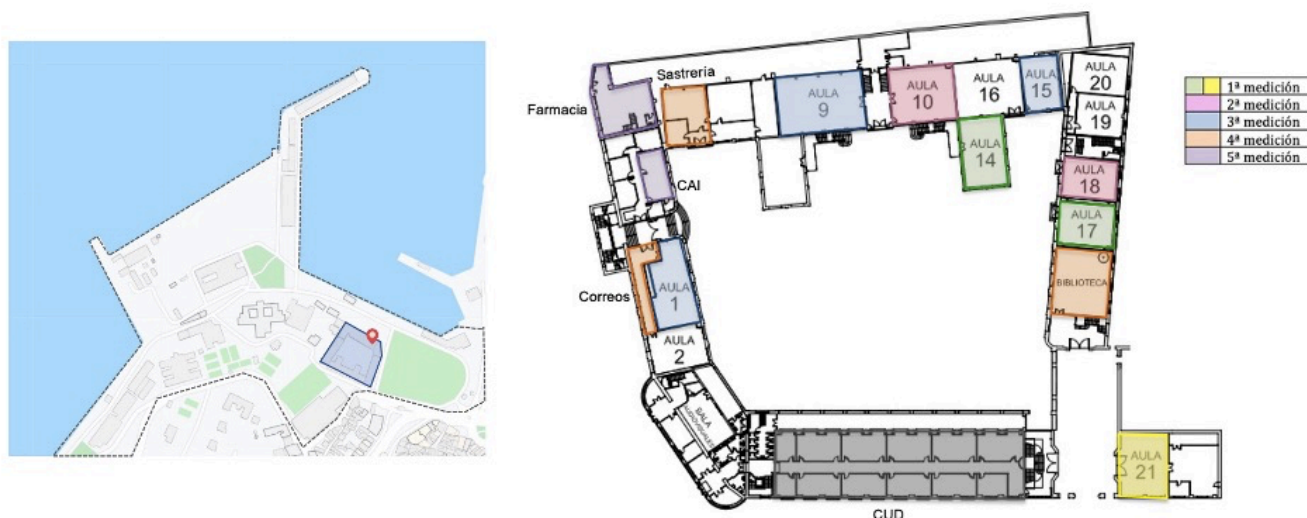


Figura 3-5 Patio de Aulas – Puntos de medición (I) (elaboración propia)

○ QUINTO PERIODO: 20 enero 2021 – 28 enero 2021

Inicialmente se dispone de tres medidores, pero a partir de este momento se consigue un cuarto dispositivo que permite por tanto la toma de muestras en cuatro estancias diferentes a la vez.

El día 20, al cambiar el medidor de Correos se aprecian elevadas concentraciones de radón, por lo que se decide, debido a su proximidad y ocupación de personal trabajando, medir en la farmacia y en el Centro de Apoyo Informático (CAI) (Figura 3-5). Después de haber completado prácticamente todo el Patio de Aulas, se pasa a otros puntos de medición, situándose los otros dos medidores en cocina y en Jefatura de Instrucción (Figura 3-6 y Figura 3-7).

En el caso de la farmacia, el CAI y el despacho de Jefatura de Instrucción, la ventilación que realizan es escasa. Además, por contacto con el personal de dichas estancias se conoce que la ventilación se debe a la situación actual provocada por el coronavirus, coincidiendo que en una situación normal en periodo invernal no se realizaría ventilación. En cambio, en la cocina permanecen todas las ventanas y la puerta abiertas en horario laboral.

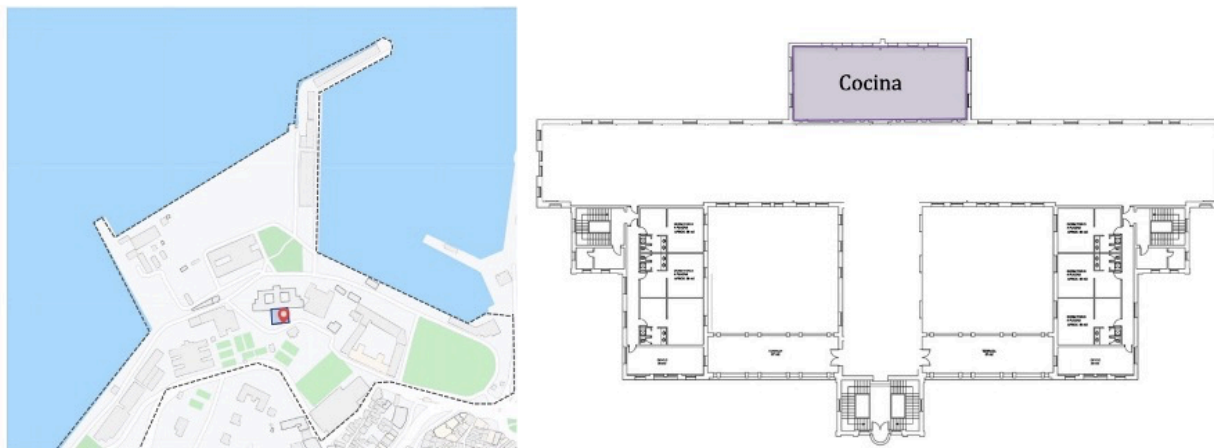


Figura 3-6 Planta baja "Marqués de la Victoria" - Puntos de medición (II) (elaboración propia)



Figura 3-7 Planta baja edificio "Príncipe de Asturias" - Puntos de medición (III) (elaboración propia)

- SEXTO PERIODO: 28 enero 2021 – 5 febrero 2021

En el transcurso de este periodo de toma de muestras se colocan los medidores en el cuarto del Suboficial de Guardia (Figura 3-8) y en el edificio Isaac Peral. Debido a las grandes dimensiones de la planta baja del Isaac Peral, se decide dejar tres medidores, uno en la parte norte, en la parte sur y en el centro con el fin de obtener valores más precisos sobre la concentración de radón en este edificio. Concretamente, se sitúan en el laboratorio de motores, en el aula 43 y en el taller de electrónica donde hay personal trabajando (Figura 3-9).

En cuanto a la ventilación en estos puntos, en el laboratorio prácticamente no se abren las ventanas, en el aula 43 la normativa Covid obliga a tener durante el horario de clases las ventanas abiertas y en el taller de electrónica mantienen una ventana abierta menos de la mitad de la jornada.

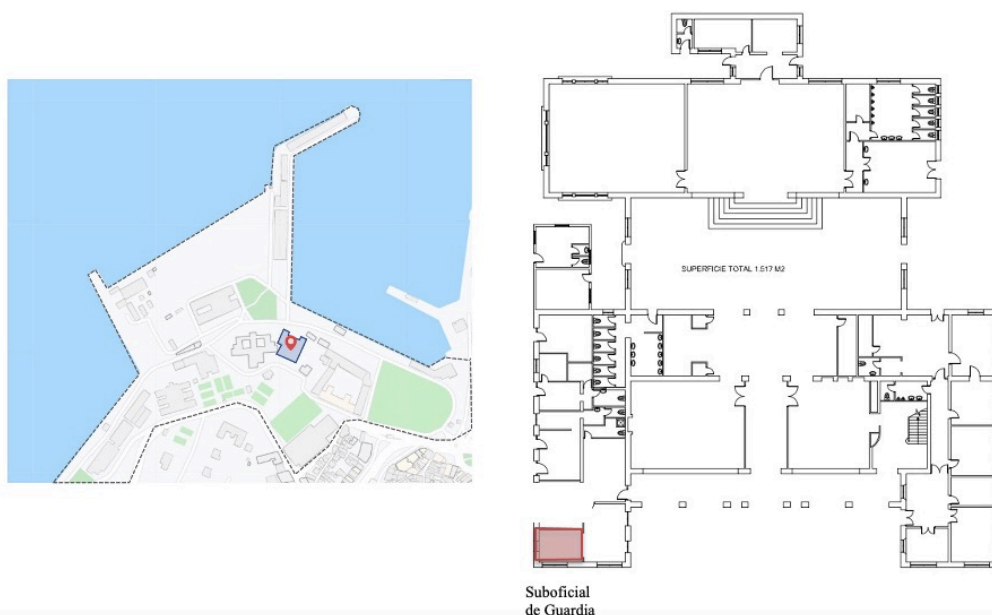


Figura 3-8 Edificio "Almirante Bonifaz" - Puntos de medición (V) (elaboración propia)

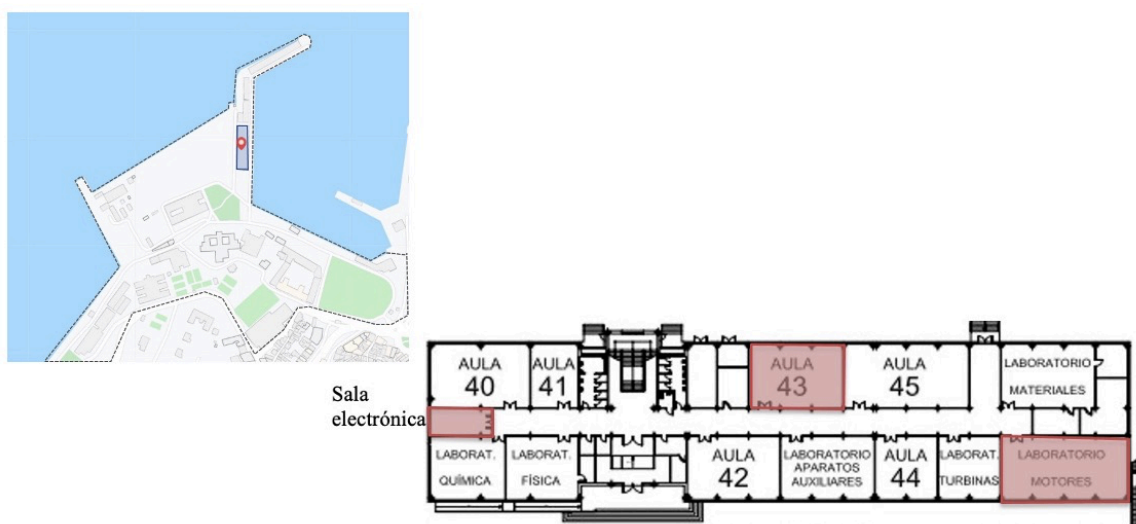


Figura 3-9 Planta baja edificio "Isaac Peral" - Puntos de medición (IV) (elaboración propia)

- SÉPTIMO PERIODO: 5 febrero 2021 – 15 febrero 2021

En este periodo se escoge el casino de alumnos ya que, es una estancia en la que pasan bastante tiempo los alumnos, destacando que durante el periodo de medición permaneció cerrado. Además, se colocan medidores en la piscina y el pabellón deportivo GM Barrutia, dado que, mínimo todos los alumnos de la ENM pasan una hora a la semana en la piscina. Por último, se decide medir también en un seminario de la biblioteca del cuartel Almirante Francisco Moreno. Se intuye que los valores en este seminario van a resultar más altos que si se hubiese colocado el medidor en la parte central de la biblioteca ya que este está cerrado y sin ventilación, al contrario que en el centro, donde las ventanas están abiertas. Se decide así porque de esta forma la medición será el peor de los casos y en un año normal no se mantendrían las ventanas tan abiertas en la parte central. Se considera importante esta

medida debido a que los dos primeros cursos de alumnos permanecen todas sus horas de estudio en la biblioteca además de haber trabajadores en su interior.

- OCTAVO PERIODO: 15 febrero 2021 – 26 febrero 2021

En el último periodo de medición se decide colocar los medidores en un aula de la planta de arriba del edificio Isaac Peral, la 56 (Figura 3-10), ya que se imparten gran número de clases en esa aula.

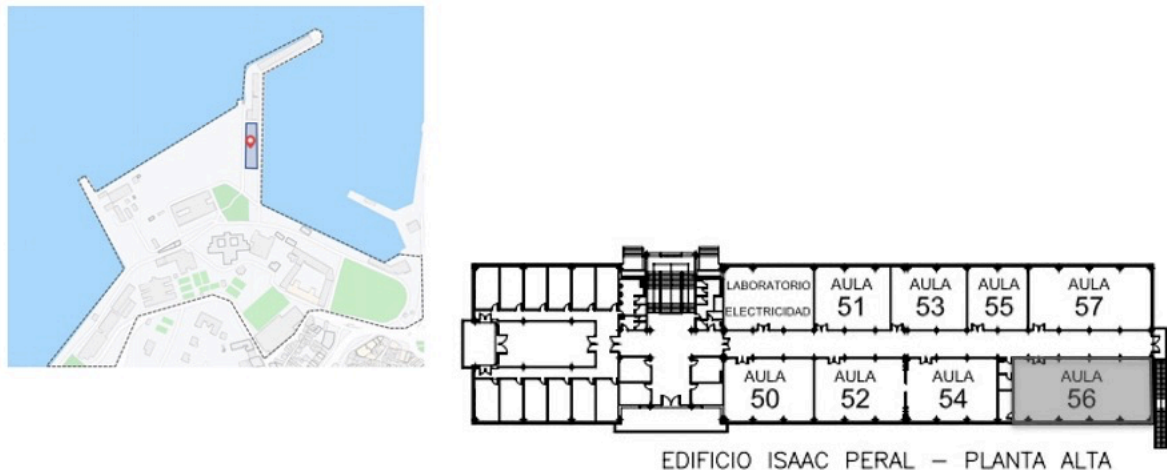


Figura 3-10 Planta alta edificio "Isaac Peral" - Puntos de medición (V) (elaboración propia)

Además, debido a que los alumnos pasan muchas horas en su camareta, se considera fundamental medir en una de ellas, seleccionando una de la primera planta del cuartel A.F.M y cabe destacar que esa camareta permaneció vacía y sin ventilación durante la medición. Por otro lado, se mide también en la lavandería y en jefatura de mantenimiento, donde trabaja diferente personal de la ENM.

Es preciso mencionar, que como se puede observar en la Figura 3-4, durante este periodo de tiempo se realizan cinco mediciones en lugar de cuatro. Esto se debe a que, gracias a otro alumno y a la naturaleza de su TFG, se realizaron mediciones en conjunto en el estudio del cuartel A.F.M que resultan de interés para este trabajo dado que, casi todos los alumnos realizan sus horas de estudio en ellos.

En cuanto a las mediciones del comedor de alumnos situados en el cuartel Marqués de la Victoria, edificio del Centro Universitario de la Defensa y el aula 40 del Isaac Peral se utilizarán las mediciones realizadas en [7] [8].

4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO Y RESULTADOS

4.1 Desarrollo de la metodología de cálculo

En los siguientes apartados se desarrolla el método llevado a cabo para obtener los diferentes resultados que se expondrán más adelante. En primer lugar, se explica la obtención de las medias anuales de concentración de radón con el fin de realizar un mapa de la ENM, además de servir también junto con las horas de exposición del personal en las diferentes estancias para, finalmente, calcular la dosis efectiva y proponer ciertas medidas de gestión de riesgo según los resultados obtenidos.

4.1.1 Estimación de la concentración media anual de radón

Mediante la aplicación RadonEye, se descargan los datos y se ha elaborado una plantilla en Microsoft Excel para facilitar el análisis sistemático de los mismos (Figura 4-1).

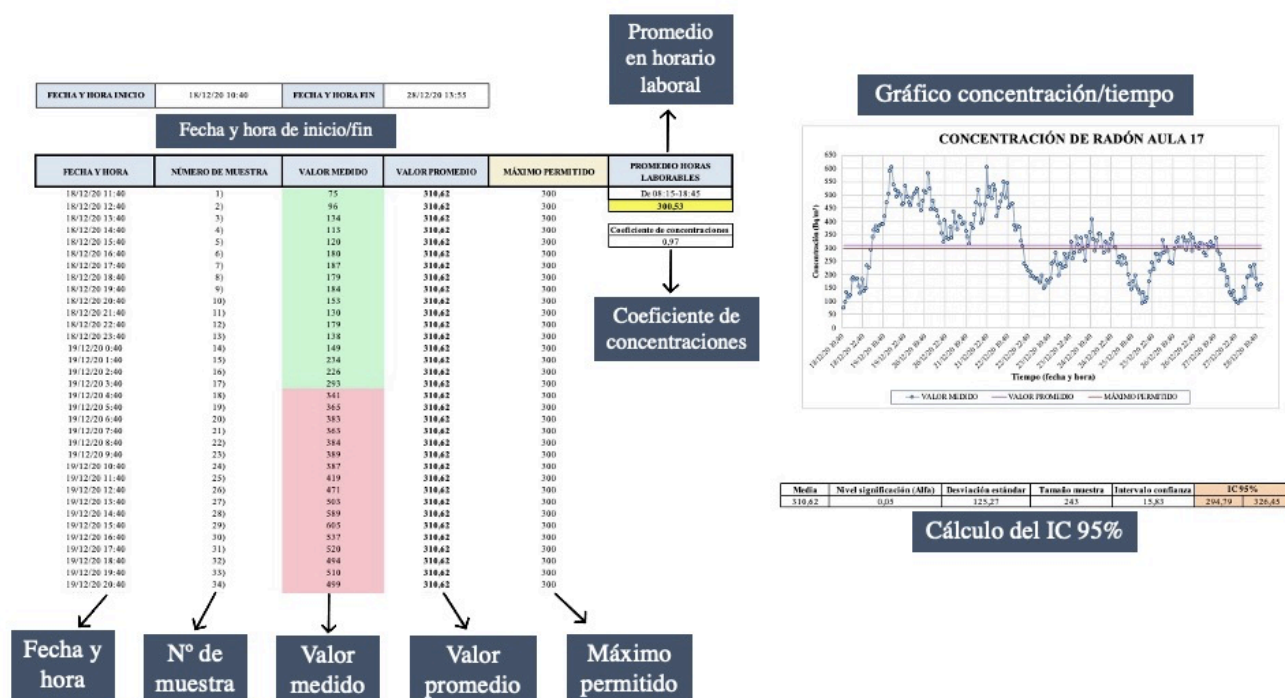


Figura 4-1 Fragmento de la medición del aula 17 (elaboración propia)

En la parte superior de la plantilla (Figura 4-1) se muestra tanto la hora como el día de inicio y fin del periodo en el que se realiza la medición. En la tabla, la primera columna corresponde con la fecha

y hora de cada muestra y a su derecha, en la columna siguiente, se indica el número de muestra. La tercera columna corresponde con el valor medido que proporciona el equipo cada hora, que se ha resaltado mediante el siguiente código de colores: la celda se colorea en verde si el valor es inferior a 300 Bq/m^3 (valor máximo permitido por la normativa) y en rojo si el valor supera dicho límite. La columna sucesiva muestra la media de todos los valores medidos. En el cuadro situado a la derecha de la tabla se calcula la media de la concentración durante el horario laboral y el coeficiente de concentraciones (desarrollado más adelante). Con todos los valores anteriormente mencionados, se realiza una gráfica para mostrar la información de manera más visual en la que se representan los valores medidos en función del tiempo. Asimismo, debajo de la gráfica, se realiza la estimación del intervalo de confianza del 95%. Este cálculo es de utilidad para acotar el rango de valores en el que se encuadran el 95% de las mediciones realizadas.

A fin de poder calcular la dosis a la que se expone cada individuo, de conocer si se cumple la normativa establecida y de realizar un mapa de concentraciones de la ENM, es necesario hallar la concentración media anual de radón en cada lugar. Por ende, ésta se ha estimado a partir de las mediciones realizadas. Se conoce que, en lo que respecta a las variaciones estacionales suele haber un factor de 1,5 de diferencia entre los mínimos de verano y los máximos de invierno. [51] Sin embargo, todas las mediciones se han realizado en periodo invernal, por lo que los resultados obtenidos serán fruto del análisis del peor de los escenarios. Asimismo, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una estimación preliminar del riesgo al que se exponen los alumnos y personal de la ENM, de manera que la influencia de la variabilidad interanual no se considera.

Por otro lado, el radón presenta una alta variabilidad temporal observándose ciclos diarios y resultando en muchos casos los valores nocturnos más altos que los diurnos. Del mismo modo, durante los periodos en que el lugar de trabajo permanece cerrado o sin ventilación, como los fines de semana o en un periodo invernal habitual, los niveles de radón suelen ser también mayores que los habituales.

Debido a todo ello, se ha considerado calcular un factor de corrección (“coeficiente de concentraciones”) para cuantificar la diferencia entre la concentración durante el horario laboral y la concentración de radón medida a lo largo de todo el periodo. Gracias al cálculo de este coeficiente se han podido determinar tres situaciones posibles para realizar la media de concentración anual de cada estancia.

En el primer caso, cuando el coeficiente resulta casi o igual a uno (el coeficiente se encuentra entre 0,90 y 1), significa que la concentración durante el horario laboral y la concentración de radón durante el periodo medido es prácticamente idéntica. Esta situación ha sucedido en la mayoría de las aulas donde se realizó la medición en periodo vacacional, sin ventilación, propio de un año normal. Aunque la diferencia en los resultados no será significativa, en este caso, se tendrá en cuenta la concentración media en horario laboral, para que esta sea lo más realista posible. De igual forma que cuando el coeficiente ha resultado ser mayor que uno, es decir, cuando la concentración durante horario laboral es mayor a la concentración media.

Por último, en alguno de los lugares en los que no se realizó la medición durante el periodo de navidad, este coeficiente es muy significativo, llegando a ser inferior a 0,50. Queda por tanto en evidencia que debido a la actual situación provocada por la Covid-19, que obliga a tener los espacios de trabajo con mayor ventilación que la habitual en época de invierno, la concentración media en horario laboral resulta muy inferior a la concentración media y a la concentración en periodo nocturno. En los resultados, se expondrán ambas situaciones con el objeto de mostrar la diferencia de riesgo asociado a cada una de las concentraciones.

4.1.2 Cálculo de las horas de exposición

El siguiente paso para calcular la dosis a la que se expone el personal de la ENM es conocer además de la concentración media anual en cada lugar, las horas a las que permanecen expuestos durante el año.

4.1.2.1 Alumnos

Es indiscutible la dificultad para estimar el horario de los alumnos por lo que, para las horas de clase se ha seguido otro procedimiento que se explica a continuación. Se ha decidido que, debido a la diferencia de aulas entre los distintos cursos de la ENM y por consiguiente la dosis a la que se encuentran expuestos, se va a realizar el cálculo para un grupo de cada curso, es decir, se ha escogido el grupo que más horas pasa en las aulas con mayor concentración. De este modo, se realiza el cálculo para el peor de los escenarios, de forma que, si el grupo escogido está por debajo de la dosis de referencia, los demás grupos también.

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los cálculos se debe primero explicar cómo está estructurado el año académico. Cabe destacar que estas estimaciones han resultado más fáciles este curso 2020-2021 ya que, debido a la situación provocada por el coronavirus, los alumnos permanecen, según el grupo, la mayor parte del tiempo en las mismas aulas.

El curso está dividido en dos cuatrimestres, el primero de septiembre a diciembre y el segundo de enero a mayo, excepto quinto curso que finaliza las clases en marzo. Cada cuatrimestre tiene dos tipos de semana diferentes "semana A" y "semana B" en las que la división de clases cambia ligeramente. Se debe mencionar que, únicamente se ha considerado el periodo desde septiembre a mayo, es decir hasta el embarque de prácticas, marzo en el caso de quinto curso ya que los días en julio tras volver del embarque no se tienen en cuenta debido a que durante ese periodo no hay horario de clases y resulta inviable estimar un horario realista.

Con el fin de llevar a cabo este cálculo, se utiliza una hoja de Microsoft Excel para cada curso y se utiliza de guía el horario de la página del CUD (Figura 4-2) [52] para conocer la distribución de aulas por curso de cada tipo de semana, así como el número total de semanas por cuatrimestre (Figura 4-3).

