



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis matemático de las variables geofísicas que afectan a la
concentración de radón en el interior de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Pablo Cardenal Echevarría

DIRECTORES: Lorena González Gil

Jorge Eiras Barca

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis matemático de las variables geofísicas que afectan a la
concentración de radón en el interior de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El radón es un gas inerte que emana del sustrato concentrándose en el interior de los edificios. La convivencia con elevadas concentraciones del mismo puede llegar a ser perjudicial para la salud, pues como ya se ha comprobado, es el segundo causante de cáncer de pulmón después del tabaco. Este hecho ha provocado un crecimiento en la preocupación social y, por consiguiente, en la comunidad científica.

El Presente Trabajo Fin de Grado trata de estudiar si existe alguna correlación entre las diferentes variables geofísicas y la concentración de radón en la Escuela Naval Militar. Los patrones de concentración registrados en años anteriores motivan a investigar si existe alguna influencia de cambios meteorológicos o fenómenos cíclicos. Para el desarrollo del presente estudio, se llevaron a cabo mediciones en distintos puntos del centro militar con el objetivo de observar el comportamiento de la señal de radón. Los registros han sido analizados individualmente, buscando posibles correlaciones con fenómenos geofísicos.

Se concluye que existen distintos grados de correlación entre las variables y la concentración, siendo las más significativas la correlación negativa con la presión atmosférica y la correlación positiva con la temperatura exterior. Además, tras realizar el análisis espectral, se observa la influencia de dos frecuencias relevantes en las señales. Una de 24 h correspondiente al ciclo diurno y la otra de 12 h relacionada con el ciclo semidiurno y la influencia de las mareas.

PALABRAS CLAVE

radón, densidad de desintegración, fenómenos meteorológicos, ciclos, correlación

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis compañeros de la promoción 422-152 el apoyo constante mostrado en estos 5 últimos años, en especial a aquellos con los que he establecido un vínculo más estrecho y han hecho de mi paso por la Escuela un baúl de experiencias, recuerdos, conocimientos y voluntad de mejora constante.

Debo mostrar mi agradecimiento a mis tutores, Lorena González Gil y Jorge Eiras Barca, por orientarme y ayudarme durante estos meses de trabajo, despertando en mi la curiosidad por el tema desarrollado y exigiéndome para realizar el estudio con el mejor de los resultados.

Por último, agradecer de forma especial a mi familia todo el apoyo mostrado en el día a día, animándome siempre a seguir adelante y dar lo mejor de mí mismo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras.....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contexto	7
1.1.1 Descubrimiento de la radiación	7
1.1.2 El gas radón	7
1.1.3 ¿Dónde se puede encontrar radón?	8
1.1.4 El radón y la salud	9
1.1.5 Normativa	9
1.2 Motivación	10
1.3 Objetivos	10
1.4 Estructura de la memoria	11
2 Estado del Arte	13
2.1 Factores geológicos y constructivos	13
2.2 Fenómenos geofísicos	16
2.2.1 Parámetros meteorológicos.....	16
2.2.2 Otras variables geofísicas	24
3 Metodología y Medición	29
3.1 Lugar de estudio.....	29
3.2 Equipos y mediciones	31
3.2.1 Equipos de medición.....	31
3.2.2 Períodos de medición.....	35
3.2.3 Tratamiento de datos.....	36
3.3 Modelos de correlación de variables.....	37
3.3.1 Modelo de correlación de Pearson.....	38
3.3.2 Modelo de correlación de Spearman	40
3.3.3 P-valor.....	41
3.3.4 Transformada de Fourier	41
4 Resultados.....	45
4.1 Influencia de los factores meteorológicos en la densidad de desintegración.....	45
4.1.1 Análisis general de las densidades de desintegración.....	45
4.1.2 Análisis de las densidades de desintegración por habitaciones	48