ASPIRANTES DE PRIMERO. SEGUNDO CUATRIMESTRE. SEMANA B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
LUNES										MARTES										MIÉRCOLES										JUEVES										VIERNES																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
01		02		03		04		05		06		07		08		09		10		11		12		01		02		03		04		05		06		07		08		09		10		11		12		01		02		03		04		05		06		07		08		09		10		11		12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
0815-0905	QUÍMICA G1G2G3G4				ESTADÍSTICA G5				L.G.E MPR 16				ESTADÍSTICA IM1IM2				FÍSICA II G1G2G3G4				INTR.GESTIÓN EMPRESARIAL G5G6IM				FÍSICA II G1G2 SEMINARI 55-57				ESTADÍSTICA G3G4				INFORMÁTICA A G5G6				QUÍMICA IM				ESTADÍSTICA G1G2				ALGEBRA G5				L.G.E MPR 16				INFORMÁTICA ESTU DIO				FÍSICA II IM SEMINARI 52				INFORMÁTICA A G1G2				QUÍMICA G3G4				ALGEBRA G5G6IM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	55-57				52				52				52				55-57				55-57				54				18				18				17-18				44				17				16				18				52				54				17-18				44				5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
0910-1000	QUÍMICA G1G2G3G4				L.G.E MPR 16				ESTADÍSTICA IM1IM2				FÍSICA II G1G2G3G4				INTR.GESTIÓN EMPRESARIAL G5G6IM				ESTU DIO				ESTADÍSTICA G3G4				INFORMÁTICA A G5G6				QUÍMICA IM				ESTADÍSTICA G1G3				L.G.E MPR 16				ALGEBRA G5				LINGÜA INGLESA_I Grupos por 57.11.19.21.51				INFORMÁTICA A G1G2				QUÍMICA G3G4				ALGEBRA G5G6IM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	55-57				52				52				55-57				54				52				18				17-18				44				18				16				4				5				57.11.19.21.51				17-18				44				5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1015-1105	ALGEBRA G1G2G3G4				INFORMÁTICA INGENIERÍA G5G6IM				INFORMÁTICA ESTU DIO				FÍSICA II G1G2G3G4				LINGÜA INGLESA_I Grupos por 57.11.19.21.51				CUD				LINGÜA INGLESA_I Grupos por 57.11.19.21.51				MAN. NAVEG G5G6				FÍSICA II IM				ALGEBRA G1G2G3G4				QUÍMICA G5G6				INFORMÁTICA IM																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	55-57				52				52				55-57				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52				52		

Figura 4-2 Ejemplo de horario Aspirantes 1º "Semana B" (tomada de [52])

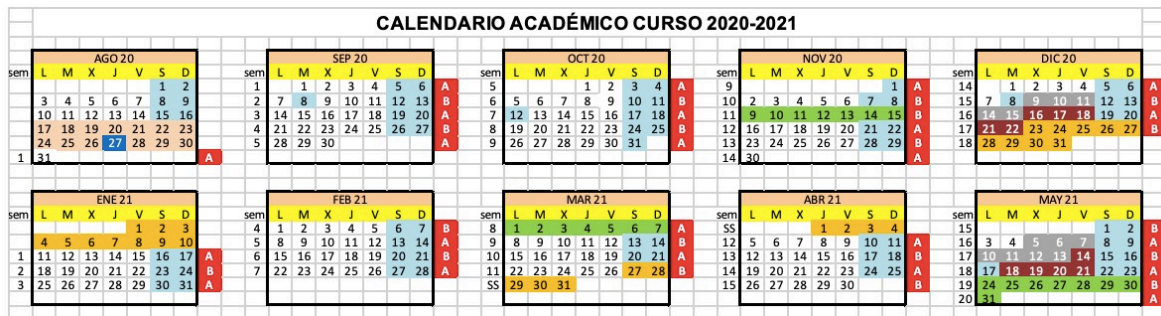


Figura 4-3 Calendario académico 2020-2021 (tomada de [52])

Por otro lado, las horas de clase duran cincuenta minutos las de por la mañana y cuarenta y cinco las clases de por la tarde, al haber más del doble de clases por la mañana, se han supuesto todas de cincuenta minutos, multiplicando entonces cada hora por 0,83.

Asimismo, cada cuatrimestre cambia el horario. Analizando detalladamente cada uno, se llega a la conclusión de que en los únicos cursos en los que difiere el horario del primer cuatrimestre y el segundo es primero y quinto curso, en los que se realizan los cálculos para ambos cuatrimestres. No obstante, para segundo y cuarto curso, se supone el primer cuatrimestre idéntico al segundo en cuanto a la distribución de aulas.

En los cálculos no se tiene en cuenta a los alumnos de tercer curso dado que en noviembre comenzaron su crucero de instrucción a bordo del Juan Sebastián Elcano y regresan en el mes de julio, por lo que no se consideran representativos los escasos meses en los que estuvieron en la ENM.

Ahora bien, no solo existen las horas de exposición en las aulas, por lo que se realiza una encuesta a través de la plataforma de formularios de Google [53] a los diferentes cursos para obtener la media de estancia en lugares como el casino, la piscina, el gimnasio y el estudio, fuera de las horas contempladas en el horario. La encuesta realizada se puede consultar en el Anexo II: Encuesta. Con las respuestas de 135 alumnos se analizan los resultados mediante Excel, obteniéndose las medias por cada curso, mostradas en la siguiente Tabla 4-1.

	Aspirantes de 1º	Aspirantes de 2º	Guardiamarinas de 2º	Alféreces de Fragata / Alféreces
Casino	8	4	4	4
Piscina	1	1	1	1
Pabellón deportivo	1	1	1	1
Estudio (después de actividades)	3	3	2	3
Estudio (fin de semana)	10	12	12	10

Tabla 4-1 Horas de permanencia en diferentes estancias según el curso (elaboración propia)

Prácticamente son los mismos valores para todos los cursos a excepción del casino, en el que se ve una clara diferencia de permanencia entre el primer curso y el resto.

De igual forma, se considera también la permanencia en la camareta. Como este dato es muy variable, únicamente se tienen en cuenta las horas de sueño ya que la mayoría del tiempo solo se utiliza para dormir. Se estiman seis horas al día entre semana y siete los fines de semana, ya que, al poder levantarse más tarde, los alumnos suelen dormir un poco más los fines de semana. Para el valor de concentración de radón, se selecciona el valor de una sola camareta del cuartel A.F.M como

muestra representativa. Al ser este curso un año diferente, se realizan los cálculos como si todos los alumnos de la escuela estuviesen alojados en este cuartel.

En cuanto al comedor, aproximadamente cada alumno pasa treinta minutos en cada comida, es decir, en el desayuno, comida y cena, por lo que al día es en total una hora y media. Se asume que todos los alumnos realizan las tres comidas en el comedor tanto entre semana (obligatorio desayuno y comida, siendo la cena voluntaria) como el fin de semana, en el que únicamente el desayuno es obligatorio. Se sabe que hay alumnos que probablemente no realicen las comidas y cenas el fin de semana o no cenén entre semana, pero en el peor caso se estará sobreestimando una cantidad de la dosis, situándonos en el escenario más perjudicial.

Se hallan finalmente las horas de exposición por grupos de alumnos de cada curso, presentadas mediante una serie de tablas (Tabla 4-2, Tabla 4-3, Tabla 4-4 y Tabla 4-5).

	ASP 1º (Grupo 6)
	Número de horas anuales
AULA 55-57	17,4
AULA 44	23,2
AULA 18	29,1
AULA 52-54	122
Laboratorio Física	11,6
AULA 17	23,2
Biblioteca A.F.M	1005,8
Laboratorio electrónica	21,6
AULA 15	21,6
AULA 9	205
Piscina	32
Casino	256
Pabellón deporte	32
Camareta A.F.M	1432
Comedor	336

Tabla 4-2 Horas de exposición del grupo 6 de Aspirantes de 1º (elaboración propia)

	ASP 2º (Grupo 5)
	Nº de horas
Aula 5	11,6
Laboratorio Química	23,2
Aula 10	393,4
Laboratorio Motores	21,6
Aula 17	19,9
Estudio A.F.M	1077,3
Piscina	31,0
Casino	124,0
Pabellón/gimnasio	31,0
Camareta	1432,0
Comedor	336,0

Tabla 4-3 Horas de exposición del grupo 5 de Aspirantes de 2º (elaboración propia)

	GM 2° (Grupo 1)
	Nº de horas
Laboratorio Materiales	23,2
Aula 14	44,8
Aula 40	381,0
Laboratorio Motores	21,6
Estudio (Cuartel A.F.M)	894,9
Piscina	32,0
Casino	128,0
Pabellón/gimnasio	32,0
Camareta	1432,0
Comedor	336,0

Tabla 4-4 Horas de exposición del grupo 1 de Guardiamarinas de 2° (elaboración propia)

	AF (Grupo 1)
	Número de horas
Aula 56	262,3
Aula 17	27,4
Laboratorio Física	33,2
Estudio (Cuartel A.F.M)	1197,6
Aula 21	79,7
Piscina	32,0
Casino	128,0
Pabellón/gimnasio	32,0
Camareta	1432,0
Comedor	336,0

Tabla 4-5 Horas de exposición del grupo 1 de Alféreces de Fragata (elaboración propia)

Ahora bien, en el caso de los alumnos, una vez halladas todas las horas de cada grupo escogido, se plantean las siguientes simplificaciones en el tiempo de exposición.

Debido a la duración del TFG no ha sido posible realizar mediciones en cada una de las aulas de la ENM. Por consiguiente, existen aulas donde los distintos cursos dan clase de las que no se tiene el valor de la concentración de radón. Se formulan dos posibles soluciones. La primera, asociar el valor de concentración por proximidad, esto es, dar el valor de concentración al aula donde no se ha realizado la medición el del aula más próxima donde si se haya medido. Esta opción se descarta dado que en ocasiones como en el Patio de Aulas, se ha constatado la enorme variación entre dos aulas muy cercanas como la 9 y la 10, pasando de 173,86 Bq/m³ en el aula 9 a 673,43 Bq/m³ en el aula 10 (Tabla 4-10 y Tabla 4-11). La segunda solución, que es la finalmente aplicada, consiste en lo siguiente. Se observa que el porcentaje de horas en las clases donde no se ha realizado medición sobre el número total de horas calculadas es muy bajo y poco representativo para el cálculo final, decidiendo así descartar esas horas. A continuación, se muestra un ejemplo para el grupo 6 de aspirantes de primero (Tabla 4-6).

	ASP 1º (Grupo 6)
	Número de horas anuales
AULA 55-57	17,4
AULA 44	23,2
AULA 18	29,1
AULA 52-54	122
Laboratorio Física	11,6
AULA 17	23,2
Biblioteca A.F.M	1005,8
Laboratorio electrónica	21,6
AULA 15	21,6
AULA 9	205
Piscina	32
Casino	256
Pabellón deporte	32
Camareta A.F.M	1432
Comedor	336

Tabla 4-6 Horas de exposición del grupo 6 de Aspirantes de 1º (elaboración propia)

De las aulas y laboratorios en color morado no se dispone el valor de concentración de radón. Si se efectúa la suma de esas horas y se dividen por el número de horas totales, se obtiene el porcentaje:

$$17,4 + 23,2 + 122 + 11,6 + 21,6 = 195,8 \text{ horas}$$

$$(195,8 / 3568,5) \cdot 100 = 5,48 \%$$

Para los demás cursos, este porcentaje ha resultado ser inferior a 1% en todos los casos. Se concluye por tanto que este valor no es demostrativo sobre el resultado final, pudiendo descartar así las horas de exposición de las aulas que no se tiene el valor de la concentración de radón.

4.1.2.2 Profesorado

En lo que respecta a los profesores del CUD, debido a la variabilidad de los diversos factores que influyen en el horario de un profesor, se estima la dosis correspondiente a un único perfil, escogiendo el escenario más desfavorable, es decir, aquellos lugares donde la concentración resulte más elevada.

El horario seguido por los profesores es de ocho horas diarias de lunes a viernes y se realizan los cálculos para un número de 225 días laborables, obteniendo una suma total de 1800 horas laborables al año. Después de hablar con diversos profesores del CUD, se dividen las horas totales en tres tipos: 240 horas de docencia, 1000 horas anuales en las que el profesor permanece en el despacho y 450 horas de investigación. Se llega a la conclusión de que el 70% de las horas de docencia, es decir, 168 horas, corresponden a clases de teoría, escogiéndose, por tanto, el aula 10, el aula de clase de teoría con mayor valor de concentración de radón medido. El otro 30% (72 horas) coincide con horas de laboratorio en el edificio Isaac Peral, seleccionando el laboratorio de motores. A esos porcentajes se añaden otras horas en clases de teoría que corresponden a colaboración de exámenes, horas extra, cursos, etc. (52 horas) y a las horas de laboratorio se suman también las horas de preparación de las prácticas (58 horas). En cuanto al resto de horas, es decir, las que no son de docencia, se destinan a horas en el despacho (utilizando en los cálculos el despacho número 115) y en el edificio de investigación del CUD. Quedando la estimación de horas de la siguiente manera (Tabla 4-7).

		Estancia	Profesorado
			Número de horas anuales
Docencia	Laboratorio	Laboratorio Motores	130
	Aulas	Aula 10	220
Despacho		Despacho 115	1000
Investigación		Edificio de investigación del CUD	450

Tabla 4-7 Horas de exposición de un profesor "tipo" (elaboración propia)

4.1.2.3 Personal

En aquellos lugares en los que existe un turno de trabajo con horarios fijos, como Correos, el Centro Apoyo Informático (CAI) o la farmacia, por ejemplo, ha resultado sencillo estimar las horas de exposición del personal. Para calcularlas se preguntó por los turnos de trabajo, el horario de permanencia y el calendario laboral. Se muestra una tabla resumen de la información adquirida (Tabla 4-8). Cabe destacar que, lo indicado como “Jefatura de Instrucción” se refiere al despacho del Comandante de Brigada de quinto curso, situado en dicho edificio.

	Horario		Calendario	Número de horas anuales	
Correos	08:30 - 14:15		Todo el año excepto festivos	1454,8	
Sastrería	08:30 - 14:00		Todo el año excepto festivos y un mes en verano	1221	
Farmacia	08:30 - 14:00		Todo el año excepto festivos	1391,5	
CAI	08:00 - 13:30	13:30 - 19:00	Todo el año con reducción de turnos en verano	2480,5	
Biblioteca histórica	08:30 - 14:00		Todo el año excepto julio y agosto	1056	
Lavandería	08:00 - 13:30		Todo el año excepto festivos	1391,5	
Jefatura de Mantenimiento	07:30 - 14:30		Todo el año excepto festivos	1771	
Biblioteca A.F.M	08:15 - 18:15	18:15 - 22:30	Todo el año excepto festivos y un mes en verano	2220	943,5
Taller de electrónica	07:30 - 15:00		Todo el año excepto festivos	1897,5	
Jefatura de Instrucción	08:30 - 13:30		Todo el año excepto festivos y vacaciones	1070	

Tabla 4-8 Horas de exposición del distinto personal de la ENM (elaboración propia)

4.1.3 Estimación de la dosis efectiva

En el apartado (2.3) se ha definido el concepto de dosis, así como los métodos existentes para calcular la dosis efectiva por exposición a un elemento radioactivo. Ahora bien, en el caso del radón, la dosis efectiva se calcula utilizando el modelo dosimétrico del tracto respiratorio humano desarrollado en la publicación 66 de la ICRP [54]. A fin de entender este modelo primero se debe comprender cómo llegan la progenie del radón al interior del cuerpo humano.

Tal y como se ha explicado, el radón entra en los edificios a través del suelo. Tras la desintegración del gas radón en sus descendientes, estos reaccionan rápidamente con los gases traza del aire y crean partículas con diámetros de entre 0,5 y 5 nm. Estas partículas se denominan progenie no adherida y pueden unirse a las partículas de aerosol ya existentes en la atmósfera (Figura 4-4), formando lo que se conoce como progenie adherida que puede presentar diámetros desde los 10 nm hasta 1 μ m. Una parte de esta puede ser eliminada por deposición en las diferentes superficies o mediante ventilación de la estancia, por lo que la concentración de los descendientes de vida corta del radón en el aire es menor que la del gas radón en sí. Esto se cuantifica mediante el factor de equilibrio, F, siendo este una medida del desequilibrio existente entre el gas radón y su progenie, esto significa

que, si la concentración de la progenie de vida corta fuese igual a la concentración de gas radón, F sería igual a 1, sin embargo, para interiores, F es habitualmente 0,4.

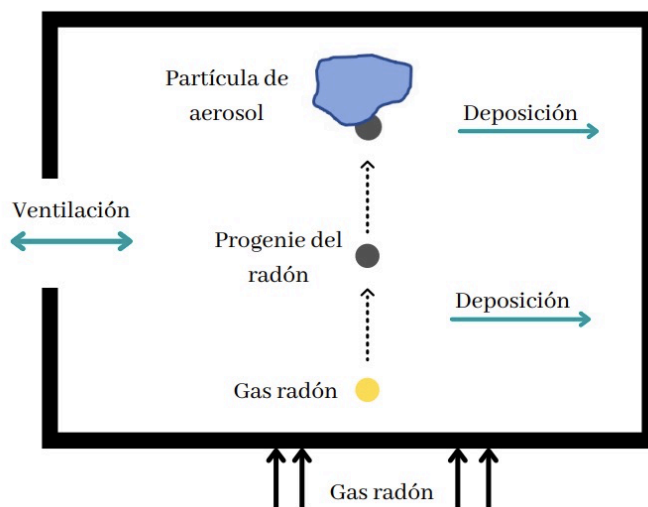


Figura 4-4 Esquema de comportamiento del radón en interiores (elaboración propia en base a [55])

El modelo del tracto respiratorio estima la dosis absorbida en base al tamaño de las partículas de progenie de radón presentes en los aerosoles, de la fracción no adherida, de la tasa de respiración y del factor de equilibrio (F), entre otros. A continuación, se aplican los factores explicados previamente (2.3) para la dosimetría de cualquier radiación.

El modelo considera tanto las vías respiratorias extratorácicas como las torácicas. El pulmón se divide en tres regiones, la región bronquial (BB), la región broncoliar (bb) y la región alveolar intersticial (AI) (Figura 4-5), en los alveolos es donde tiene lugar el intercambio de oxígeno.

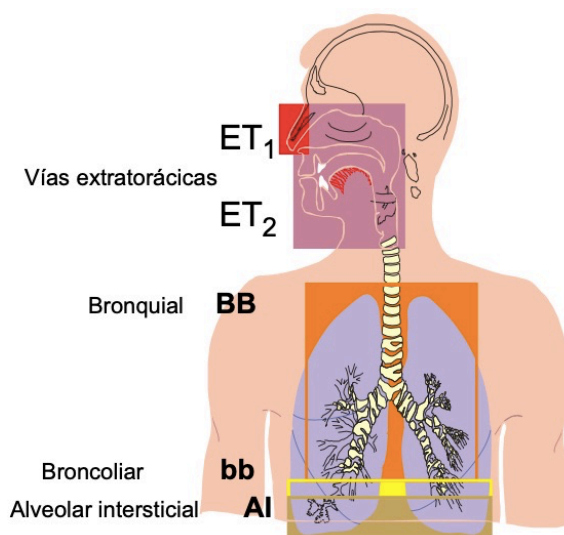


Figura 4-5 Modelo del tracto respiratorio (tomada de [56])

En la región bronquial, se han identificado las células radiosensibles de las vías respiratorias, estas están a una determinada profundidad, siendo las más sensibles las células basales y secretoras situadas en el epitelio bronquial. A su paso, la progenie del radón se deposita en la capa de moco (Figura 4-6) y las partículas alfa emitidas tienen suficiente energía para alcanzar dichas células. Así, la dosis equivalente para el pulmón viene dada por la suma de la dosis absorbida en cada región sensible de las anteriormente expuestas y por el factor de ponderación de la radiación para las partículas alfa (las más

dañinas) [55]. Finalmente, la dosis efectiva se estima multiplicando la dosis equivalente por el factor de ponderación del pulmón (0,12).

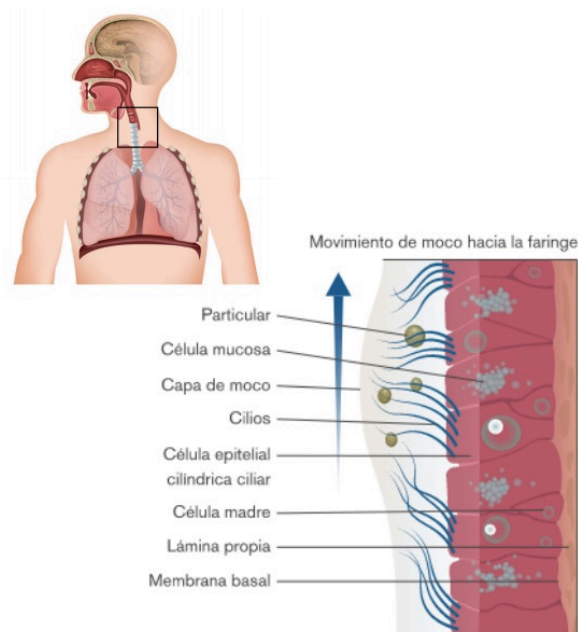


Figura 4-6 Epitelio respiratorio (elaboración propia)

Una vez descrito el modelo dosimétrico del tracto respiratorio, cabe destacar que actualmente la dosis efectiva se calcula mediante el modelo de la publicación 137 de la ICRP [11], que proporciona un coeficiente de dosis derivado del modelo previamente expuesto y del modelo biocinético.

Si bien, como se ha visto, la mayoría de las partículas se depositan en las vías respiratorias, una parte de ellas, al llegar a los alveolos pasan a la sangre y se distribuyen por todo el cuerpo, alcanzando así diferentes órganos y tejidos. La tasa de transferencia del gas en la sangre a los órganos y tejidos se puede calcular, por tanto, mediante el modelo biocinético.

Como resultado de la unión de ambos modelos, se obtienen los coeficientes de dosis efectiva para la inhalación de gas radón y de su progenie (Tabla 4-9).

Lugar de exposición	Fracción de progenie no adherida (f_p)	Factor de equilibrio (F)	Dosis efectiva por exposición	
			mSv por mJ h m ⁻³	mSv por Bq h m ⁻³
Puesto de trabajo en interiores	0,08	0,4	5,7	1,3 x 10 ⁻⁵

Tabla 4-9 Dosis efectiva por inhalación de radón en lugares de trabajo (elaboración propia en base a [11])

En la Tabla 4-9 se aprecia que el coeficiente calculado por este método para trabajadores en interiores es de 5,7 mSv por mJ h m⁻³. El cálculo del citado coeficiente se ha realizado utilizando la tasa de respiración media de un trabajador de referencia (1,2 m³ h⁻¹), es decir, un trabajador que pasa dos tercios del tiempo en ejercicio. Este valor no es realista para un trabajo más sedentario, por ejemplo, de oficina. Por lo tanto, en este caso se asume una tasa de respiración de 0,86 m³ h⁻¹, obteniendo entonces un coeficiente de dosis de 4 mSv por mJ h m⁻³ [11] [55].

Asimismo, dichos cálculos se han realizado tomando como factor de equilibrio 0,4 para el aire en interiores y 0,08 para la fracción de progenie (f_p) no adherida. Ambos valores se relacionan de forma

inversamente proporcional, es decir, cuando por ejemplo existe escasa ventilación, la concentración de partículas de aerosol es alta, por lo que f_p es baja y F es relativamente alto.

El valor más reciente de conversión de dosis derivado de estudios epidemiológicos es 3,4 mSv por mJ h m⁻³ [11]. De forma que, la ICRP en su informe del 2017 concluye que existe coherencia entre los coeficientes obtenidos mediante cálculos dosimétricos y epidemiológicos considerando las incertidumbres asociadas a estas estimaciones. Por lo tanto, teniendo en cuenta ambos coeficientes, recomienda utilizar el valor de 3 mSv por mJ h m⁻³ para calcular la exposición al radón (y su progenie) en minas y edificios para la mayoría de los casos. En caso de que la actividad física realizada en interiores sea intensa se propone un coeficiente mayor, de 6 mSv por mJ h m⁻³.

En resumen, en el presente trabajo se sigue la última recomendación de la ICRP. Consecuentemente, para realizar el cálculo de la dosis efectiva de radón se utiliza la siguiente fórmula (Ec.1). En ella se considera que las actividades realizadas en los espacios interiores de la ENM no suponen gran actividad física y que el factor de equilibrio (F) es de 0,4 (valor de referencia). Por lo tanto, el coeficiente de dosis (3 mSv por mJ h m⁻³), realizando el correspondiente cambio de unidades, es de $6,7 \cdot 10^{-6}$ mSv por Bq h m⁻³. El cambio de unidades realizado se detalla en el Anexo I: Unidades. La siguiente fórmula permite hallar la dosis efectiva en función de las horas de exposición y la concentración de radón.

$$\text{Dosis efectiva (mSv)} = 6,7 \cdot 10^{-6} [\text{mSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3)] \cdot t [\text{h}] \cdot C_{\text{Rn-222}} [\text{Bq}/\text{m}^3] \quad (\text{Ec.1})$$

Siendo; t = horas de exposición anual y $C_{\text{Rn-222}}$ = Concentración media anual de radón

4.2 Concentraciones medias anuales de radón

Una vez explicado el procedimiento llevado a cabo para determinar las concentraciones medias, se presentan y discuten en este apartado los resultados hallados, los cuales se resumen en un mapa de concentraciones de los diferentes lugares de la ENM evaluados.

Tras analizar los datos de las mediciones de concentración en las distintas instalaciones de la ENM, se muestra a continuación una tabla resumen (Tabla 4-10 y Tabla 4-11) con la concentración media en cada estancia, la media durante el horario laboral, el coeficiente de concentraciones previamente explicado y el intervalo de confianza del 95%. En el Anexo III: Concentraciones de radón, se pueden encontrar todas las gráficas de la concentración de radón en función del tiempo durante el periodo en el que se realizaron las mediciones.

ESTANCIA	CONCENTRACIÓN MEDIA	IC 95%		CONCENTRACIÓN HORARIO LABORAL	COEFICIENTE DE CONCENTRACIONES
		Límite inferior	Límite superior		
Biblioteca A.F.M	971,7	929,5	1013,9	1019,6	1,0
Lavandería	854,8	779,8	929,8	194,0	0,2
Aula 21	782,4	735,1	829,8	825,8	1,1
Correos	738,8	671,8	805,7	190,1	0,3
Aula 10	673,4	617,7	729,2	742,2	1,1
Edificio investigación CUD *	620,0	-	-	-	-

* Lugares medidos en [7] [8]

Tabla 4-10 Concentraciones de radón en las diferentes instalaciones de la ENM (elaboración propia)

ESTANCIA	CONCENTRACIÓN MEDIA	IC 95%		CONCENTRACIÓN HORARIO LABORAL	COEFICIENTE DE CONCENTRACIONES
		Límite inferior	Límite superior		
Aula 15	487,5	449,3	525,8	395,5	0,8
Despacho 115 CUD *	442,0	-	-	-	-
Farmacia	383,7	354,1	413,3	267,7	0,7
Comedor *	362,0	-	-	-	-
Aula 17	310,6	249,8	326,5	300,5	1,0
Aula 40 *	251,0	-	-	-	-
CAI	245,6	213,6	277,6	323,8	1,3
Biblioteca histórica	234,9	221,3	248,5	213,7	0,9
Aula 1	227,0	215,8	238,2	234,2	1,0
Aula 18	207,4	200,3	214,5	207,4	1,0
Laboratorio Motores	185,7	170,8	200,7	217,0	1,2
Aula 9	173,9	159,1	188,6	185,9	1,1
Sastrería	168,0	151,2	184,7	99,3	0,6
Pabellón deportivo	136,1	128,8	143,5	136,1	-
Aula 14	121,6	107,6	135,6	118,8	1,0
Sala electrónica	120,1	113,7	126,5	105,9	0,9
Suboficial de Guardia	101,5	87,7	115,3	101,5	-
Piscina	91,6	76,7	106,6	91,6	-
Casino	68,4	58,5	78,2	-	-
Jefatura Instrucción	52,3	45,8	58,8	27,1	0,5
Aula 56	41,6	38,5	44,8	33,8	0,8
Cocina	39,2	35,0	43,4	39,2	1,0
Aula 43	30,1	26,5	33,7	33,3	1,1
Camareta A.F.M	26,5	24,2	28,8	-	-
Estudio A.F.M	23,9	21,2	26,5	-	-
Jefatura de Mantenimiento	13,5	11,9	15,1	13,5	1,0

Tabla 4-11 Continuación concentraciones de radón en las diferentes instalaciones de la ENM (elaboración propia)

Mediante Excel se establece un código de formato para que sea más visual, los valores de la concentración media anual aparecen ordenados de mayor a menor y se representan gracias a una escala de color que va desde el rojo, aquellos valores que superan la concentración límite establecida, siendo esta 300 Bq/m^3 , al naranja, los valores que se encuentran entre la concentración recomendada (100 Bq/m^3) y la concentración límite, y por último, en verde aquellos que están por debajo de la concentración recomendada.

Las estancias marcadas con un asterisco son aquellas en las que se han tomado los valores calculados en TFG previos [7] [8] y de los que únicamente se dispone la media de la concentración, por lo que no se ha podido estimar el coeficiente de concentraciones ni el intervalo de confianza. Para la piscina, el pabellón de deporte, el casino, la camareta y el estudio del cuartel A.F.M no se calcula el coeficiente de concentraciones, ya que no tienen un horario fijo de estancia de personal y, por tanto, calcularlo no tendría ningún valor añadido.

En la farmacia, en Correos, en la lavandería y en sastrería donde el coeficiente de concentraciones ha resultado ser bastante inferior a 1 (menor de 0,8), se puede ver como la media durante todo el periodo medido supera visiblemente el límite permitido, pero la media durante el horario laboral baja drásticamente, quedando entre la recomendada y la máxima. Esto se debe a que, como se ha mencionado, debido al Covid-19, se mantienen estas estancias más ventiladas que de normal, destacando así la importancia de mantener aireados los lugares donde las concentraciones de radón han resultado ser elevadas. En Jefatura de Instrucción, por ejemplo, el coeficiente de variaciones resulta también muy inferior a 1 (0,6), aunque las concentraciones sean bastante bajas se aprecia de igual forma el efecto que tiene la ventilación sobre el nivel de concentración de radón. En cambio, en las demás estancias, el coeficiente ha resultado muy cercano o ligeramente superior a uno, debido a que como se ha mencionado, el radón sigue ciclos diarios, dando en ocasiones valores muy diferentes durante un día, es por eso por lo que se observa variabilidad entre la media durante todo el periodo y la media durante el horario de trabajo. A la vista de los resultados obtenidos, si bien, la mayoría (un 66%) de las estancias se encuentran por debajo del límite de 300 Bq/m^3 que marca la normativa (Figura 4-7), algunas de las concentraciones son bastante elevadas. Sin embargo, si se tienen en cuenta las recomendaciones de la OMS de no superar los 100 Bq/m^3 , se puede observar que muchos están por encima de las recomendaciones.

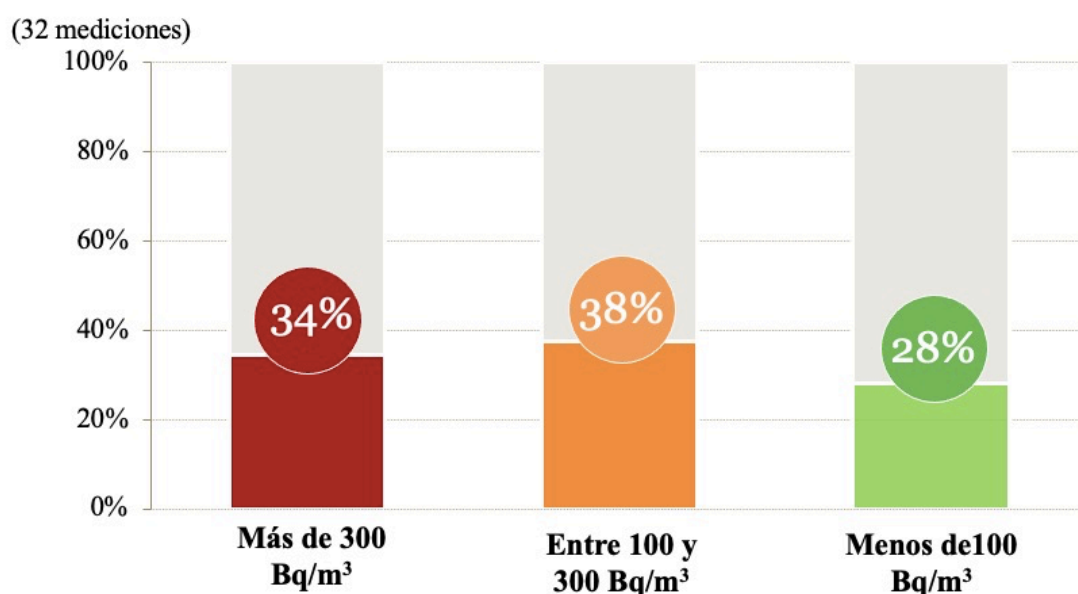


Figura 4-7 Porcentaje de estancias según el valor de concentración medio (elaboración propia)

Los casos más alarmantes son los coloreados en color rojo, siendo el 34% de las estancias medidas (Figura 4-7) ya que, en ocasiones incluso duplica el máximo permitido. El aula 17 y el CAI se encuentran casi en el valor límite, sin embargo, tanto el aula 21, el aula 10, el aula 15, el comedor, Correos y la biblioteca del A.F.M presentan valores muy altos.

Por otro lado, es importante también mencionar lo anteriormente introducido sobre el radón en cuanto a su acumulación en plantas bajas. Como se observa, en la camareta del cuartel A.F.M, en el estudio situado también en este cuartel y en el aula 56, todas ellas primeras plantas, la concentración de radón es visiblemente más baja que en las otras estancias.

Además, como se ha explicado en el apartado 3.3, algunas mediciones se realizaron durante un periodo en el que no hubo ningún tipo de ventilación, por lo que, la concentración de radón se fue acumulando, llegando a dar resultados muy altos, como en el caso del aula 21 con un pico de 2636 Bq/m³ (Figura A-3) o el aula 15 con uno de 1084 Bq/m³ (Figura A-8). En estas mediciones, a pesar de no haber observado el descenso de concentración de radón debido a la ventilación, se han observado con claridad otras variaciones diarias que sigue el radón. Se adjunta a continuación (Figura 4-8) la gráfica de concentración de radón en el aula 10 como muestra de estas oscilaciones. Durante el periodo de medición no hubo ni ventilación ni personal entrando y saliendo del aula, por lo que estuvo totalmente cerrada. Aun así, se observan subidas y bajadas en el nivel de concentración de radón, un máximo repentino de más de 1950 Bq/m³ e incluso un periodo de casi dos días (entre el día 2 de enero y 4 de enero) en el que la concentración varía bastante menos, permaneciendo mucho más constante. Aunque, no es objeto de estudio en el presente trabajo, se considera que estas variaciones pueden estar asociadas a factores meteorológicos, como la temperatura, humedad o presión [48].

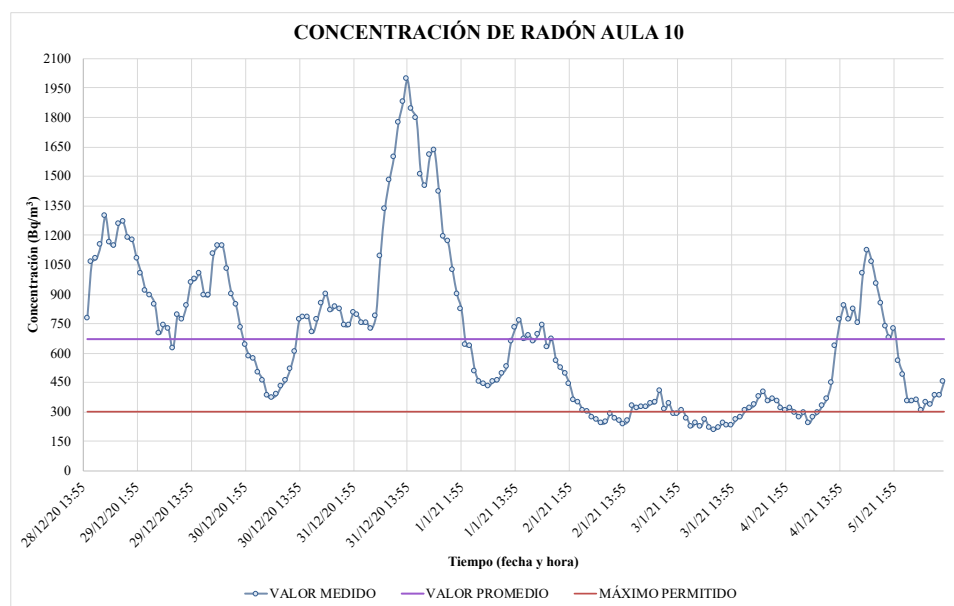


Figura 4-8 Concentración de radón en el aula 10 (elaboración propia)

Dada la gran variabilidad observada en la concentración de radón causada por diversos factores, se considera imprescindible realizar medidas a largo plazo (3 meses) como recomienda la OMS [3] y al mismo tiempo en diferentes estancias, para así poder comparar las medias de concentración de radón sin estar afectadas por diferentes variables meteorológicas como en el presente TFG, en el que se tiene una limitación temporal, además de una limitación en cuanto al número de medidores disponibles.

Para finalizar, se adjunta un mapa resumen (Figura 4-9) que muestra de forma más intuitiva las concentraciones medias de radón en la ENM. Se utiliza un código de colores que permite identificar de forma rápida el rango de valores de la concentración en cada estancia.

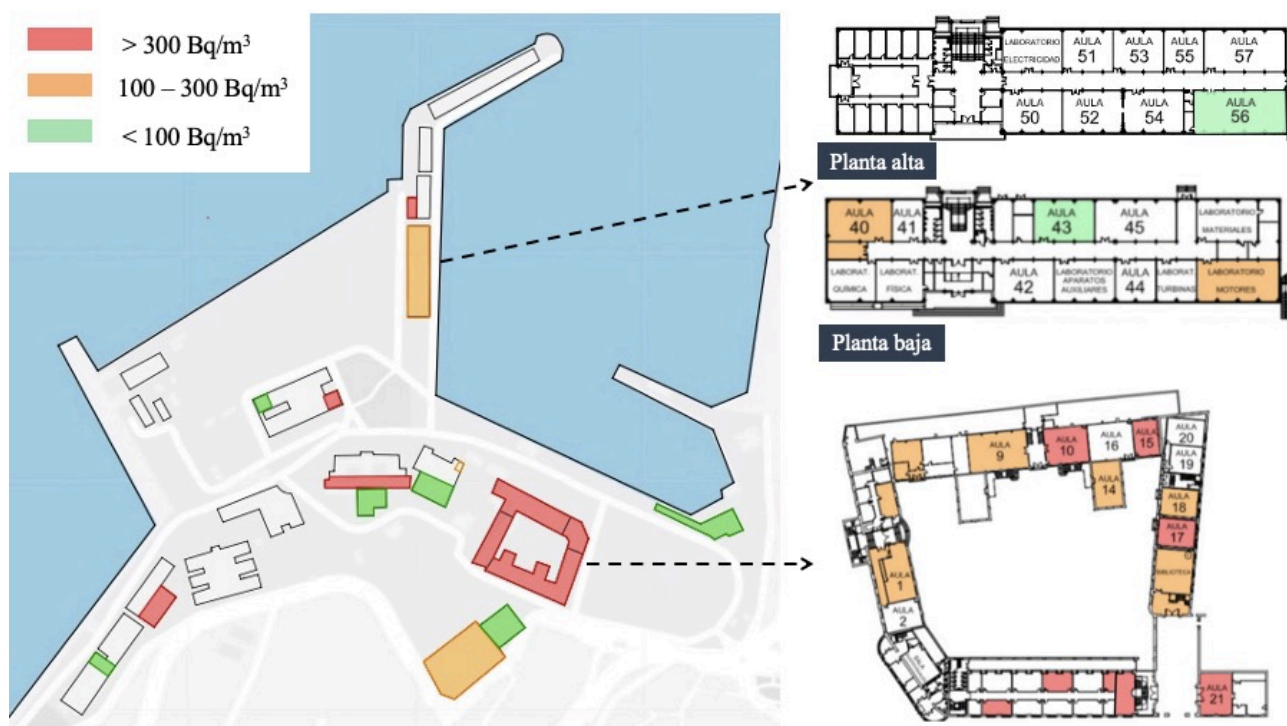


Figura 4-9 Mapa de concentraciones de radón de la ENM (elaboración propia)

En base a los resultados del mapa, se aprecia como la zona del Patio de Aulas tiene una concentración visiblemente mayor que otras partes de la ENM como pueden ser Jefatura de Instrucción o el edificio Isaac Peral, aunque este, tiene muy próximo el edificio de investigación del CUD que, en cambio tiene concentraciones muy altas. Estas variaciones pueden estar debidas a las diferencias en la composición del terreno, que es uno de los factores más determinantes en la concentración de radón, tal y como se ha estudiado en el apartado 2.4. Por otro lado, recientemente se han efectuado obras en el Patio de Aulas y al realizar un levantamiento del suelo, se ha visto que, la mayoría es granito, siendo probablemente esta la causa de las altas concentraciones halladas en esa zona. En cambio, la zona del Isaac Peral y del cuartel A.F.M son terrenos ganados al mar, por lo que, la composición del terreno puede ser muy diferente.

4.3 Dosis efectivas anuales

4.3.1 Controversia en el límite de dosis efectiva a aplicar

En el apartado 2.2.1 se destacó la falta de transposición de la Directiva 2013/59/Euratom [37] a la normativa española, lo que genera datos desactualizados y confusos. Por un lado, la directiva establece para trabajadores 6 mSv como valor límite de actuación, o sea, a partir del cual se deben tomar medidas de protección radiológica y un máximo, que no se debe sobrepasar en ningún caso, de 20 mSv. En cambio, por otro lado, existe el nivel máximo de referencia en cuanto a concentración de radón de 300 Bq/m³. Entonces, mediante el método de la ICRP [11] para estimar la dosis se realiza el cálculo para trabajadores, suponiendo 2000 horas anuales laborales y estableciendo el límite actual en España de 300 Bq/m³.

$$\text{Dosis efectiva (anual)} = (6,7 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/ (Bq} \cdot \text{h/m}^3)) \cdot (2000 \text{ horas}) \cdot (300 \text{ Bq/m}^3) = \mathbf{4,02 \text{ mSv}}$$

Como se puede comprobar, la dosis resulta inferior a la dosis límite establecida en la directiva, lo que da lugar a desconciertos y a cuestionarse qué límite aplicar. Si se establecen 6 mSv como máximo, entonces, el valor de la concentración puede ser mayor de 300 Bq/m³ y al revés. De igual forma, la OMS propone un nivel de concentración de 100 Bq/m³ que, realizando los mismos cálculos para un trabajador, tendría, convertido a dosis efectiva, un valor de 1,3 mSv.

En el presente trabajo se tienen en cuenta los límites establecidos por la Directiva 2013/59/Euratom [37], es decir, 6 y 20 mSv pero no se debe pasar por alto la disyuntiva que se produce.

Adicionalmente, se hace relevante mencionar que no existe límite en cuanto a dosis de radón para el conjunto de la población. Es por ello que, en este TFG se van a aplicar los mismos límites tanto para el personal y profesores (que sí cumplen el requisito de trabajadores) como para los alumnos. Esto se justifica de la siguiente manera. Como se puede observar en el valor de las concentraciones, aquellas más altas corresponden a aulas o lugares de estudio (biblioteca), por tanto, el mayor valor de dosis vendrá dado en su mayoría por la permanencia en esas estancias, que aproximadamente corresponden con el horario de jornada laboral. La contribución que tienen a la dosis anual, por ejemplo, las horas de descanso en la camareta es pequeña ya que el valor de la concentración en los dormitorios es muy bajo. Además, es únicamente uno de los grupos de alumnos el que incumple el límite de los trabajadores y, si se realiza la suma de horas, claramente es un número superior al de horas laborales de un trabajador, pero si se realiza la media y se equipara con las horas de un trabajador, la dosis si cumpliría entonces el límite.

4.3.2 Dosis efectivas anuales para diferentes colectivos

Calcular la dosis es transcendental, ya que una exposición a elevadas concentraciones de radón, pero breve en tiempo no tendrá un impacto relevante en la salud. En cambio, exposiciones a menores concentraciones durante más tiempo resultarán en una dosis mayor y por tanto un riesgo más elevado. Por lo tanto, concentración y tiempo de exposición son factores clave en la determinación de las dosis efectivas. Tras haber expuesto los valores de ambos factores, se pasan a exponer los resultados obtenidos de dosis efectivas en el presente apartado. Se han agrupado en tres colectivos diferentes, alumnos, profesores y el resto de personal de la ENM.

Cabe destacar que ninguna dosis anual ha superado el valor máximo límite de 20 mSv. Cuando en los posteriores puntos se hable de superación del límite de la normativa, corresponde con el límite de 6 mSv, a partir del que se deben tomar medidas. De igual forma, las tablas para obtener el valor resultante de la dosis se han realizado también gracias a una plantilla creada en Excel y, mediante la aplicación de un código de formato, se muestra un aspa roja en el resultado si este supera los 6 mSv y un tic verde si es inferior a dicho valor.

4.3.2.1 Alumnos

Para el grupo seleccionado de Aspirantes de 1º se puede comprobar como la dosis efectiva anual a la que están expuestos resulta mayor que el límite de la normativa (Tabla 4-12). Si se analiza la cantidad de dosis que aporta a la media anual la permanencia en cada estancia, la de la biblioteca del cuartel A.F.M destaca muy por encima del resto. El valor de la dosis únicamente en las horas de la biblioteca ya supera el límite de referencia, esto se debe a que, como se explicó anteriormente, la medición se realizó en un seminario cerrado y no en la parte central, donde probablemente el valor sería menor. Aun así, el valor resulta ser muy alto y, por tanto, deberían tomarse medidas.

	ASP 1° (Grupo 6)		
	N° de horas	Concentración (Bq/m ³)	Dosis efectiva
Aula 18	29,1	207,4	0,04
Aula 17	23,2	310,6	0,05
Biblioteca A.F.M	1005,8	971,7	6,55
Aula 15	21,6	487,5	0,07
Aula 9	205,0	173,9	0,24
Piscina	32,0	91,6	0,02
Casino	256,0	68,4	0,12
Pabellón deporte	32,0	136,1	0,03
Camareta	1432,0	26,4	0,25
Comedor	336,0	362,0	0,81
DOSIS ANUAL EFECTIVA			 8,18 mSv

Tabla 4-12 Dosis efectiva anual del grupo 6 de Aspirantes de 1° (elaboración propia)

Sin embargo, la dosis efectiva para los Aspirantes de 2° se encuentra encuadrada dentro los límites (Tabla 4-13). Como se observa, si la concentración en el aula 10, que es donde pasan la mayoría de las horas de clase se redujese, la dosis efectiva anual se vería también mucho más reducida.

	ASP 2° (Grupo 5)		
	N° de horas	Concentración (Bq/m ³)	Dosis efectiva
Aula 10	393,4	673,4	1,78
Laboratorio Motores	21,6	185,7	0,03
Aula 17	19,9	310,6	0,04
Estudio A.F.M	1077,3	23,9	0,17
Piscina	32,0	91,6	0,02
Casino	124,0	68,4	0,06
Pabellón/gimnasio	32,0	136,1	0,03
Camareta	1432,0	26,4	0,25
Comedor	336,0	362,0	0,81
DOSIS ANUAL EFECTIVA			 3,19 mSv

Tabla 4-13 Dosis efectiva anual del grupo 5 de Aspirantes de 2° (elaboración propia)

En cuanto a los Guardiamarinas de 2° (Tabla 4-14) y los Alféreces de Fragata (Tabla 4-15) ambos reciben una dosis efectiva anual que se encuentra por debajo del máximo establecido, por tanto, en principio no resultaría necesario tomar medidas. Ahora bien, es cierto que en determinadas aulas si se observa que el valor de la concentración resulta ser muy superior al límite, por lo que, en estos casos se deberían establecer medidas de reducción de la concentración.

	GM 2º (Grupo 1)		
	Nº de horas	Concentración (Bq/m ³)	Dosis
Aula 14	44,8	118,8	0,04
Aula 40	381,0	251,0	0,64
Laboratorio Motores	21,6	217,0	0,03
Estudio (Cuartel A.F.M)	894,9	23,9	0,14
Piscina	32,0	91,6	0,02
Casino	128,0	68,4	0,06
Pabellón/gimnasio	32,0	136,1	0,03
Camareta	1432,0	26,4	0,25
Comedor	336,0	362,0	0,81
DOSIS ANUAL EFECTIVA			✓ 2,03 mSv

Tabla 4-14 Dosis efectiva anual del grupo 1 de Guardiamarinas de 2º (elaboración propia)

	AF (Grupo 1)		
	Nº de horas	Concentración (Bq/m ³)	Dosis
Aula 56	262,3	41,6	0,07
Aula 17	27,4	310,6	0,06
Estudio (Cuartel A.F.M)	1197,6	23,9	0,19
Aula 21	79,7	782,4	0,42
Piscina	32,0	91,6	0,02
Casino	128,0	68,4	0,06
Pabellón deporte	32,0	136,1	0,03
Camareta	1432,0	26,5	0,25
Comedor	336,0	362,0	0,81
DOSIS ANUAL EFECTIVA			✓ 1,92 mSv

Tabla 4-15 Dosis efectiva anual del grupo 1 de Alféreces de Fragata (elaboración propia)

Por último, si se realiza la suma de las dosis efectivas recibidas por los alumnos cada año, a pesar de no haber realizado los cálculos para el tercer curso, se puede hacer una estimación de la dosis recibida por un alumno a lo largo de su estancia en la ENM (Tabla 4-16). Es importante resaltar la gran diferencia existente entre las dosis efectivas anuales de los distintos cursos. Esto se puede ver sumando la dosis efectiva de los aspirantes de 2º, guardiamarinas de 2º y alféreces de fragata y comprobando como resulta inferior a la dosis efectiva de los aspirantes de 1º. Por este motivo y con el fin de reducir al mínimo los riesgos, las medidas de mitigación deberían centrarse en este curso.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que dichos cálculos se han llevado a cabo en un año atípico como es este curso 2020-2021, por lo que, la dosis de un alumno durante cursos académicos normales podría variar. Aun así, sirve como una estimación inicial, y como se puede comprobar, esta dosis de cuatro años, aunque no es despreciable, se encuentra por debajo del límite de 20 mSv máximo en un año.

	TOTAL ALUMNO (4 AÑOS)
ASP 1º	8,2
ASP 2º	3,2
GM 2º	2,0
AF / AA	1,9
DOSIS EFECTIVA	15,32 mSv

Tabla 4-16 Dosis efectiva de un alumno de la ENM a lo largo de cuatro años (elaboración propia)

4.3.2.2 Profesorado

Con relación a la dosis calculada para el supuesto de un profesor “tipo”, se puede apreciar en la Tabla 4-17 que la dosis anual es igual a la dosis referencia, lo que significa que se deberían adoptar medidas para reducir el riesgo de exposición. Si bien es verdad que, al escoger el peor de los casos significa que para los demás escenarios que se puedan plantear, la dosis permanecerá por debajo del límite. Esto es, por ejemplo, un profesor que dé clase en un aula diferente o tenga el despacho en la primera planta del CUD, puesto que los valores de las concentraciones de radón serán inferiores y por ende la dosis.

	Profesores		
	Nº de horas	Concentración (Bq/m ³)	Dosis
Aula 10	220	673,4	0,99
Laboratorio Motores	130	185,7	0,16
Despacho 115 CUD	1000	442,0	2,96
Edificio de investigación	450	620,0	1,87
DOSIS ANUAL EFECTIVA			6,0 mSv

Tabla 4-17 Dosis efectiva anual de un profesor "tipo" (elaboración propia)

4.3.2.3 Personal

Respecto a Correos (Tabla 4-18), al ser el coeficiente de concentraciones mucho menor a 1, se han determinado las dosis efectivas anuales para los dos valores de concentración, la concentración media en horario laboral y la concentración media de todo el periodo medido. Es evidente la gran diferencia que hay entre estos cálculos de dosis. La dosis efectiva calculada con la concentración en horario laboral (mucho menor a la otra concentración) resulta ser de 1,9 mSv, quedando por debajo del límite de la normativa. En cambio, si se emplea la concentración media total, la dosis es de 7,2 mSv, superando el límite permitido y por tanto siendo un riesgo para la salud del personal expuesto, en este caso, dos personas. Gracias al cálculo de ambas dosis, se acentúa la importancia de mantener ventilada la estancia, pues se percibe claramente cuánto puede llegar a descender la dosis recibida.

	CORREOS	
Horario	08:30- 14:15	
Horas/día	5,75	
Días laborables	253	
Concentración media (Bq/m ³)	Concentración horario laboral	Concentración media
	190,1	738,8
Número de trabajadores	2	
TOTAL (horas/año)	1454,8	
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✓ 1,9	✗ 7,2

Tabla 4-18 Dosis efectiva anual de Correos (elaboración propia)

Tanto en sastrería (Tabla 4-19) como en la farmacia (Tabla 4-20), se calcula la dosis con la concentración en horario laboral y la dosis con la concentración media total. En ambos casos hay más de 1 mSv de diferencia, destacando de nuevo la importancia de mantener ventilación para reducir la concentración y así la dosis. La dosis efectiva resultante en la farmacia es mayor que en sastrería, ya que trabajan un mayor número de horas y la concentración es también mayor.

	SASTRERÍA	
Horario	08:30 - 14:00	
Horas/día	5,5	
Días laborables	222	
Concentración media (Bq/m ³)	Concentración horario laboral	Concentración media
	99,3	168,0
Número de trabajadores	2	
TOTAL (horas/año)	1221	
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✓ 0,8	✓ 1,4

Tabla 4-19 Dosis efectiva anual en sastrería (elaboración propia)

	FARMACIA	
Horario	08:30-14:00	
Horas/día	5,5	
Días laborables	253	
Concentración media (Bq/m ³)	Concentración horario laboral	Concentración media
	267,7	383,7
Número de trabajadores	2	
TOTAL (horas/año)	1391,5	
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✓ 2,5	✓ 3,6

Tabla 4-20 Dosis efectiva anual de la farmacia (elaboración propia)

En el CAI es en el único lugar medido donde se realiza una reducción de turnos durante las vacaciones de verano, reflejado en la Tabla 4-21, quedando el horario dividido en dos, de 08:00 a 13:30 y de 13:30 a 19:00. Normalmente, trabajan seis personas y durante la reducción de turnos se

dividen en tres por turno. Esto se tiene en cuenta a la hora de calcular la dosis efectiva, que resulta inferior a 6 mSv, a pesar de tener la concentración media por encima del límite permitido.

	CAI	
Horario	08:00 - 19:00	
Horas/día	5,5	11
Días laborables	176	
Reducción turnos (días)	77	
Concentración media (Bq/m³)	323,8	
Número de trabajadores	3	6
TOTAL (horas/año)	2359,5	
DOSIS EFECTIVA (mSv)		5,1

Tabla 4-21 Dosis efectiva anual del CAI (elaboración propia)

En la biblioteca histórica (Tabla 4-22) y en el taller de electrónica del edificio Isaac Peral (Tabla 4-23) la dosis de exposición de los trabajadores ha resultado ser muy parecida dado que, a pesar de trabajar más horas en el taller de electrónica, la concentración de radón en la biblioteca histórica es mayor. La dosis efectiva anual es bastante baja, quedando por debajo del límite de actuación.

	BIBLIOTECA HISTÓRICA	
Horario	08:30-14:00	
Horas/día	5,5	
Días laborables	192	
Concentración media (Bq/m³)	213,7	
Número de trabajadores	2	
TOTAL (horas/año)	1056	
DOSIS EFECTIVA (mSv)		1,5

Tabla 4-22 Dosis efectiva anual de la biblioteca histórica (elaboración propia)

	TALLER DE ELECTRÓNICA	
Horario	07:30-15:00	
Horas/día	7,5	
Días laborables	253	
Concentración media (Bq/m³)	105,92	
Número de trabajadores	2	
TOTAL (horas/año)	1897,5	
DOSIS EFECTIVA (mSv)		1,3

Tabla 4-23 Dosis efectiva anual del taller de electrónica (elaboración propia)

El caso de la lavandería, donde trabajan siete personas, es otro ejemplo del efecto que tiene la ventilación en la reducción de la concentración y de la dosis, llegando a ser hasta cuatro veces menor (Tabla 4-24). Es cierto, que es una planta grande y con los techos muy altos, por lo que, probablemente no todos los trabajadores estén expuestos a exactamente la misma dosis de la que se ha estimado. Para obtener resultados más precisos, sería necesario colocar más de un medidor, pero para el objeto del presente TFG sirve como conocimiento de que se encuentran elevados valores de radón, debiendo tomar medidas para reducirlo.

	LAVANDERÍA	
Horario	08:00-13:30	
Horas/día	5,5	
Días laborables	253	
Concentración media (Bq/m ³)	Concentración horario laboral	Concentración media
	194,0	854,8
Número de trabajadores	7	
TOTAL (horas/año)	1391,5	
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✓ 1,8	✗ 8,0

Tabla 4-24 Dosis efectiva anual de la lavandería (elaboración propia)

Con respecto a Jefatura de Mantenimiento, la concentración de radón es muy baja, prácticamente despreciable, por lo que como era de esperar la dosis también lo es (Tabla 4-25).

	JEFATURA DE MANTENIMIENTO
Horario	07:30-14:30
Horas/día	7
Días laborables	253
Concentración media (Bq/m ³)	13,5
Número de trabajadores	5
TOTAL (horas/año)	1771
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✓ 0,2

Tabla 4-25 Dosis efectiva anual de Jefatura de Mantenimiento (elaboración propia)

En Jefatura de Instrucción (Tabla 4-26) se coloca únicamente un medidor en uno de los despachos de la planta baja, correspondiente al Comandante de Brigada de la quinta brigada. El coeficiente de concentraciones resulta ser bajo, por lo que se calculan ambas dosis efectivas, resultando también muy bajas. Aun así, se puede ver una clara diferencia existente, siendo una el doble de la otra.

	JEFATURA DE INSTRUCCIÓN	
Horario	08:30-13:30	
Horas/día	5	
Días laborables	214	
Concentración media (Bq/m ³)	Concentración horario laboral	Concentración media
	27,13	52,31
Número de trabajadores	1	
TOTAL (horas/año)	1070	
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✓ 0,2	✓ 0,4

Tabla 4-26 Dosis efectiva anual del despacho del Comandante de Brigada en Jefatura de Instrucción (elaboración propia)

En lo que respecta a la biblioteca del cuartel A.F.M, tal y como se ha indicado en otros apartados, la medición se realizó en uno de los seminarios. De la misma forma que para la lavandería, dada la gran extensión de este espacio, si se quieren conocer con mayor precisión las concentraciones exactas en cada lugar, deberían colocarse más medidores. Ahora bien, con las mediciones obtenidas y conociendo el horario de la biblioteca, se sabe que hay dos trabajadores, cada uno en un turno diferente, como se muestra en la Tabla 4-27. El trabajador del turno de por la mañana se encuentra mucho más expuesto, es decir, a más del doble de dosis que el trabajador de por la tarde, que tiene el turno más reducido.

BIBLIOTECA A.F.M		
Horario	08:15-18:15	18:15-22:30
Horas/día	10	4,25
Días laborables	222	
Concentración media (Bq/m ³)	1019,6	
Número de trabajadores	1	1
TOTAL (horas/año)	2220	943,5
DOSIS EFECTIVA (mSv)	✗ 15,2	✗ 6,4

Tabla 4-27 Dosis efectiva anual de la biblioteca del cuartel A.F.M (elaboración propia)

A continuación, en la Figura 4-10 se muestran los porcentajes según el valor de la dosis calculada. Estos porcentajes se obtienen sobre el total de cálculos de dosis efectivas anuales, en total, 15 estimaciones de dosis correspondientes a cada colectivo: los cuatro grupos de alumnos, el profesorado y los 10 lugares donde trabaja distinto personal de la ENM. Como se puede ver, la mayoría (47%) se encuentran entre 1,3 mSv y 4mSv, siendo 1,3 mSv el valor que corresponde a la recomendación de la OMS, es decir, teniendo en cuenta 100 Bq/m³ y 4 mSv el valor, como se ha explicado, que correspondería a la dosis efectiva anual teniendo en cuenta 2000 horas laborables y 300 Bq/m³. Hay que destacar que, un 27% de las personas en las que se han realizado los cálculos está por encima de 6 mSv anuales, lo que indica que se deberán tomar medidas para reducir las concentraciones y así reducir la dosis.

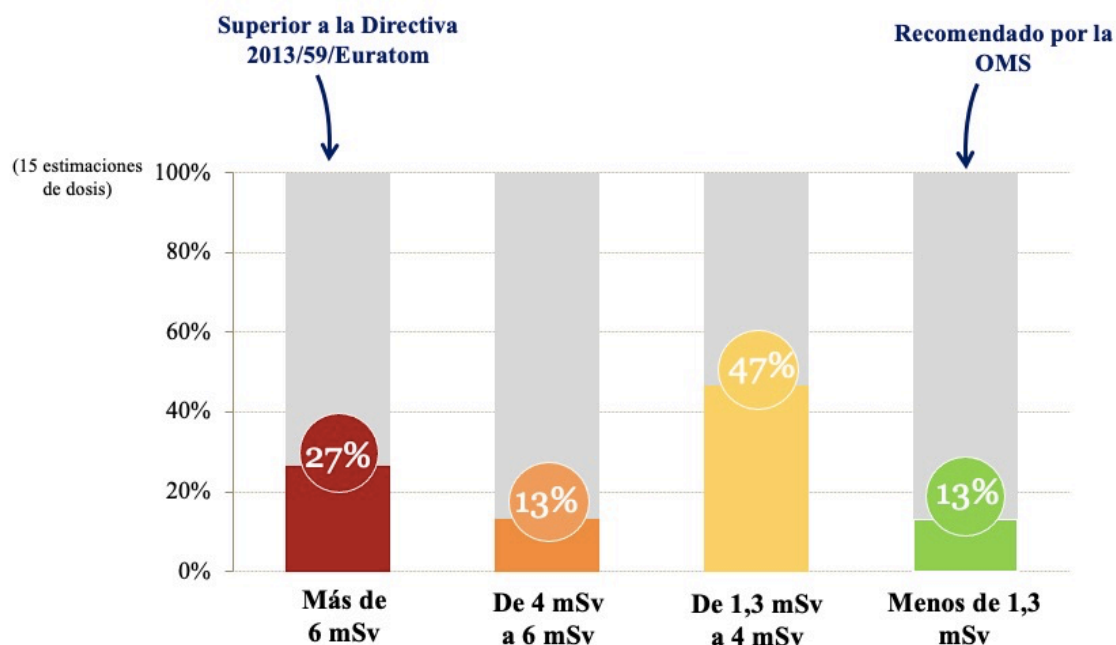


Figura 4-10 Porcentaje según el rango de dosis anual efectiva (elaboración propia)

Teniendo en cuenta todo lo expuesto, se puede concluir que, muchas de las dosis podrían ser incluso mayores si actualmente no estuviese la situación de pandemia debido al aumento en los hábitos de ventilación. Igualmente, las dosis calculadas son únicamente debidas a las horas que cada grupo pasa dentro de la ENM y, por tanto, habría que sumar las dosis recibidas en otros lugares. En consecuencia, si un grupo está próximo al límite, es probable que lo acabe sobrepasando. Por esta razón, y teniendo en cuenta el principio de máxima precaución, se debe reducir todo lo posible la concentración en los distintos lugares con el fin de disminuir la dosis de exposición de radón.

4.4 Gestión del riesgo

Una vez estimadas las dosis efectivas recibidas tanto por el personal de la ENM como por los profesores y alumnos, se comprueba que en algunas ocasiones se superan los límites establecidos por la Directiva Europea y en muchos casos se obtiene valores superiores a los recomendados por la OMS. Esta es una de las razones que motiva a, en los siguientes apartados, proponer ciertas medidas de mitigación de la concentración. De esta forma, reduciendo la concentración de radón se reduce igualmente la dosis anual efectiva y, por tanto, el riesgo. Es importante mencionar que como no existe un límite por debajo del cual el radón no suponga ningún peligro para la salud, no solo se debe intentar reducir el valor de la concentración en aquellos lugares en los que se supere el límite de 300 Bq/m³, aunque si serán motivo de prioridad.

4.4.1 Medidas de mitigación

La guía de rehabilitación frente al radón [57] aporta soluciones de protección para disminuir el nivel de concentración de radón en interiores. Es cierto que en ocasiones es difícil implementar estas soluciones dada la presencia de los diferentes elementos constructivos existentes, pero si ayudan a mejorar la situación inicial cuando las soluciones propias de un edificio de nueva construcción no son viables. Las medidas para reducir los niveles de concentración en los edificios ya construidos se pueden clasificar de tres maneras.

Soluciones de aislamiento del edificio:

- Barrera de protección: Consiste en la colocación de una barrera física, es decir, una lámina para limitar la penetración del radón procedente del terreno hacia el interior del edificio a través del cerramiento.
- Sellado: Cuando no sea posible establecer una barrera de protección, se pueden sellar las discontinuidades tales como fisuras, grietas o juntas de dilatación.
- Sobrepresión: Se crea sobrepresión en los locales a proteger para que el movimiento del aire se invierta protegiendo así la entrada de radón. Se utiliza en locales pequeños y no muy ventilados.
- Empleo de puertas estancas: Esta solución se emplea si existe un espacio de contención (es un espacio entre el terreno y los locales a proteger donde llega el radón proveniente del terreno y que mediante ventilación se expulsa al fuera del edificio) comunicado con el resto del edificio o mediante puertas u otros.

Soluciones de reducción del radón antes de que penetre en los locales a proteger:

- Sistema de ventilación del espacio de contención: Un espacio de contención se sitúa entre el terreno y el local a proteger y mediante ventilación natural o mecánica se expulsa el radón al exterior del edificio. Este espacio puede ser un local no habitable o bien una cámara de aire.
- Sistema de despresurización del terreno: Se produce una depresión en el terreno colindante al edificio para favorecer la expulsión del radón al exterior.

Soluciones de reducción del radón tras penetrar en los locales a proteger:

- Ventilación de los locales habitables: Para reducir la concentración de radón en interior se puede aumentar la ventilación mediante ventanas con aireador o ventilación mecánica.

Además de ofrecer las soluciones mencionadas, dicha guía tiene un capítulo de gran utilidad para la selección de las mejores soluciones en función la media anual de concentración de radón (Tabla 4-28).

Promedio anual de concentración de radón (Bq/m ³)	Soluciones de protección
$\leq 600 \text{ Bq/m}^3$	○ Barrera de protección ○ Sellado de fisuras, grietas, encuentros y juntas ○ Empleo de puertas estancas ○ Creación de sobrepresión en los locales a proteger ○ Mejora de la ventilación del espacio de contención ○ Mejora de la ventilación de los locales habitables
$> 600 \text{ Bq/m}^3$	○ Creación de espacio de contención ○ Instalación de sistema de despresurización del terreno

Tabla 4-28 Soluciones de protección en función del promedio anual de concentración de radón (elaboración propia en base a [57])

Si bien, es cierto que, en edificios ya existentes influyen también otros factores a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo una medida de reducción de concentración. Por ejemplo, si el edificio no tiene espacio de contención y no es viable hacer uno, el sistema de despresurización puede ser buena idea. La guía [57] ofrece además de esta primera ayuda a la selección, otras tablas más detalladas sobre la solución más apropiada según el tipo de cerramiento que separa el edificio del terreno y la concentración de radón de la estancia. Por otro lado, si la ventilación es la solución escogida, se deben tener en cuenta las pérdidas energéticas que puede suponer en periodos invernales.

En la Figura 4-11, mediante un código numérico y de colores se indica la efectividad de las distintas medidas. Para las concentraciones de radón superiores a 600 Bq/m³ se muestran las posibles soluciones en color rojo y para las inferiores, en color amarillo. El número representa una escala del 1 al 5 según la efectividad, siendo 1 la menor y 5 la mayor.

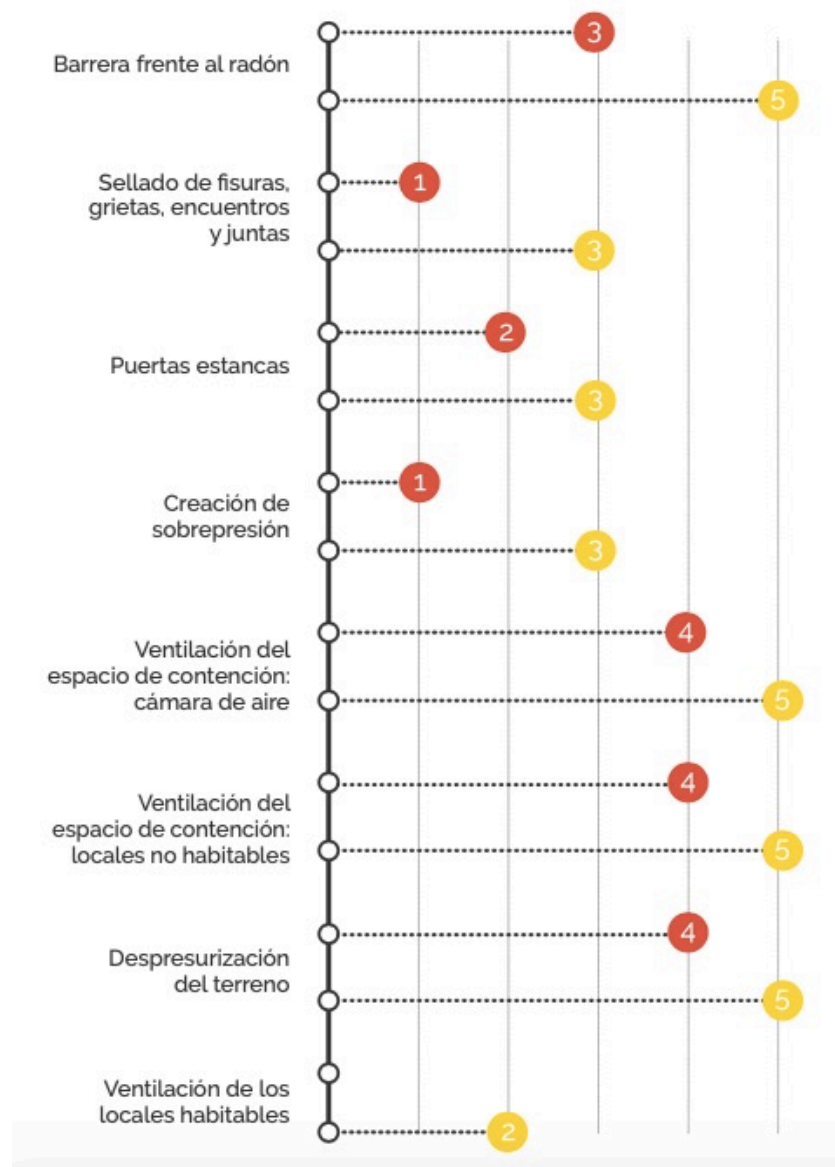


Figura 4-11 Efectividad de las distintas soluciones (tomada de [57])

Si se siguen las siguientes recomendaciones, en la biblioteca del cuartel A.F.M, en la lavandería, en el aula 21, en Correos, en el aula 10 y en el edificio de investigación del CUD, cuyos valores de concentración superan todos los 600 Bq/m^3 , se podrían aplicar las medidas de color rojo. Por su mayor efectividad se escogería la ventilación del espacio de contención, pero ninguno de ellos posee uno por lo que, la siguiente opción sería la despresurización del terreno o, una forma más simple, aunque menos efectiva sería la instalación de una barrera de protección.

No obstante, a pesar de recomendarse la ventilación de la estancia cuando las concentraciones son inferiores a 600 Bq/m^3 , esta medida es aplicable a todos los casos y en este TFG se ha podido comprobar su eficacia. Para demostrarlo, se ha tomado el ejemplo de Correos, donde se aprecia que la media calculada durante todo el periodo ($738,76 \text{ Bq/m}^3$) medido es mucho mayor a la media durante el horario laboral ($190,14 \text{ Bq/m}^3$). Este caso se observa claramente en las mediciones realizadas (Figura 4-12). Cuando empieza el horario de trabajo, es decir, cuando se abren las puertas y ventanas, la concentración de radón baja de inmediato (punto 1 indicado en la Figura 4-12). Es, al finalizar la jornada laboral cuando al cerrar de nuevo todo, el radón se acumula y por tanto las concentraciones comienzan de nuevo a aumentar (punto 2 de la Figura 4-12). El fin de semana en que permanece todo cerrado, se aprecia como el valor de la concentración aumenta (punto 3 de la Figura 4-12). De igual

forma, lo anteriormente mencionado se observa también en la lavandería (Figura A-25). Por otro lado, es cierto que el aporte de energía para mantener el confort térmico en invierno sería muy elevado.

Concluyendo así que en aquellas estancias con concentraciones superiores se podrían combinar más de una medida, teniendo en cuenta la desventaja anteriormente mencionada sobre la ventilación.

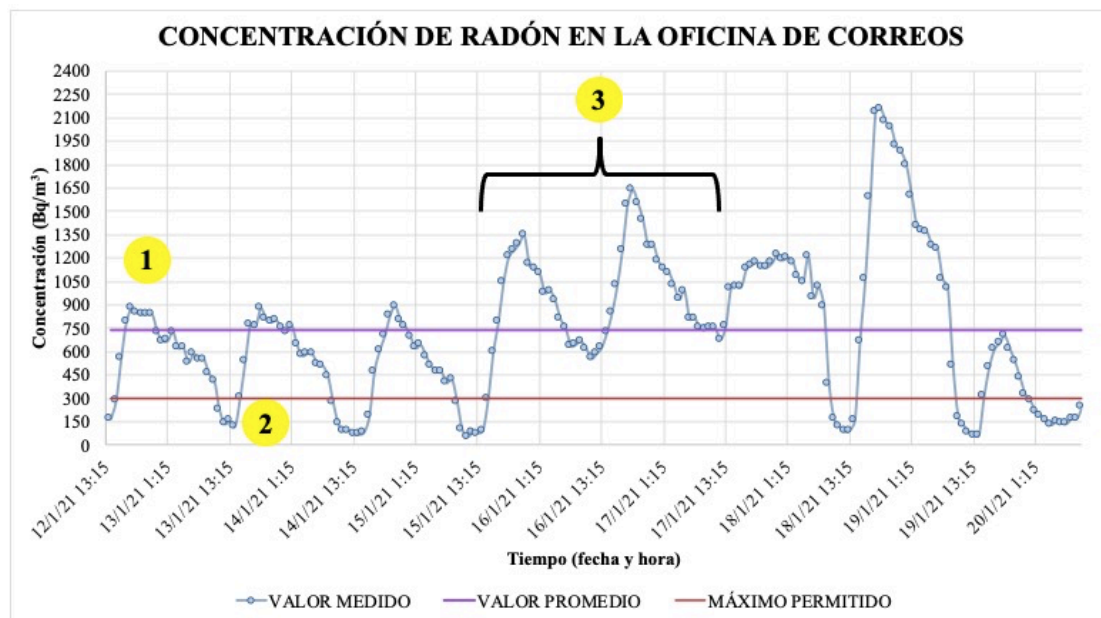


Figura 4-12 Concentración de radón en la oficina de Correos (elaboración propia)

En aquellas estancias, que son la mayoría, que no superan los 600 Bq/m^3 , las soluciones más efectivas son las mismas que en el anterior escenario, a excepción de la barrera de protección, que tendría mayor efectividad al tener concentraciones menores. Como solución es una buena medida a implementar, aunque en alguna ocasión podría resultar compleja su colocación por los elementos ya existentes en las distintas estancias. En cambio, debido a la efectividad demostrada en el presente trabajo, se recomienda, aumentar el hábito de ventilación, ya que, al tener concentraciones de radón menores, la necesidad de ventilación también será menor y por tanto el consumo energético.

Asimismo, se propone también limitar el tiempo en aquellos lugares donde la concentración ha resultado ser elevada. Por ejemplo, en la biblioteca del cuartel A.F.M, donde los aspirantes de 1º realizan todas sus horas de estudio. Para minimizar el riesgo, se podrían diversificar estas zonas de estudio, así como rotar entre el edificio Isaac Peral planta baja y planta alta y el patio de aulas, para estar sometidos a concentraciones menores.

4.4.2 Concienciación acerca del radón

Por otra parte, el estudio sobre el radón ha puesto de relevancia el gran desconocimiento que existe sobre este gas radioactivo. Además de la aplicación de las soluciones anteriormente recomendadas para reducir la concentración, se considera fundamental la información y concienciación al personal de la ENM. Para ello, se ha diseñado un modelo de ficha con el fin de poder colocarlas en los diferentes lugares donde se han realizado mediciones. El objetivo no es solo mostrar los datos de las mediciones llevadas a cabo (periodo de tiempo, dispositivo utilizado, valor de la concentración, etc) sino, dar a conocer el radón mediante unos datos breves y significativos, que a la vista de todo el personal puede ser un primer paso para sensibilizar sobre su importancia y fomentar los hábitos de ventilación de espacios interiores. A continuación, se muestra un ejemplo para el aula 17 (Figura 4-13).

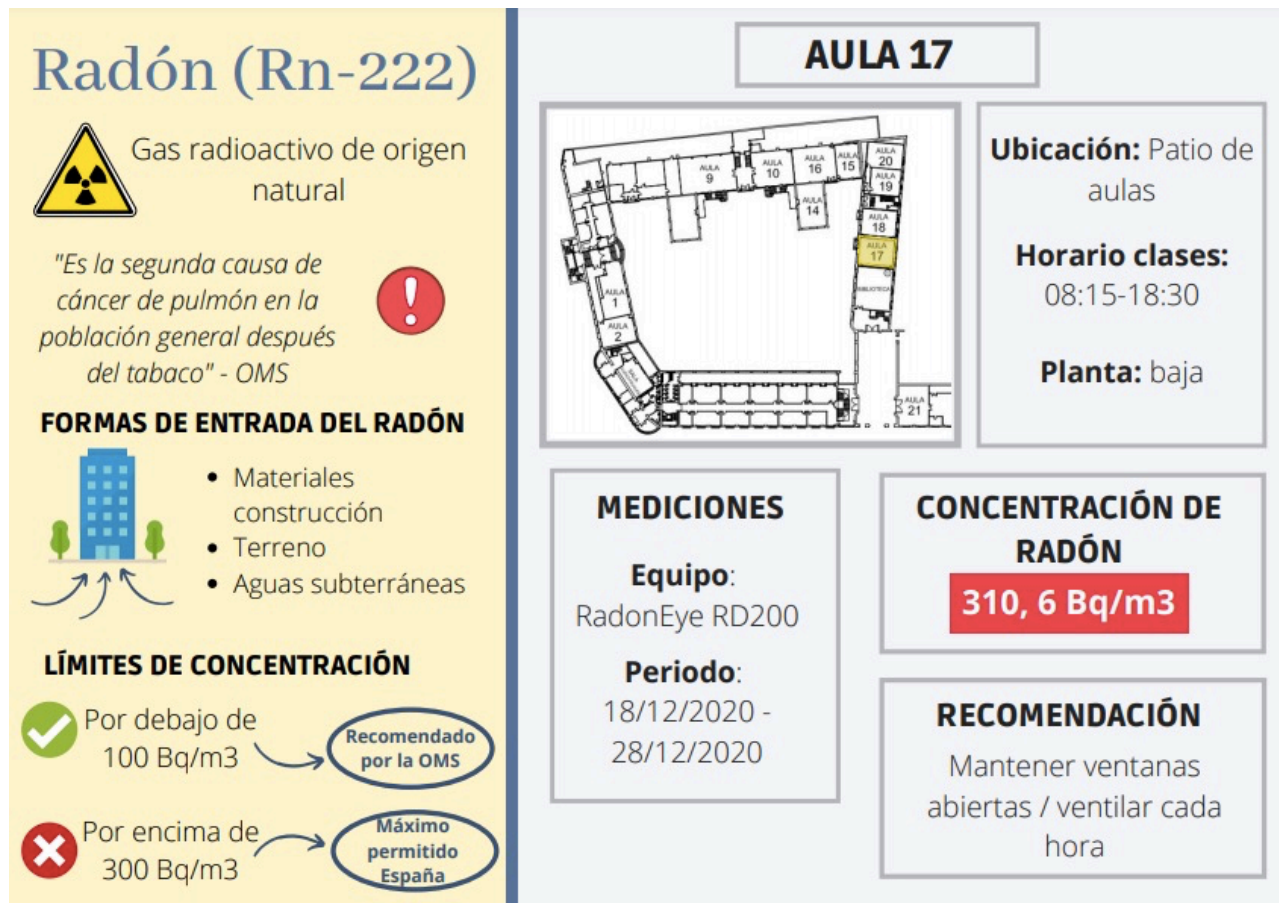


Figura 4-13 Ejemplo de ficha para el aula 17 (elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Tras la realización del presente trabajo, se ha llegado a las conclusiones que se exponen a continuación:

- El límite de concentración de radón está establecido en 300 Bq/m³, pero como ya se ha expuesto, no existe nivel de concentración a partir del cual se sepa con certeza que no supone un riesgo para la salud. La OMS propone, en la medida de lo posible, fijar el máximo permitido en 100 Bq/m³. Además, países cercanos ya poseen un límite inferior al nacional, por lo que cabría esperar que este cambiase.
- Debido al retraso en la transposición de la Directiva de la Unión Europea, España posee una normativa confusa y desactualizada sobre un tema de gran importancia como es el radón. El ejemplo de ello es en relación con el límite a aplicar de dosis efectiva anual. La directiva promulgada que marca la dosis de 6 mSv a partir de la cual se deben tomar medidas data del año 2013, sin embargo, la ICRP publica en 2017 un nuevo modelo de cálculo de dosis en el que se obtiene como dosis anual efectiva para trabajadores 4 mSv. La disyuntiva mencionada ocasiona ambigüedades resaltadas en el presente trabajo, teniendo que acudir a profesionales de este ámbito para esclarecer algunas cuestiones. Por otro lado, España al no haber transpuesto en su totalidad la directiva, no posee un plan nacional para luchar contra este gas tan desconocido como dañino, lo que se traduce también en un gran atraso frente a otros países.
- A lo largo del trabajo se han realizado mediciones en muchas de las principales estancias donde permanece tanto personal de la ENM como profesores y alumnos, aunque, debido a la duración temporal del TFG no ha sido posible cubrir todas y cada una de ellas. Además, debido al ritmo de vida en la ENM, algunas mediciones no se han podido llevar a cabo en las condiciones idóneas que dicta el CTE [21]. Cabe destacar también que estas estimaciones se han realizado en un año tan atípico como ha sido y es el 2020-2021 debido a la situación provocada por la Covid-19. Debido a todo ello, se han tomado a lo largo del trabajo diferentes suposiciones y aunque los datos obtenidos sirven como una primera estimación, se recomienda, por tanto, realizar mediciones a largo plazo en aquellos lugares en los que se han observado altas concentraciones o picos repentinos de altos valores.
- Tras analizar los datos obtenidos de las mediciones, se observan altas concentraciones de radón en diferentes lugares de la ENM, resaltando que el 34% de las estancias medidas se encuentran por encima del límite de la normativa, lo que ha llevado a obtener en ocasiones altas dosis efectivas anuales. Además, se ha observado cómo en determinados lugares

como el Patio de Aulas, por lo general las concentraciones obtenidas son mucho más elevadas que en otros sitios, posiblemente debido a las diferencias en la composición del suelo.

- En cuanto a las dosis efectivas anuales calculadas, se ha podido observar como algunas sobrepasan los límites establecidos. Sobre todo, en aquellos lugares en los que la concentración durante todo el periodo medido ha resultado ser muy diferente a la concentración media durante el horario laboral como la lavandería o Correos, destacando así la importancia de mantener buenos hábitos de ventilación. En cuanto a los alumnos, el caso más alarmante ha resultado para los alumnos de primer curso, quienes están expuestos a una dosis efectiva anual superior a la suma de los otros tres cursos.
- Es importante mencionar que no existen límites establecidos todavía para la dosis efectiva anual de radón para la población en general. No obstante, se ha comprobado como la dosis calculada para alumnos los cuales permanecen todo el día en la ENM es baja en comparación con la calculada para personal y profesores que únicamente están durante su horario laboral. En consecuencia, sería de esperar que estos estuviesen sometidos a dosis efectivas anuales mayores si se calculase durante todo el día y no solo en el trabajo.
- Debido a que no existe dosis por debajo de la cual el radón no se considere un peligro, se resalta la necesidad de tomar medidas de mitigación tanto en los lugares donde la concentración ha resultado estar por encima de los límites como en los demás casos donde aun así se obtiene una concentración elevada. Además, se ha comprobado la efectividad que tiene la ventilación en la disminución de la concentración de radón. Por lo que cabe destacar la importancia de mantener buenos hábitos de ventilación, aunque la concentración de radón sea baja.
- La peligrosidad del radón es un hecho, y sus efectos sobre la salud del ser humano son muy dañinos. En el transcurso de este trabajo, se ha puesto en evidencia la falta de conocimiento y de información existente acerca del radón. Por ello, se considera fundamental dar a conocer en mayor medida este gas, concienciar a la población del riesgo que supone y de que se deben tomar medidas.

Por último, gracias a este TFG se ha indagado más sobre la presencia de radón en la ENM. Si se examinan los objetivos fijados se puede comprobar cómo estos se han cumplido. En primer lugar, se ha continuado el trabajo de medición de concentración de radón llevado a cabo en TFG previos [7] [8], permitiendo localizar zonas con altas concentraciones y realizando así un mapa más amplio de las concentraciones de radón en la ENM. Posteriormente, se han analizado los datos en función de la normativa sobre el radón para evaluar el riesgo para el personal y con el fin de reducirlo, se han propuesto medidas de mitigación como la instalación de barreras de protección, un sistema de despresurización del terreno o aumentar el hábito de ventilación.

5.2 Líneas futuras

Este trabajo sirve como motivación para continuar en la investigación del radón y da pie a la propuesta de las siguientes líneas futuras.

- El radón, como se ha expuesto en el trabajo, emana del subsuelo y una vez ahí pasa a las aguas subterráneas. Se plantea por consiguiente el estudio de la concentración de radón en el agua de la ENM para así completar el cálculo de las dosis efectivas anuales del personal, profesores y alumnos.
- Para conocer si el radón se difunde a través del agua del mar y de qué manera, se propone estudiar la concentración de radón en el Patrullero Tabarca.

- Continuar las mediciones en la ENM en aquellos lugares en los que todavía no se hayan determinado las concentraciones de radón como por ejemplo la enfermería o el cuartel de marinería Méndez Núñez. También, priorizando aquellos donde hayan resultado valores altos, se insta a realizar mediciones a largo plazo (3 meses o más), tal y como recomienda la OMS y comparar con los datos obtenidos en el presente TFG.
- Dado que en algunas estancias se han obtenido valores de radón muy elevados, se plantea establecer la medida de ventilación de forma optimizada, es decir, hallar el tiempo de ventilación necesario para que las concentraciones en las diferentes estancias no sean elevadas, sin afectar al consumo energético.
- Para aumentar la precisión de la estimación de la dosis efectiva anual del personal, profesores y alumnos, se propone monitorizar a algunos individuos que lleven consigo un medidor portátil todo el día durante un periodo de tiempo establecido y comparar con las dosis efectivas anuales obtenidas en este TFG para comprobar la estimación realizada.
- Asimismo, se plantea la opción de continuar los cálculos de la dosis efectiva anual para el resto de los oficiales de la ENM, ya que en este trabajo únicamente se ha realizado para el caso del Comandante de Brigada de la quinta brigada, además se sugiere también para otros colectivos como puede ser el personal de la enfermería.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, «Calidad del Ambiente Interior,» [En línea]. Available: <https://www.insst.es/>. [Último acceso: 25 Enero 2021].
- [2] Organización Internacional del Trabajo, «Enciclopedia de Salud y Seguridad en el trabajo - Tomo II Capítulo 44,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.insst.es/tomo-ii>. [Último acceso: 25 Enero 2021].
- [3] Organización Mundial de la Salud, Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública, 2009.
- [4] Universidad de Barcelona, «Composición del granito,» [En línea]. Available: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/granito>. [Último acceso: 29 Enero 2021].
- [5] Instituto Geográfico Nacional, «Mapa litológico de España,» 1978. [En línea]. Available: <http://atlasnacional.ign.es/wane/Suelos>. [Último acceso: 29 Enero 2021].
- [6] Consejo de Seguridad Nuclear, «Mapa del potencial de radón en España,» Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>.
- [7] G. M. Yébenes, *Trabajo de Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa: "Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar"*, 2018-2019.
- [8] Á. G. Denia, *Trabajo de Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa: "Medición de la concentración de radón en el Centro Universitario de la Defensa y propuesta de medidas de mitigación"*, 2019-2020.
- [9] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, *NTP 728: Exposición laboral a la radiación natural*, 2001.
- [10] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, *NTP 440: Radón en ambientes interiores*, 1995.
- [11] International Commission on Radiological Protection, *Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides*, 2017.
- [12] A. Ruaño-Raviña, L. Quindós-Ponceta y J. M. Barros-Dios, «Radón interior y salud pública en España. Tiempo para la acción,» *Gaceta Sanitaria*, vol. 28, nº 6, pp. 439-441, 2014.

- [13] Consejo de Seguridad Nuclear, «Efectos de la radiactividad y protección contra la radiación,» [En línea]. Available: <https://www.csn.es/documents>.
- [14] B. F. Vázquez, *Tesis doctoral: "Estudio experimental sobre la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones"*, 2009.
- [15] Consejo de Seguridad Nuclear, «Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico,» 2013. [En línea]. Available: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1581136598_1572009112950.pdf.
- [16] Laram, «Radón,» [En línea]. Available: <https://www.radonlaram.es/>. [Último acceso: 29 Enero 2021].
- [17] S. Darby, J. M. Barros-Dios, A. Auvinen y e. al, «Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies,» *BMJ*, vol. 330, nº 7485, p. 223, 2005.
- [18] J. H. Lubin, Z. Yuan Wang, J. D. Boice y e. al, «Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies,» *International Journal of Cancer*, vol. 109, nº 1, pp. 132-137, 2004.
- [19] International Commission on Radiological Protection, *Publication 115. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*, 2010.
- [20] D. Krewski, J. H. Lubin, J. M. Zielinski y e. al, «Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies,» *Epidemiology*, vol. 16, nº 2, pp. 137-145, 2005.
- [21] Ministerio de Fomento, *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico HS - Salubridad*, 2019.
- [22] M. Torres-Durán, A. Ruano- Raviña y e. al., «Lung cancer in never-smokers: a case-control study in a radon-prone area (Galicia, Spain),» *European Respiratory Journal*, vol. 44, nº 4, pp. 994-1001, 2014.
- [23] J. M. Barros-Dios, M. Amparo Barreiro, A. Ruano-Raviña y e. al., «Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study,» *American Journal of Epidemiology*, vol. 156, nº 6, pp. 548-555, 2002.
- [24] J. Llorca, M. Bringas-Bollada, L. Quindós-Ponceta y e. al., «No evidence of a link between household radon concentrations and lung cancer in Cantabria, Spain,» *Archivos de Bronconeumología*, vol. 43, nº 12, p. 696, 2007.
- [25] J. M. Barros-Dios, A. Ruano-Raviña, M. Pérez-Ríos y e. al., «Residential radon exposure, histologic types and lung cancer risk. A case-control study in Galicia, Spain,» *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 21, nº 6, pp. 951-958, 2012.
- [26] R. Barbosa-Lorenzo, A. Ruano-Raviña y e. al., «Radón residencial y cáncer de pulmón. Un estudio ecológico en Galicia,» *Medicina Clínica*, vol. 144, nº 7, pp. 304-308, 2015.
- [27] R. Barbosa-Lorenzo, A. Ruano-Raviña, S. Cerdeira-Caramés y e. al, «Radón residencial y cáncer de pulmón: un estudio de cohorte en Galicia, España,» *Cadernos de Saúde Pública*, vol. 33, nº 6, 2017.
- [28] Ministerio de Sanidad, «Acción frente al radón,» 2020. [En línea]. Available: https://www.mscbs.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/medioAmbiente/docs/Accion_frente

- _al_radon_.pdf. [Último acceso: 1 Febrero 2021].
- [29] M. Pérez-Ríos, J. M. Barros-Dios, A. Montes-Martínez and e. al, "Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem?," *BMC public health*, vol. 10, no. 256, 2010.
- [30] Health Protection Agency, Radon and Public Health, 2009.
- [31] B. W. Wheeler, J. Allen, M. H. . Depledge y A. Curnow, «Radon and Skin Cancer in Southwest England: an ecologic study,» *Epidemiology*, vol. 23, nº 1, pp. 44-52, 2012.
- [32] E. Vaclavik Bräuner, S. Loft, M. Sorensen y e. al, «Residential Radon Exposure and Skin Cancer Incidence in a Prospective Danish Cohort,» *Plos One*, vol. 10, nº 8, 2015.
- [33] E. Vaclavik Bräuner, Z. J. Andersen, C. E. Andersen y e. al, «Residential Radon and Brain Tumour Incidence in a Danish Cohort,» *Plos One*, vol. 8, nº 9, 2013.
- [34] A. Ruano-Raviña, N. Aragonés, P.-R. Monica y e. al., «Residential radon exposure and brain cancer: an ecological study in a radon prone area (Galicia, Spain),» *Scientific reports*, vol. 7, nº 3595, 2017.
- [35] España, «Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.,» Boletín Oficial del Estado, de 26 de julio, núm 178, pp 27284 a 27393, 2001.
- [36] Consejo de Seguridad Nuclear, *Instrucción IS-33, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural*, 2011.
- [37] Consejo de la Unión Europea, «Directiva (UE) 2013/59/EURATOM del Consejo, de 5 de diciembre, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes,» Diario Oficial de la Unión Europea L13/1, 17 de enero, 2013.
- [38] Consejo de Seguridad Nuclear, *Preguntas frecuentes sobre radón en lugares de trabajo*, 2018.
- [39] Ministerio de Fomento, *Código Técnico de la Edificación: Documento básico HS Salubridad*, 2019.
- [40] España, «Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales.,» Boletín Oficial del Estado, de 10 de noviembre, núm 269, pp. 32590 a 32611, 1995.
- [41] España, «Real Decreto 1299/2006 por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro,» Boletín Oficial del Estado, de 19 de diciembre, núm 302, 2006.
- [42] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, *NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud*, 1999.
- [43] International Commission on Radiological Protection, *Publication 65. Protection Against Radon-222 at Home and at Work*, 1993.
- [44] International Commission on Radiological Protection, *Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure*, 2014.
- [45] Health Protection Agency, «Radon and Public Health,» 2009. [En línea]. Available: www.ukradon.org. [Último acceso: 3 Febrero 2021].

- [46] A. R. Raviña, *Políticas internacionales sobre radón domiciliario*, 2008.
- [47] Xunta de Galicia, Radón - Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes, 2018.
- [48] J. L. Márquez, J. C. Sáez, A. Álvarez y e. al, *Influencia de las condiciones meteorológicas en la variación anual de la actividad de Rn ambiental*, Informes Técnicos Ciemat 1351, 2015.
- [49] Radon Eye, «Radon Eye Operation Manual,» [En línea]. Available: <http://radonftlab.com/>. [Último acceso: 16 Enero 2021].
- [50] Ministerio de Fomento, *Documento Básico HE - Ahorro de energía*, 2019.
- [51] Consejo de Seguridad Nuclear, *Guía de Seguridad del CSN (GS-11.04): Sobre "Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo"*, 2012.
- [52] Centro Universitario de la Defensa, 2021. [En línea]. Available: <https://cud.uvigo.es/>. [Último acceso: 12 Febrero 2021].
- [53] Google, «Formularios,» 2021. [En línea]. Available: <https://docs.google.com/forms/u/0/>. [Último acceso: 16 Febrero 2021].
- [54] International Commission on Radiological Protection, *Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*, 1994.
- [55] A. Vargas, A. Röttger, J. W. Marsh y e. al., *Radon: Dosimetry, Metrology and Regulation*, 2020.
- [56] A. Vargas, *Jornada técnica sobre el radón: Metrología y Dosimetría del Radón*, 2018.
- [57] Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc), *Guía de rehabilitación frente al radón*, 2020.

ANEXO I: UNIDADES

El presente anexo pretende clarificar las diferentes unidades, así como factores de conversión mencionados en el apartado 4.1.3.

Concentración potencial de energía alfa (PAEC): Es la concentración de energía alfa de la progenie del radón, anteriormente utilizada como medida de concentración. Su unidad histórica es el WL (working level) que mide la combinación de descendientes del radón en 1 m³ de aire que equivale a la emisión de $1\,300 \times 10^8$ MeV de energía alfa.

$$1 \text{ WL} = 1.300 \times 10^8 \text{ MeV m}^{-3} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ mJ m}^{-3}$$

Concentración de radón en equilibrio equivalente (EEC): Se define como la concentración de gas radón que estando en equilibrio radioactivo con sus descendientes tiene la misma energía alfa potencial que su progenie en el aire. La EEC es una medida de concentración de progenie, es decir de la PAEC.

$$1 \text{ Bq/m}^3 = 5.56 \times 10^{-9} \text{ J m}^{-3} = 2.67 \times 10^{-4} \text{ WL}$$

Factor de equilibrio (F): Es la relación entre la EEC y la concentración de gas radón.

$$F = \text{EEC} / C_{\text{Rn-222}}$$

Exposición: La exposición a la energía alfa potencial (PAE) es la integral temporal de la PAEC en el aire. Su unidad histórica es el WLM (working level month), esto es, la exposición a una atmósfera de 1 WL durante un mes (170 horas).

$$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ h m}^{-3} = (6.37 \times 10^5 / F) \text{ Bq h m}^{-3}$$

ANEXO II: ENCUESTA

Con el propósito de conocer los hábitos de los distintos cursos de la ENM y así estimar las horas de exposición en las diferentes estancias, se realizó la encuesta que se muestra a continuación.

Horario individual ENM	
*Obligatorio	
Empleo *	
Elige	
¿Cuánto tiempo (de media) pasa a la semana en el casino?	
☐ Menos de 2h ☐ 2 a 4 horas ☐ 6 a 8 horas ☐ Más de 8 horas ☐ Otro:	
¿Cuánto tiempo (de media) a la semana va a la piscina?	
☐ Solo en horario de deporte ☐ 1 hora ☐ 2 horas ☐ Más de 2 horas ☐ Otro:	
¿Cuánto tiempo (de media) a la semana va al gimnasio / pabellón de deporte?	
☐ Solo en horario de deporte ☐ 1h ☐ 2-4 horas ☐ Más de 5 horas ☐ Otro:	
¿Dónde realiza el estudio?	
☐ En la biblioteca A.F.M ☐ En el estudio del A.F.M ☐ Otro:	
¿Cuánto tiempo (de media) a la semana estudia después de fin de actividades?	
☐ Nada ☐ 1h ☐ 2h ☐ 3h ☐ 4h ☐ Otro:	
¿Cuánto tiempo (de media) pasa en el estudio el fin de semana?	
Tu respuesta	

ANEXO III: CONCENTRACIONES DE RADÓN

En el presente anexo se muestran los valores de concentración medidos en los diferentes lugares de la ENM, así como la media total de estos y el valor máximo permitido en España, de 300 Bq/m³.

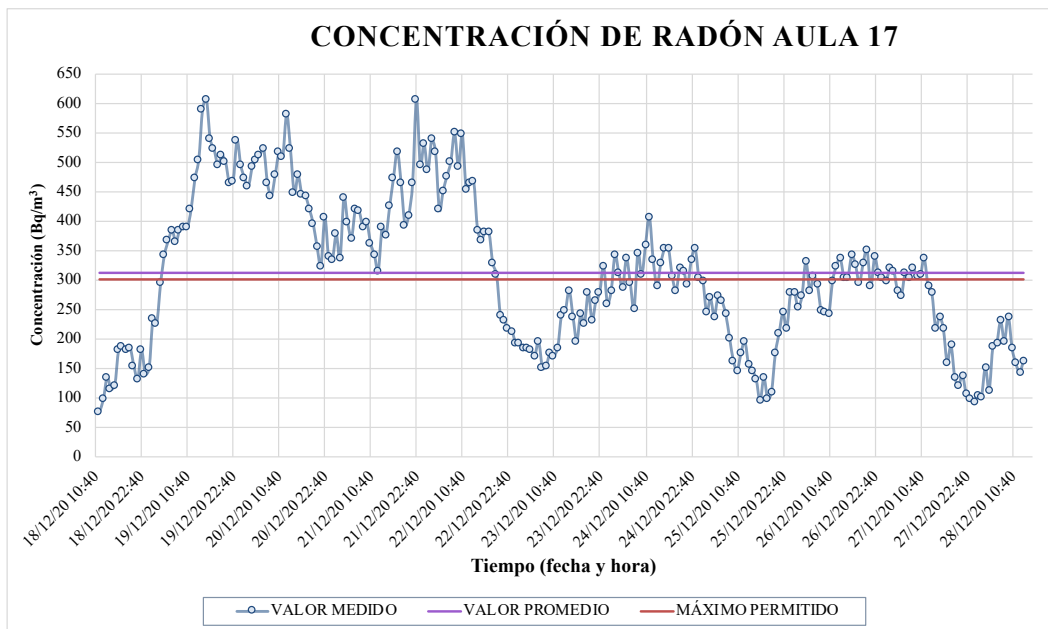


Figura A-1 Concentración de radón en el aula 17 (elaboración propia)

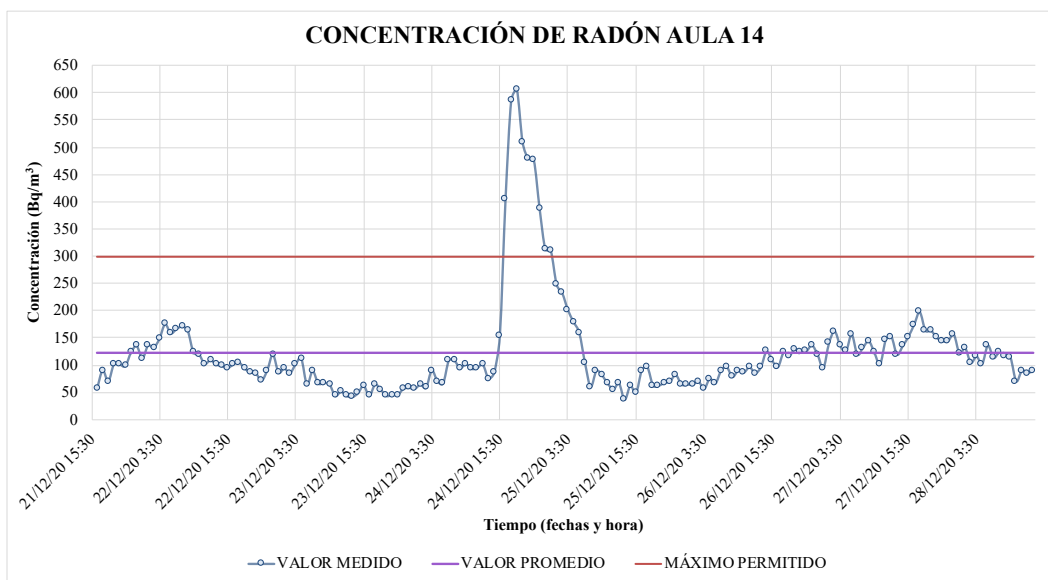


Figura A-2 Concentración de radón en el aula 14 (elaboración propia)

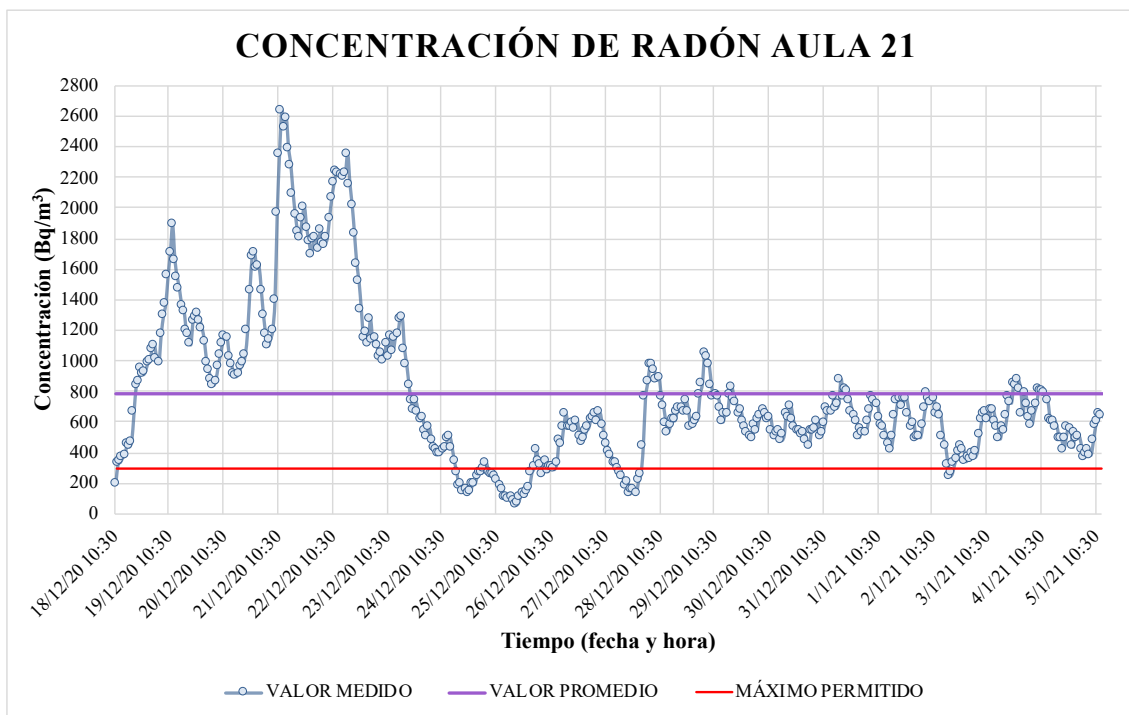


Figura A-3 Concentración de radón en el aula 21 (elaboración propia)

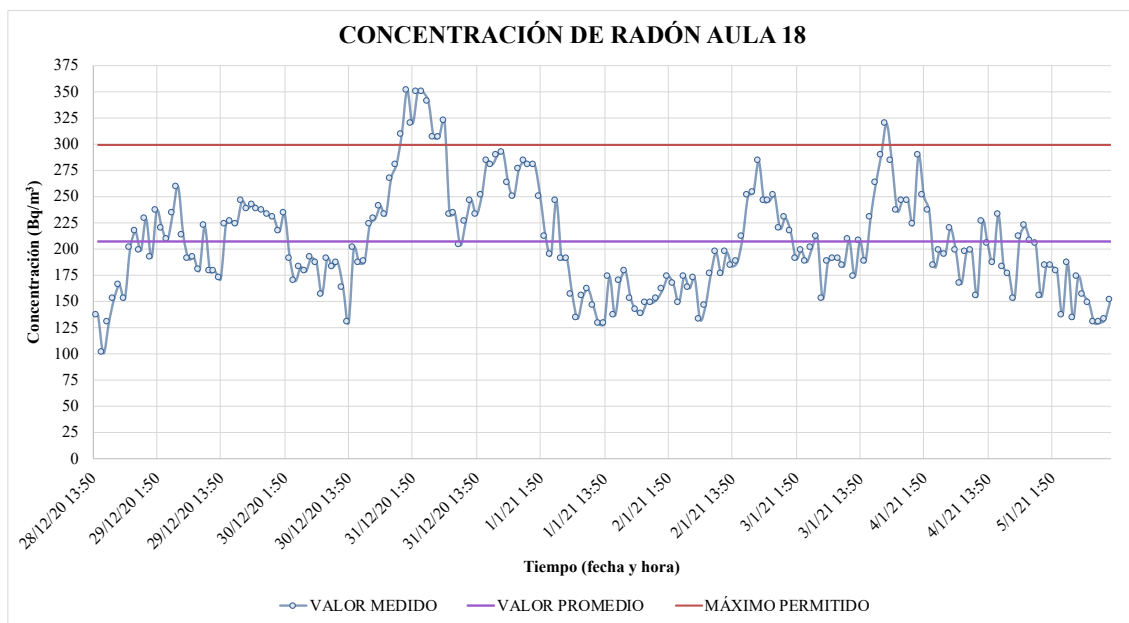


Figura A-4 Concentración de radón en el aula 18 (elaboración propia)

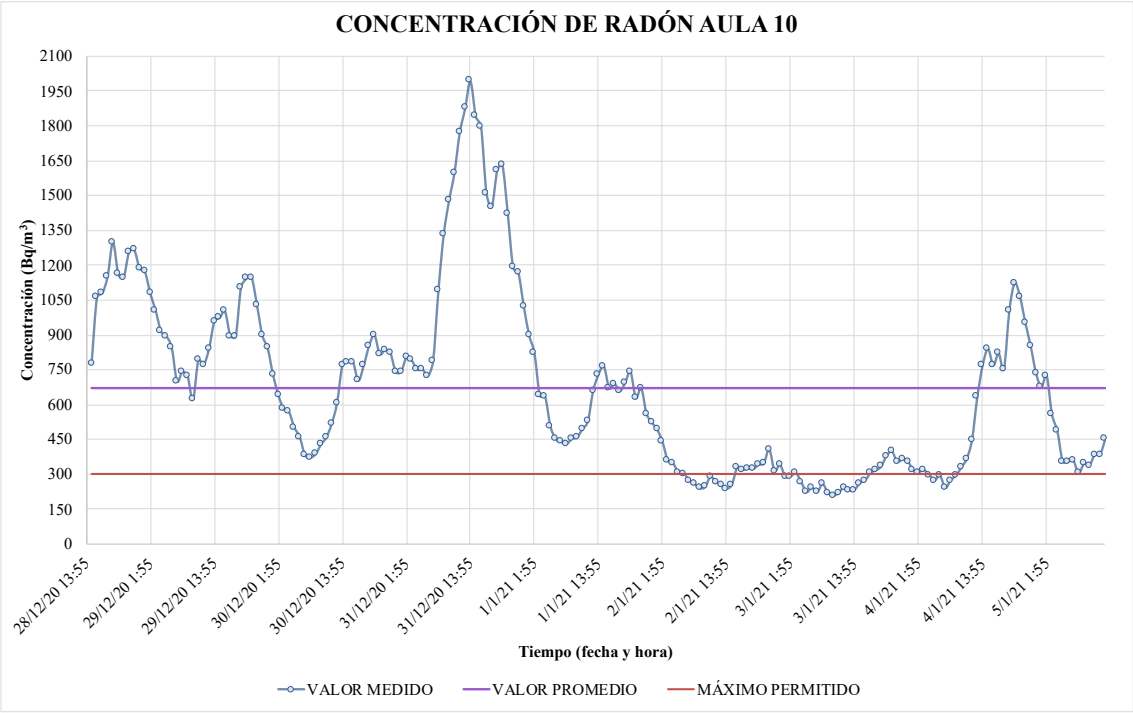


Figura A-5 Concentración de radón en el aula 10 (elaboración propia)

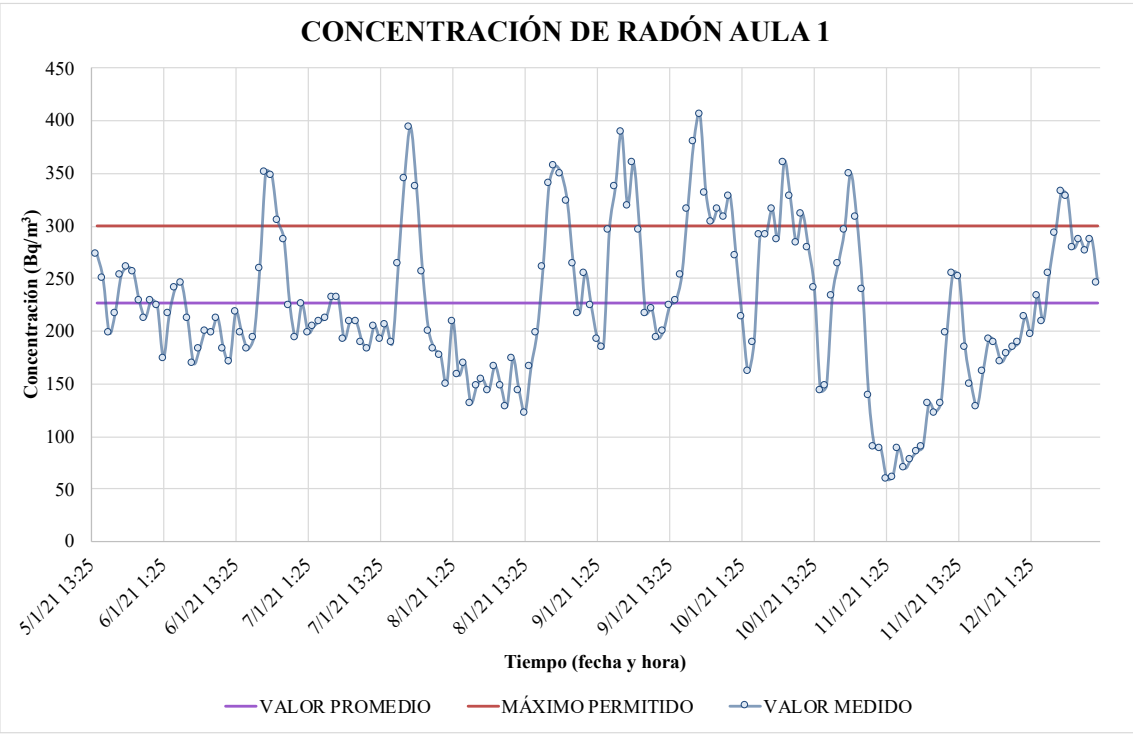


Figura A-6 Concentración de radón en el aula 1 (elaboración propia)

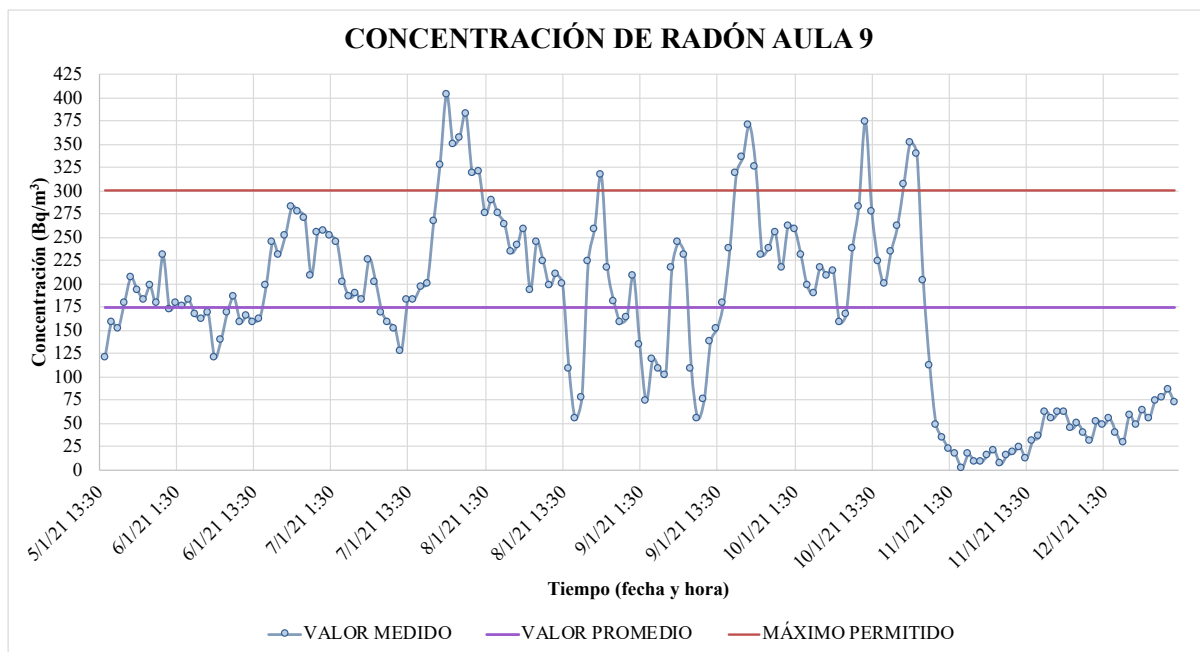


Figura A-7 Concentración de radón en el aula 9 (elaboración propia)

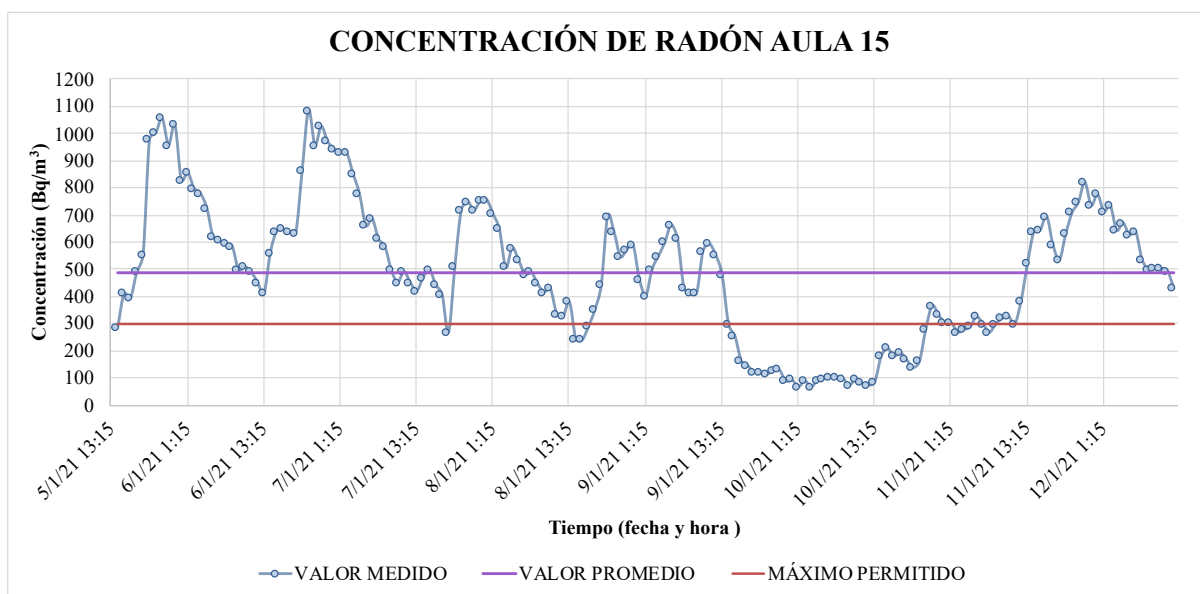


Figura A-8 Concentración de radón en el aula 15 (elaboración propia)

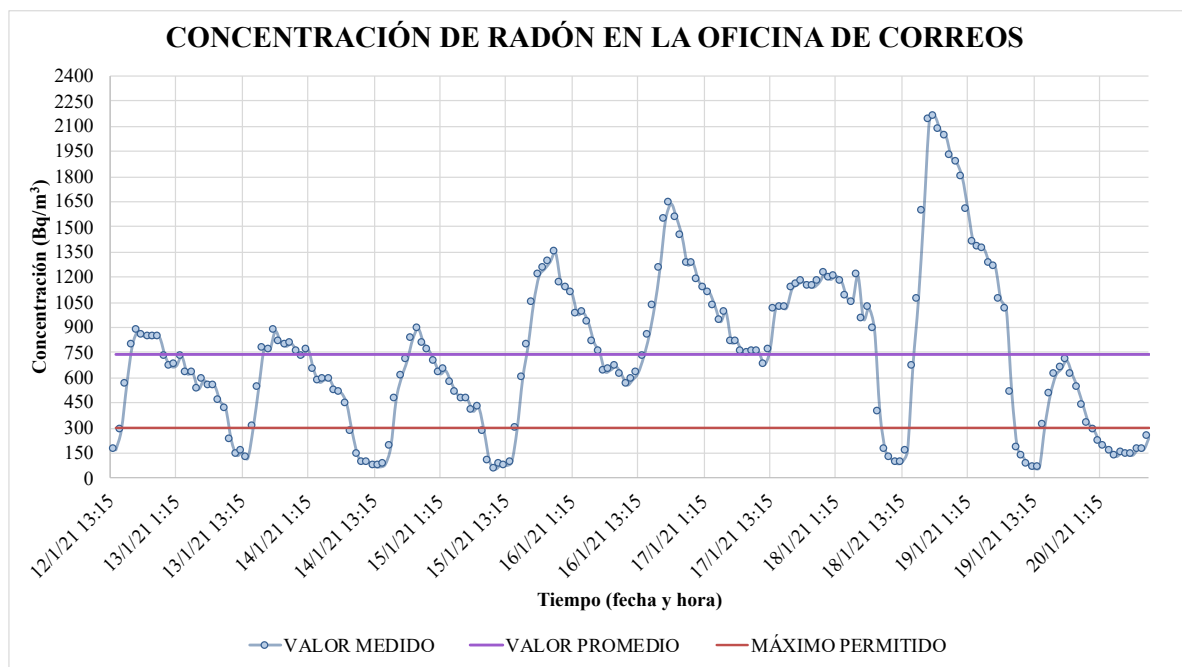


Figura A-9 Concentración de radón en la oficina de Correos (elaboración propia)

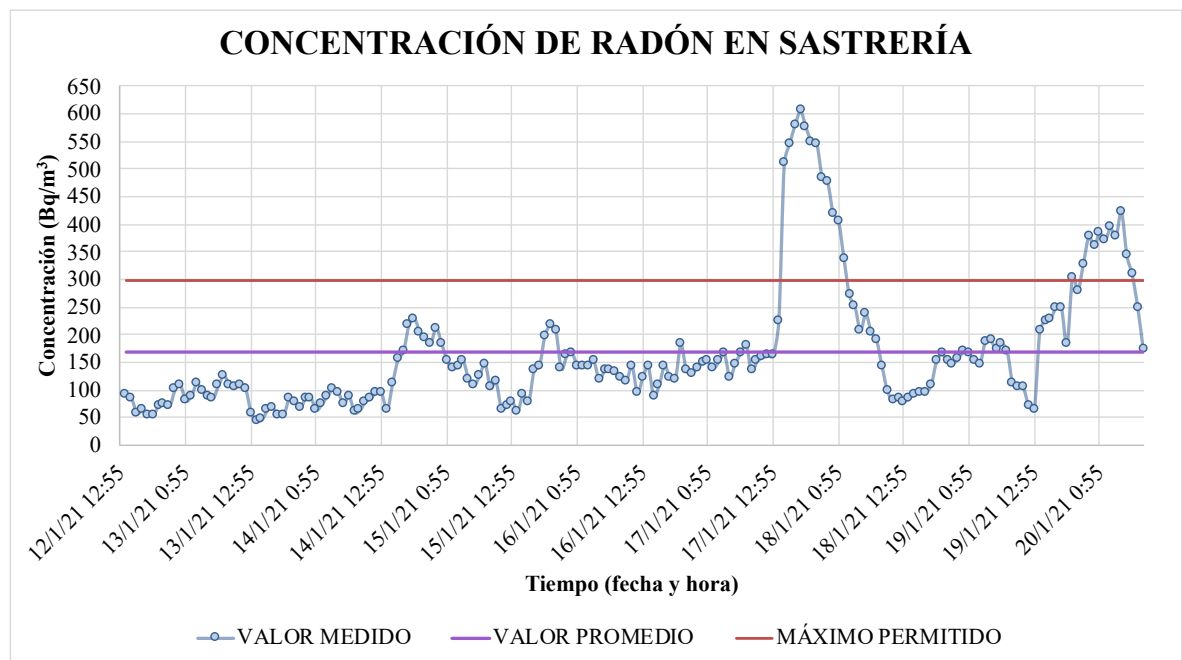


Figura A-10 Concentración de radón en sastrería (elaboración propia)

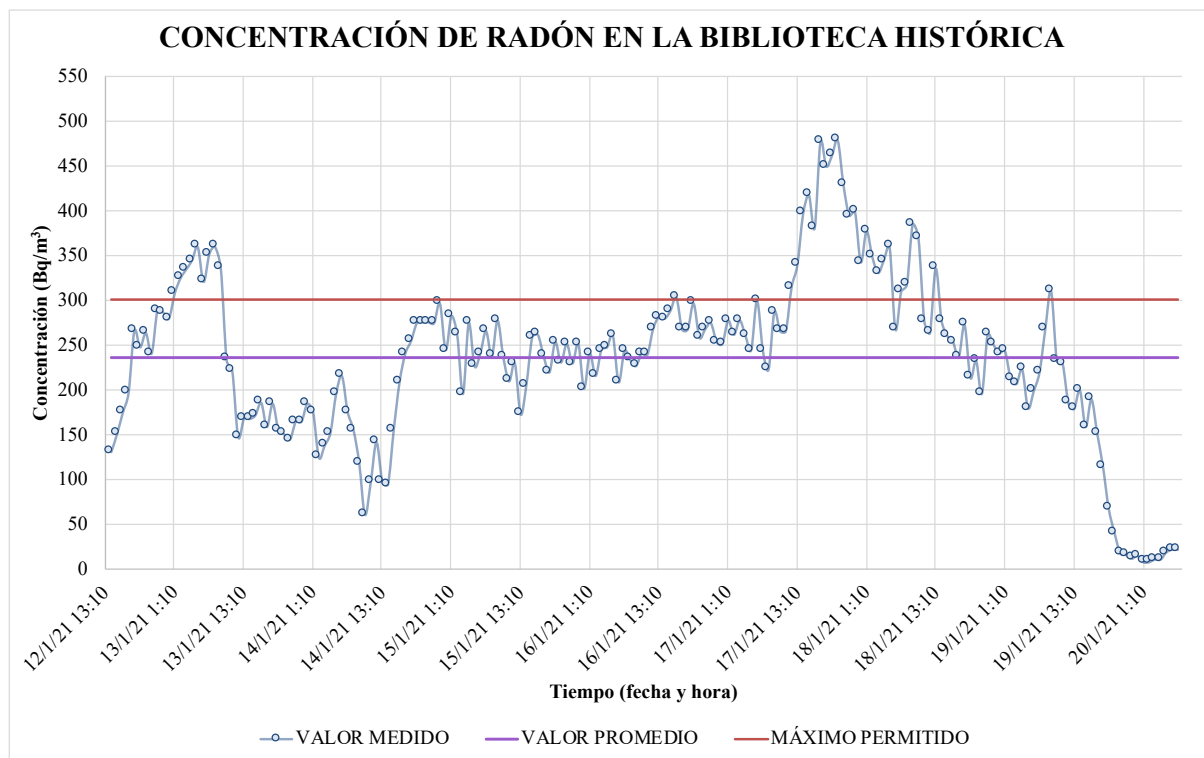


Figura A-11 Concentración de radón en la biblioteca histórica (elaboración propia)

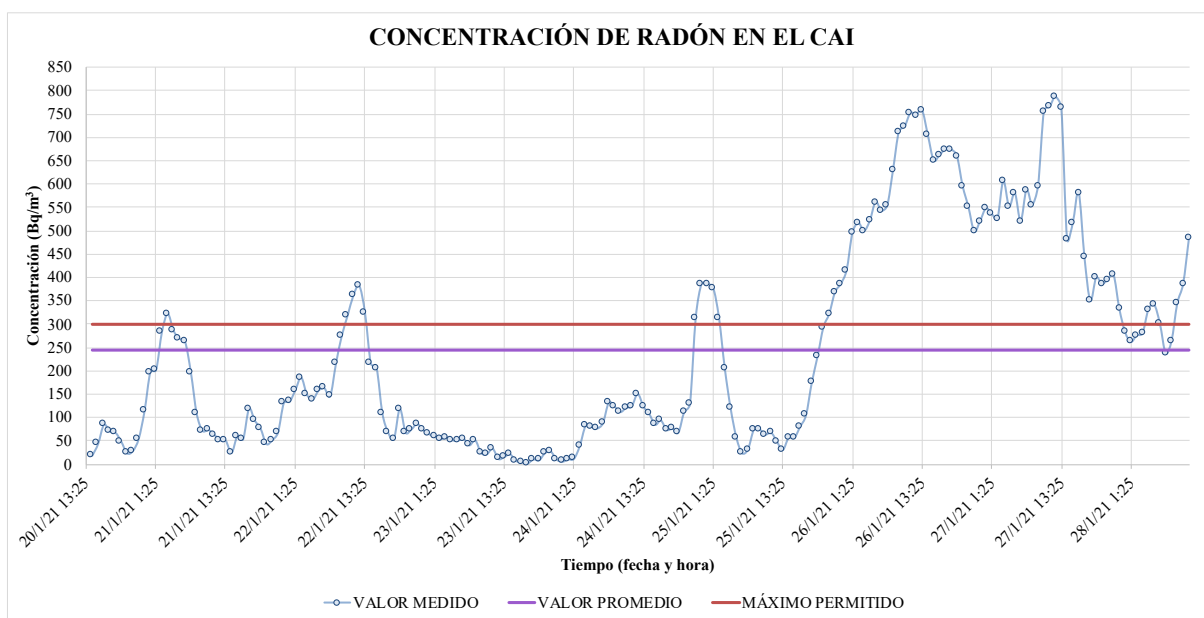
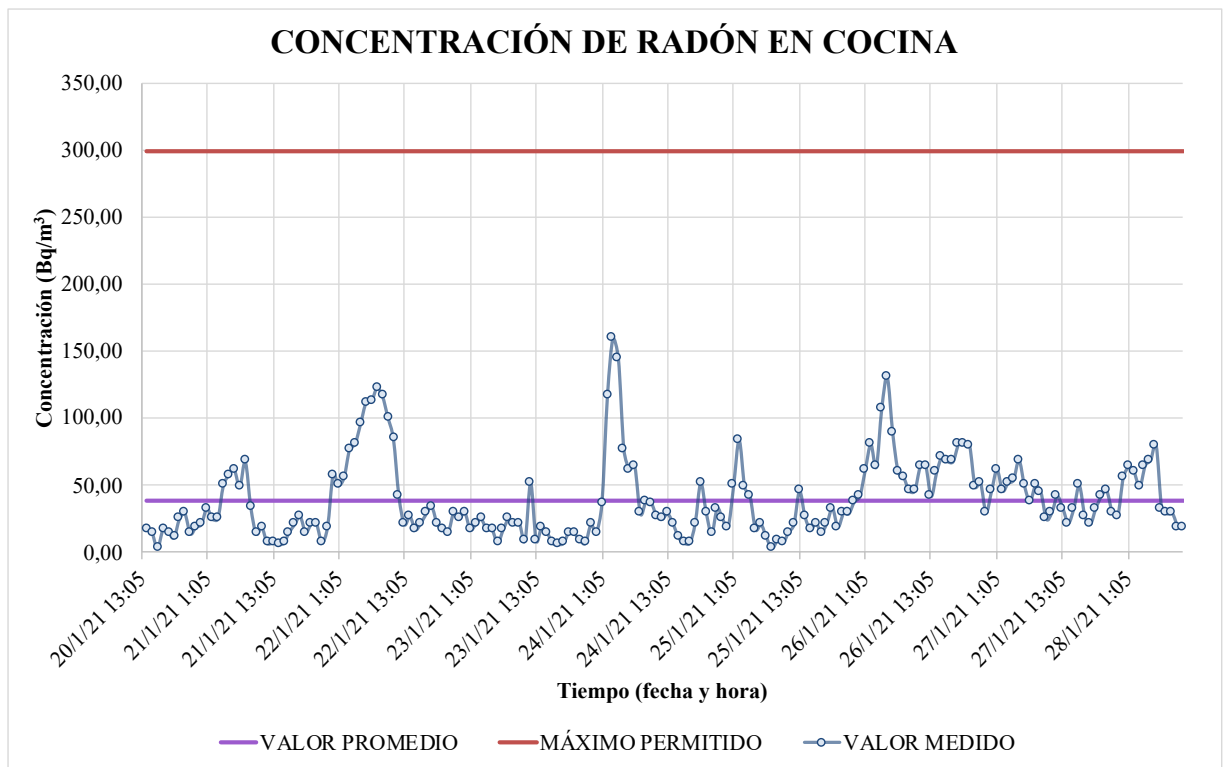
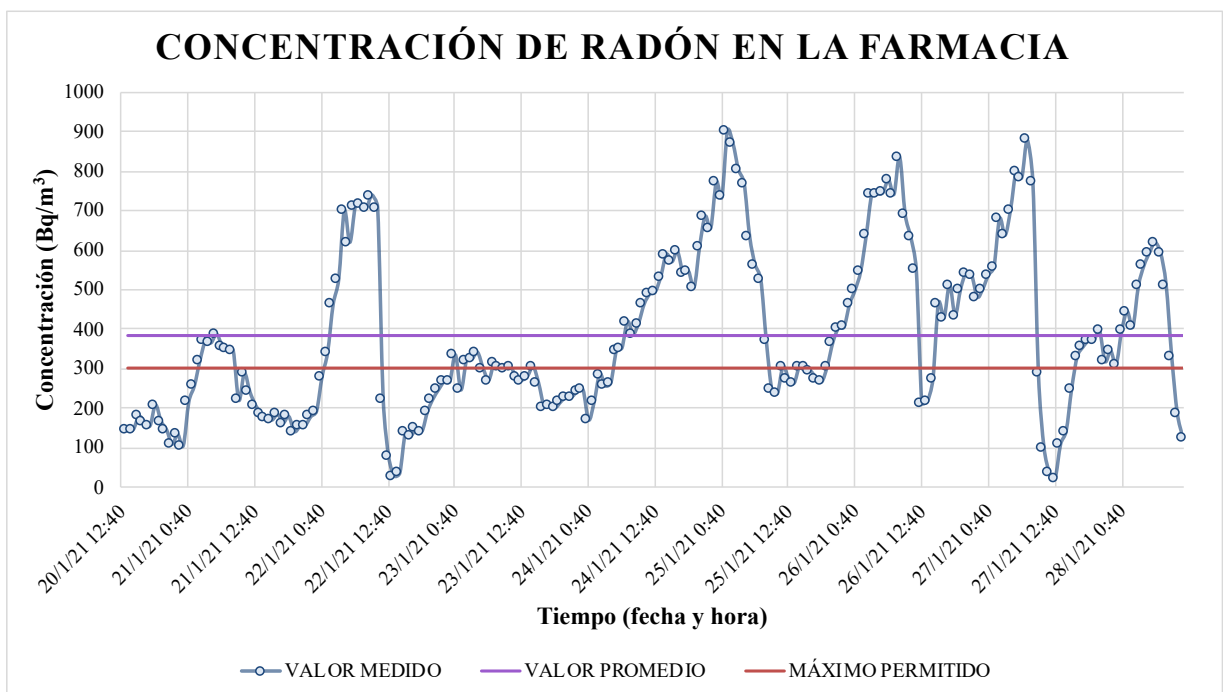


Figura A-12 Concentración de radón en el CAI (elaboración propia)

**Figura A-13 Concentración de radón en cocina (elaboración propia)****Figura A-14 Concentración de radón en la farmacia (elaboración propia)**

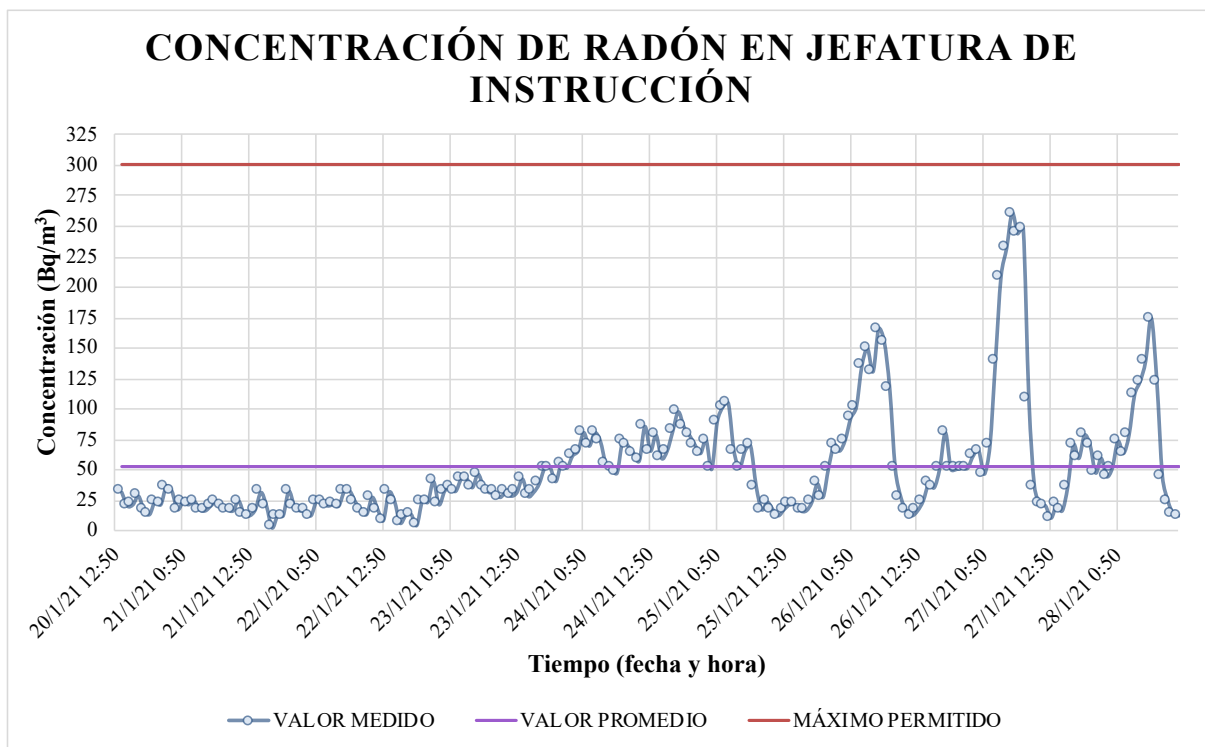


Figura A-15 Concentración de radón en despacho de Jefatura de Instrucción (elaboración propia)

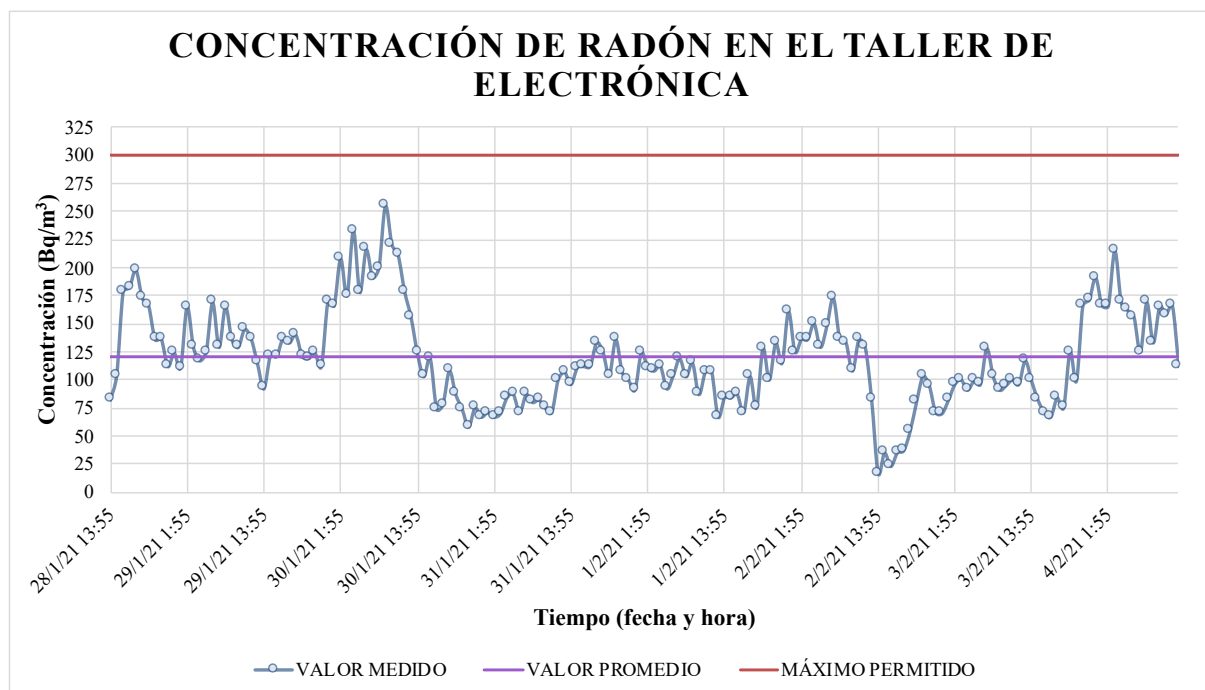
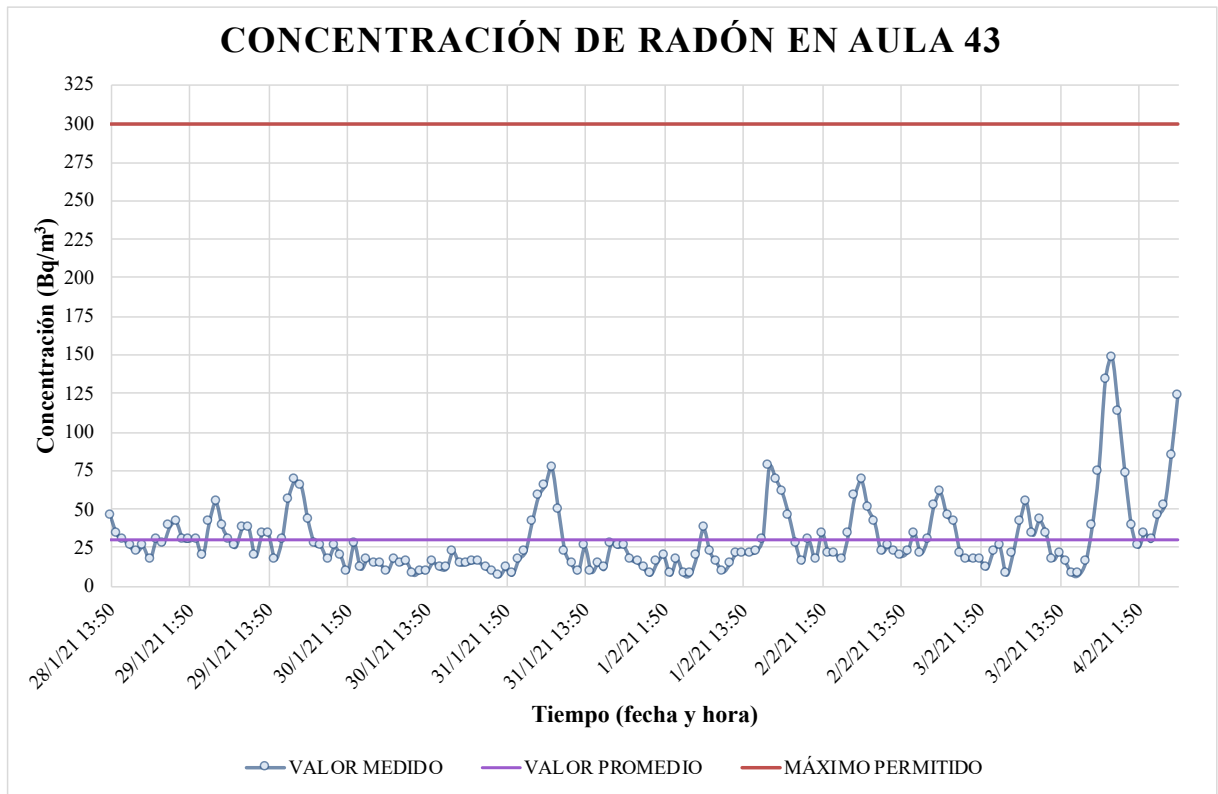
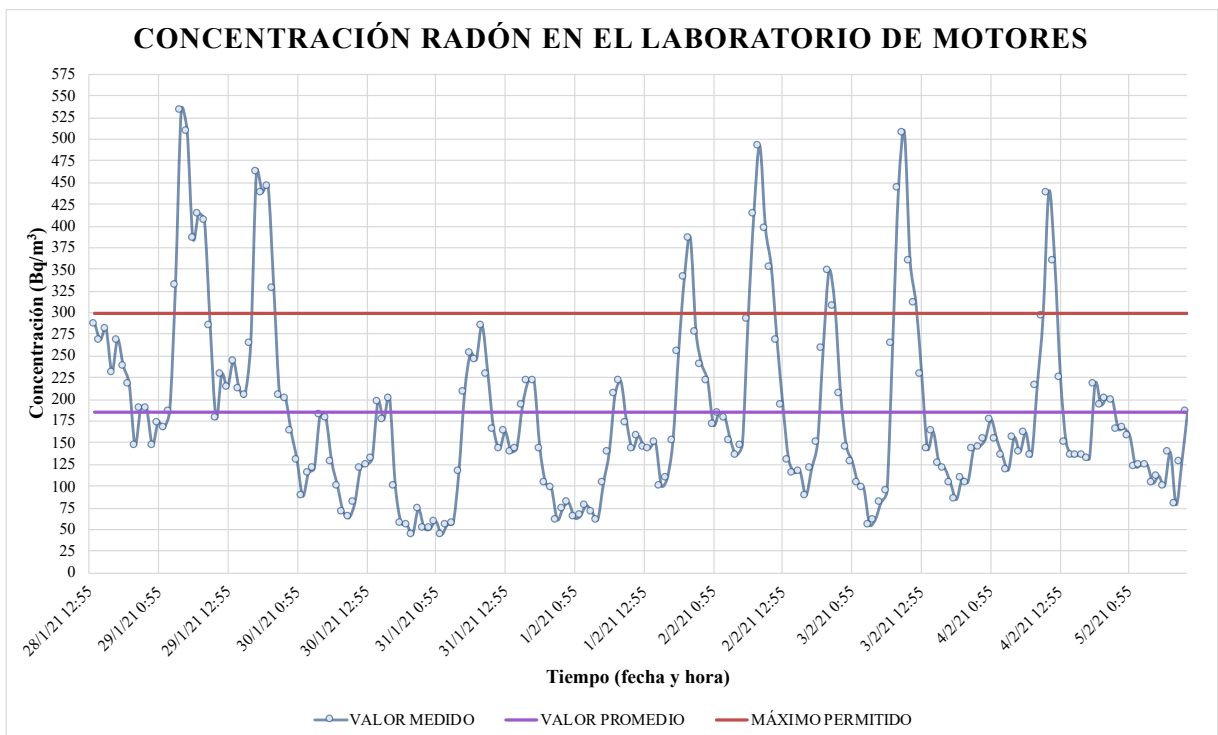


Figura A-16 Concentración de radón en el taller de electrónica (elaboración propia)

**Figura A-17 Concentración de radón en el aula 43 (elaboración propia)****Figura A-18 Concentración de radón en el laboratorio de motores (elaboración propia)**

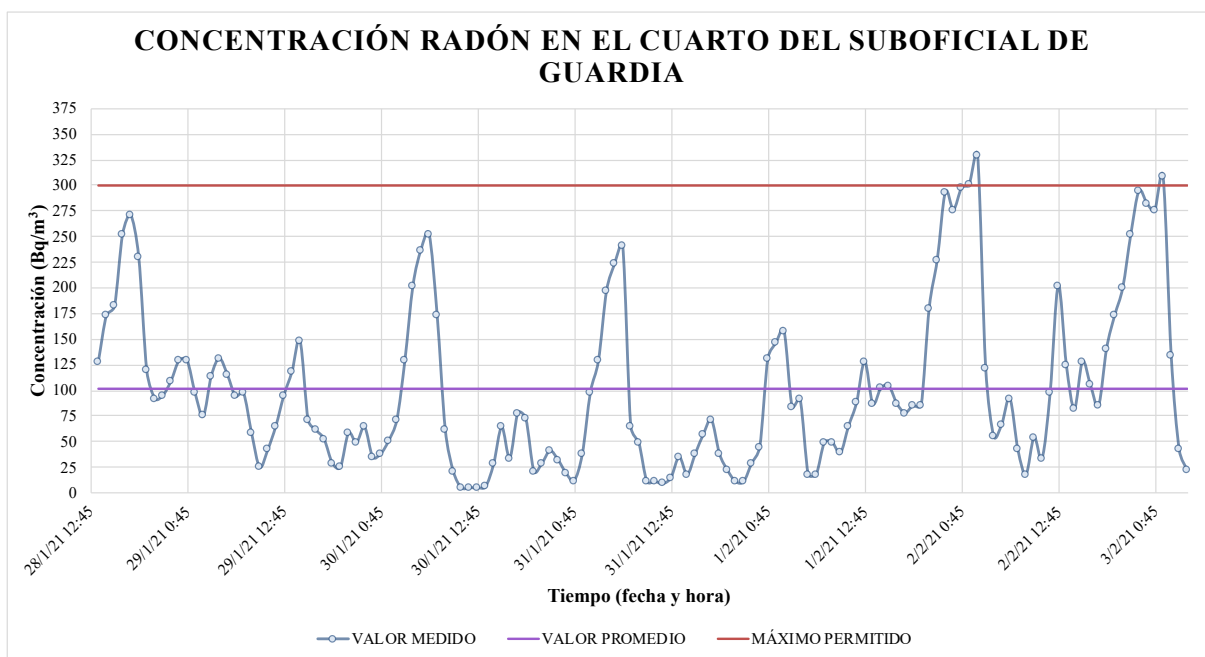


Figura A-19 Concentración de radón en el cuarto del Suboficial de Guardia (elaboración propia)

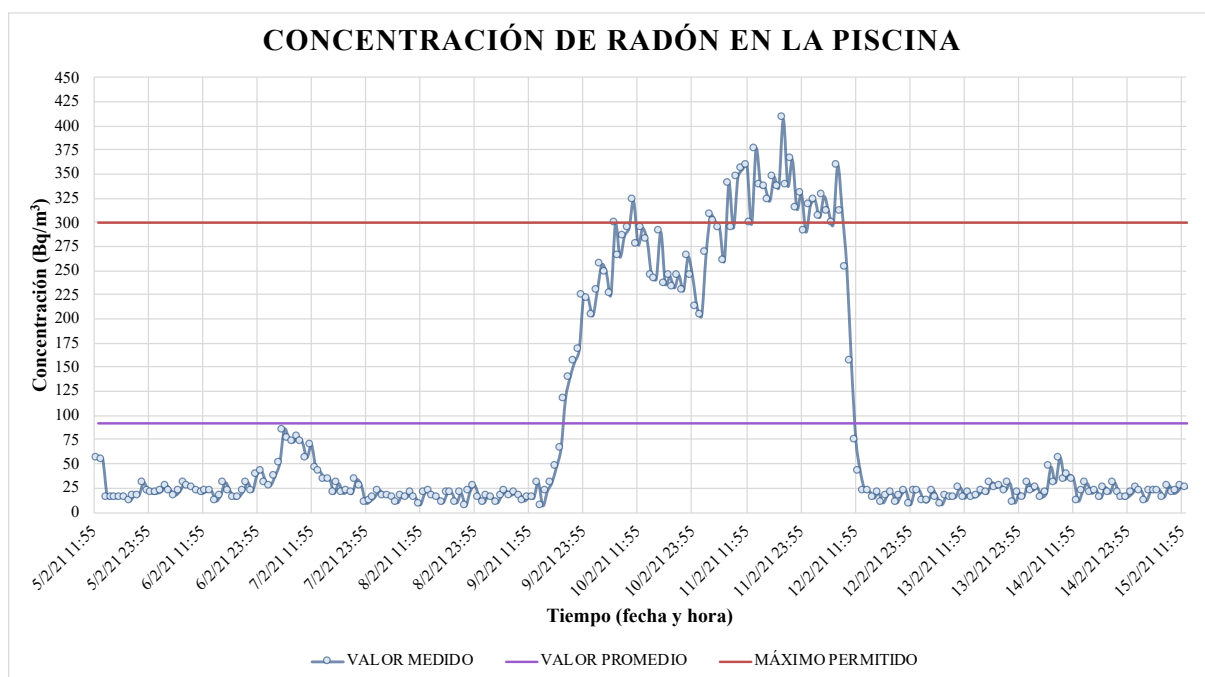


Figura A-20 Concentración de radón en la piscina (elaboración propia)

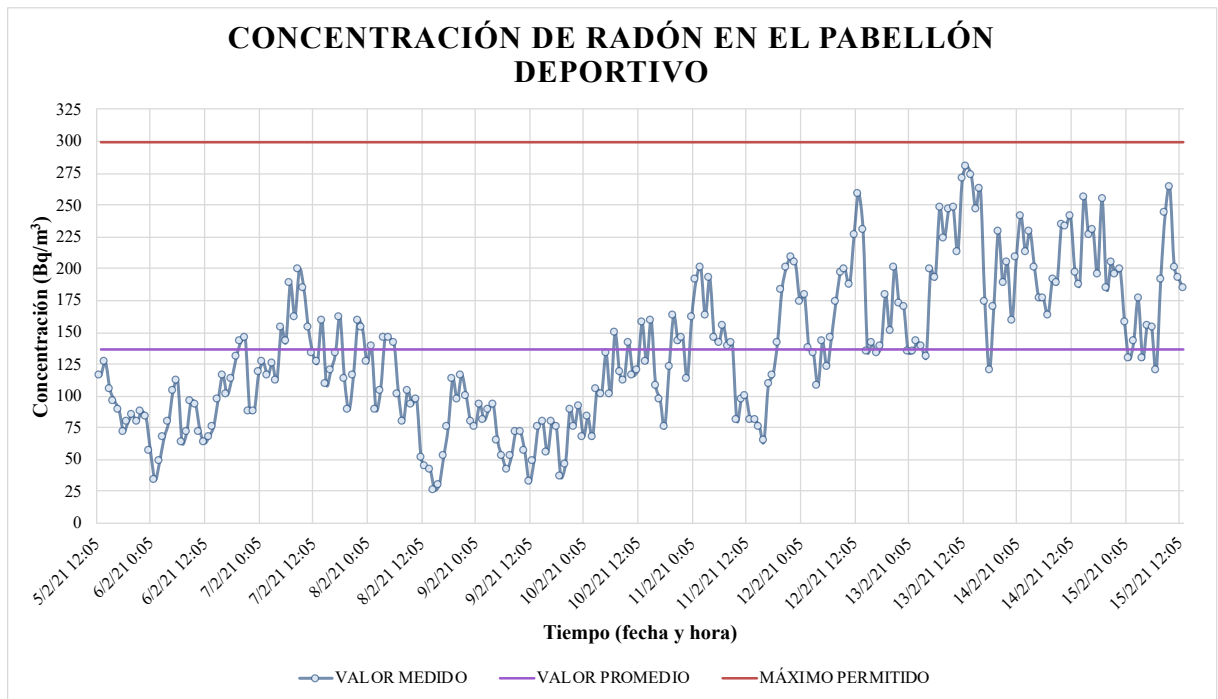


Figura A-21 Concentración de radón en el pabellón deportivo (elaboración propia)

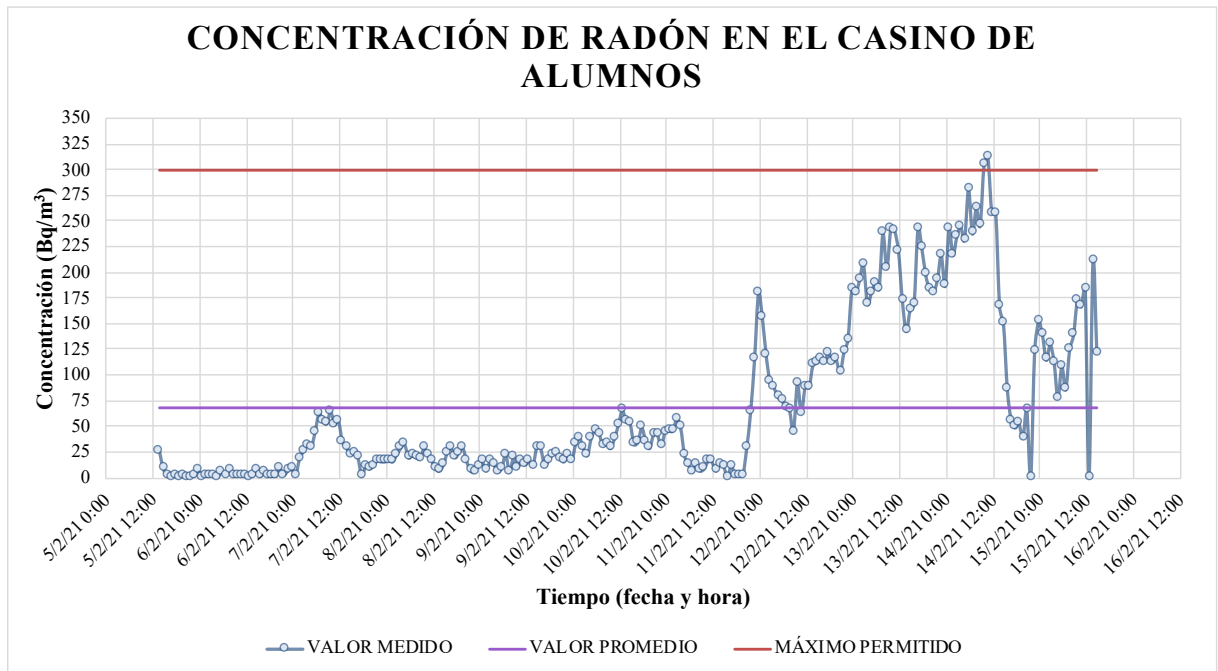


Figura A-22 Concentración de radón en el casino de alumnos (elaboración propia)

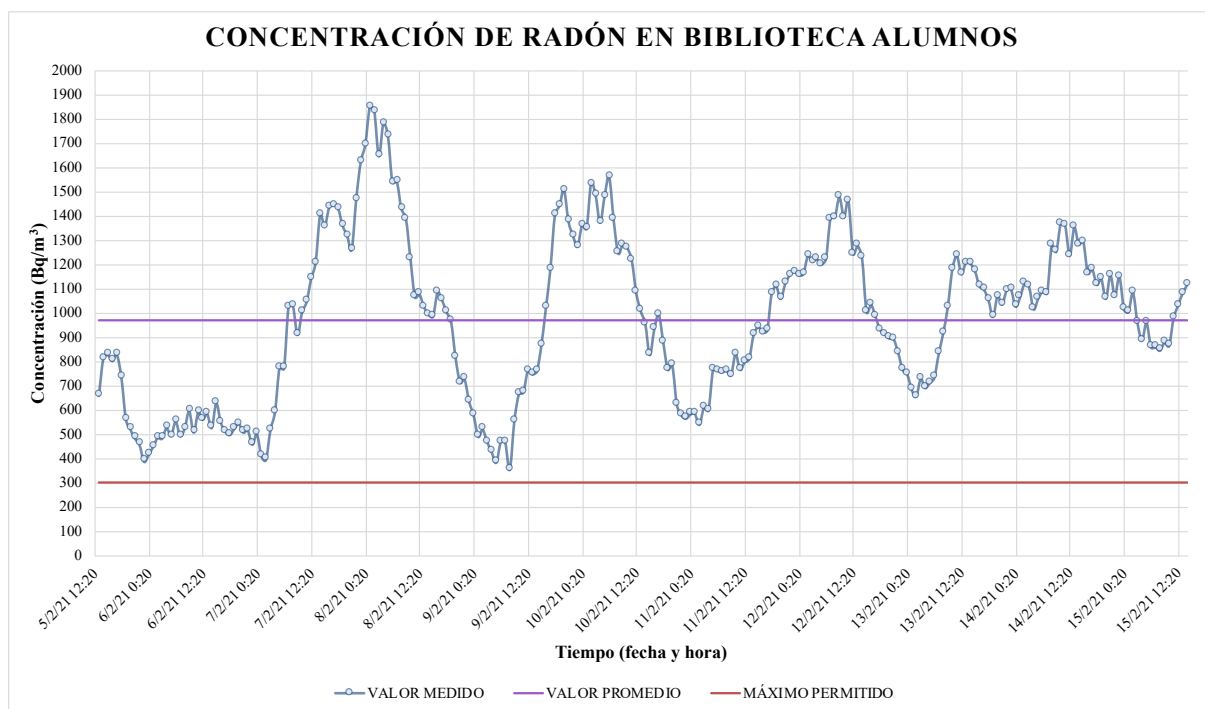


Figura A-23 Concentración de radón en la biblioteca de alumnos (elaboración propia)

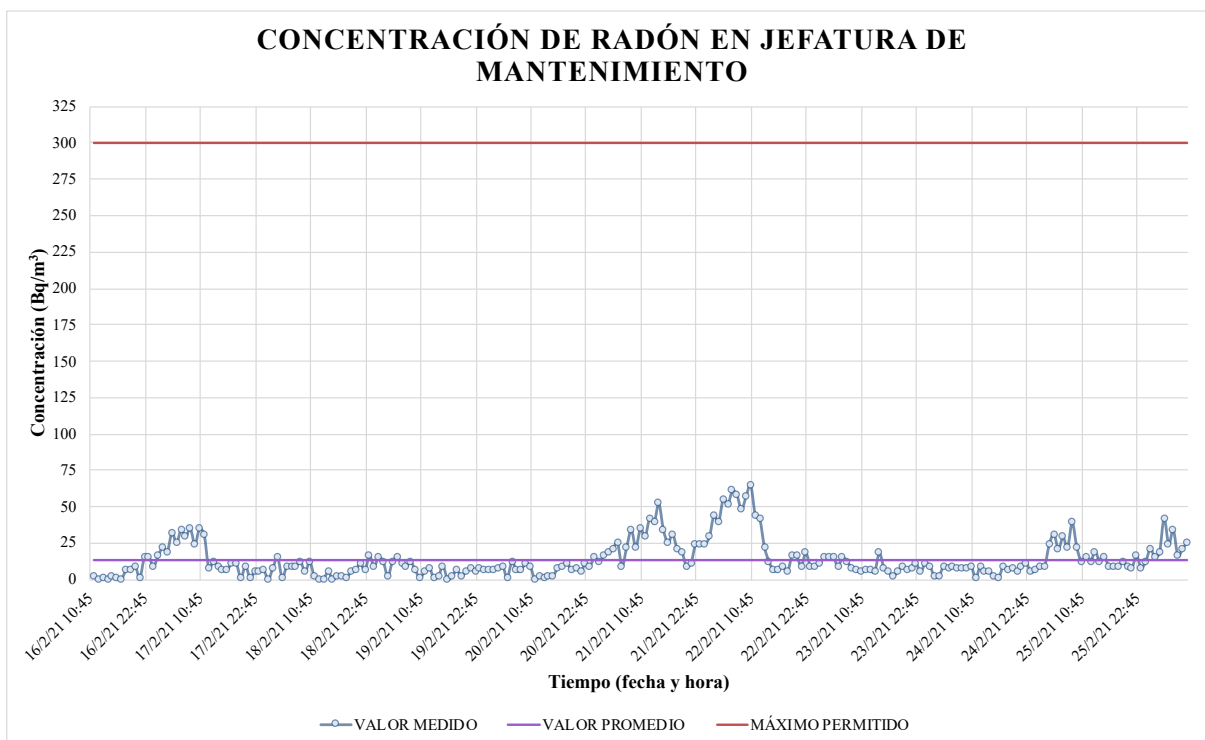


Figura A-24 Concentración de radón en Jefatura de Mantenimiento (elaboración propia)

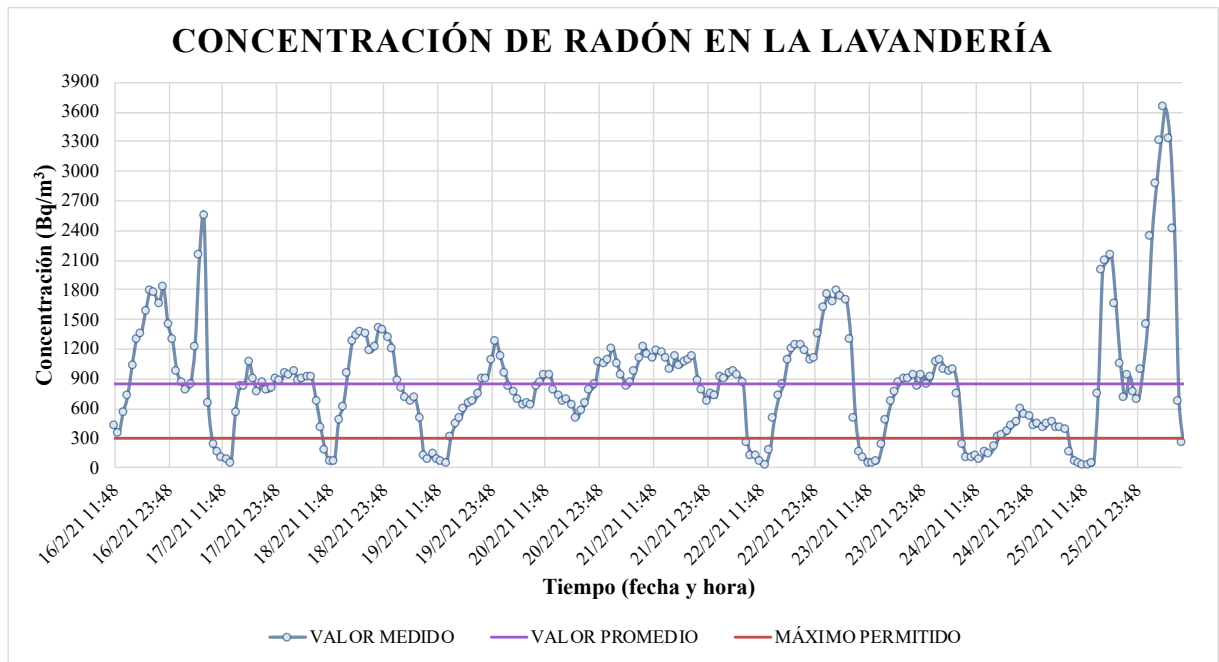


Figura A-25 Concentración de radón en la lavandería (elaboración propia)

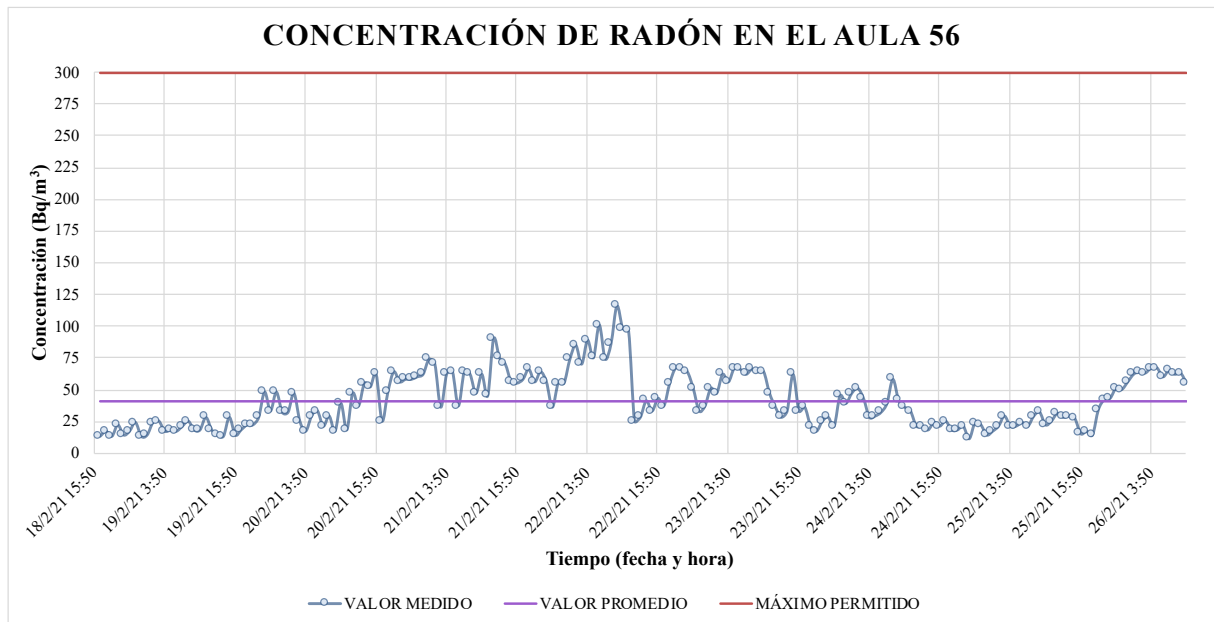


Figura A-26 Concentración de radón en el aula 56 (elaboración propia)

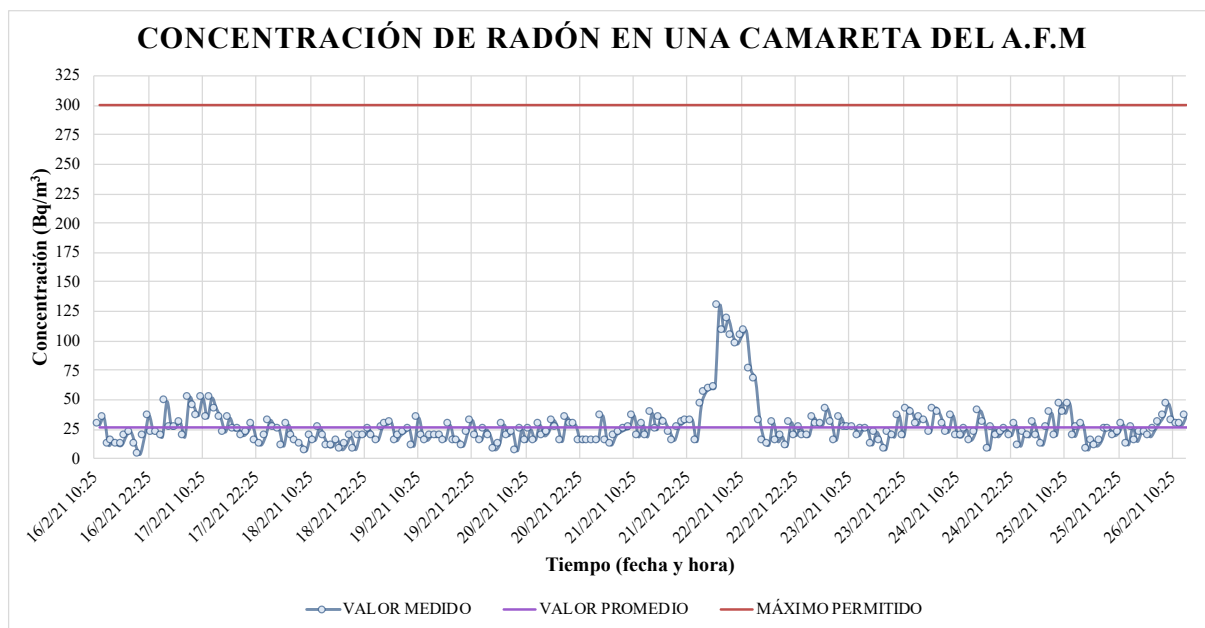


Figura A-27 Concentración de radón en una camareta del cuartel A.F.M (elaboración propia)

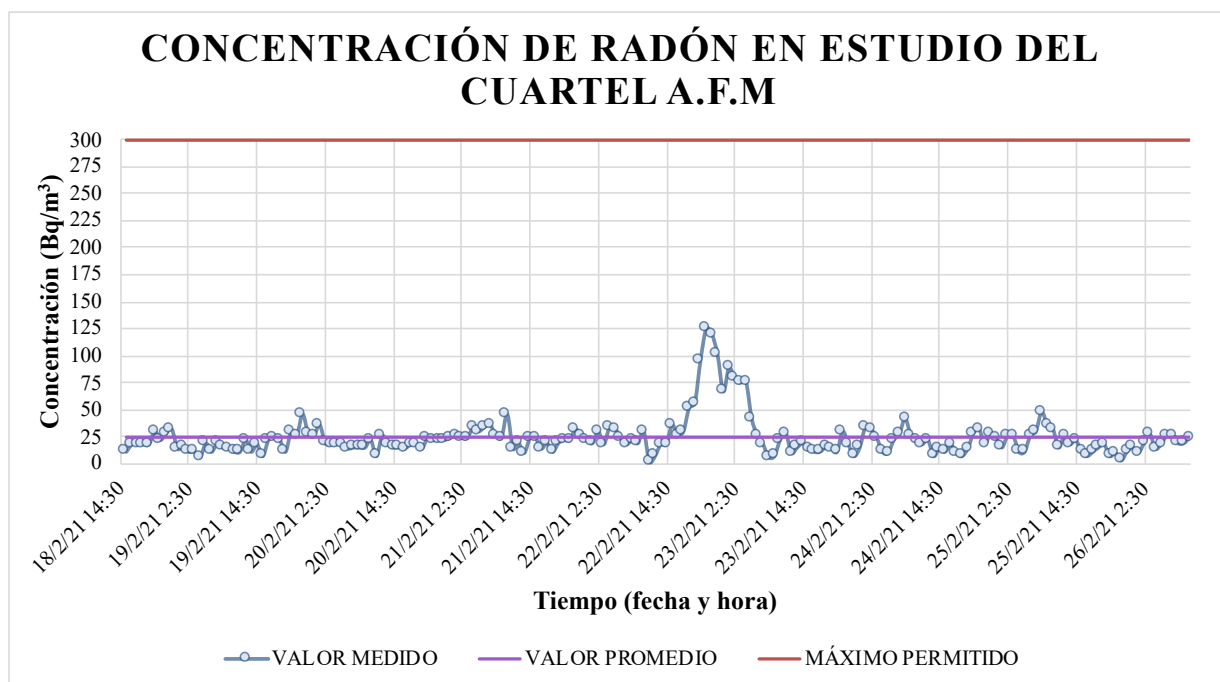


Figura A-28 Concentración de radón en un estudio del cuartel A.F.M (elaboración propia)