4.2 Análisis del coeficiente de correlación de Spearman.....	62
4.2.1 Registro sin suavizar	63
4.2.2 Aplicando la media móvil.....	64
4.3 Análisis de la Transformada de Fourier	65
5 Conclusiones y líneas futuras	71
5.1 Conclusiones	71
5.2 Líneas futuras	72
6 Bibliografía	74
Anexo I: Ejemplo Hoja de Cálculo Excel	79
Anexo II: Función de la Transformada de Fourier	81
Anexo III: Imágenes de las habitaciones del Edificio de Investigación del CUD	83
Anexo IV: Gráficas de la concentración frente a variables meteorológicas sin normalizar	84
Anexo V: Justificación del Coeficiente de Correlación	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos [5]	8
Figura 1-2 Cadena de descomposición del uranio-238 [7].....	8
Figura 1-3 El Confidencial. 11 de enero de 2022. Eva González. [13].....	9
Figura 2-1 Distribución de los dominios geológicos (elaboración propia)	15
Figura 2-2 Mapa de radón en España [28]	15
Figura 2-3 Vías de entrada de radón [24]	16
Figura 2-4 Dependencia entre presión atmosférica y velocidad del viento [35]	17
Figura 2-5 Dependencia entre presión atmosférica y precipitaciones [35]	18
Figura 2-6 Concentración de radón frente a la presión barométrica en el primer cuatrimestre del año [35]	19
Figura 2-7 Concentración de radón frente a la presión en el período de una semana [35]	20
Figura 2-8 Concentración de radón frente a la temperatura exterior [35]	21
Figura 2-9 Dispersión diaria de la concentración de radón en función de la temperatura [24]	22
Figura 2-10 Concentración de radón frente al gradiente de presiones [35]	22
Figura 2-11 Gráfica de la concentración de radón frente a la velocidad del viento [35]	23
Figura 2-12 Concentración de radón frente a la velocidad del viento [35]	24
Figura 2-13 Concentración de radón durante la primera semana del ciclo lunar [49]	25
Figura 2-14 Concentración de radón frente a la fase lunar [49]	25
Figura 2-15 Concentración de radón frente a amplitud de marea terrestre [53]	27
Figura 3-1 Recinto de la Escuela Naval Militar (elaboración propia).....	29
Figura 3-2 Ubicación del Despacho 114 en el edificio del CUD (elaboración propia)	30
Figura 3-3 Medidor AlphaE-Ultra [55]	32
Figura 3-4 Dispositivo RadonEye con aplicación [56]	32
Figura 3-5 Sensor BME280	33
Figura 3-6 Botones medidores de temperatura.....	33
Figura 3-7 Distancia desde la estación meteorológica a las distintas habitaciones (elaboración propia)	34
Figura 3-8 Estación Meteorológica del Puerto de Marín [57].....	34
Figura 3-9 Coeficiente de correlación en función de la dispersión de nube de puntos	39
Figura 3-10 Curva Gaussiana	40
Figura 3-11 Distribución exponencial	40
Figura 3-12 Señal sinusoidal (elaboración propia).....	42
Figura 4-1 Gráfica de la densidad de desintegración de las distintas habitaciones.....	46
Figura 4-2 Comparativa de las señales de radón normalizadas tras aplicar la media móvil	47

Figura 4-3 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Aula Multiusos	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4-4 Concentración de radón frente a la diferencia de temperatura en el Aula Multiusos	50
Figura 4-5 Gráfico de dispersión de la diferencia de temperatura en el Aula Multiusos	51
Figura 4-6 Gráficos de dispersión en el Aula Multiusos	52
Figura 4-7 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en la Sala de Reuniones	53
Figura 4-8 Concentración de radón frente a la diferencia de temperatura en la Sala de Reuniones	54
Figura 4-9 Gráficos de dispersión de la diferencia de temperatura en la Sala de Reuniones	55
Figura 4-10 Gráficos de dispersión en el Sala de Reuniones	56
Figura 4-11 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el despacho 114	57
Figura 4-12 Concentración de radón frente a la diferencia de temperatura en el despacho 114	58
Figura 4-13 Gráficos de dispersión de la diferencia de temperatura en el despacho 114	58
Figura 4-14 Gráficos de dispersión en el despacho 114	59
Figura 4-15 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a las precipitaciones y la presión en el Aula 21	60
Figura 4-16 Concentración de radón frente a humedad relativa, velocidad del viento y temperatura exterior en el Aula 21 (diciembre-enero2020/ 2021).....	61
Figura 4-17 Gráficos de dispersión en el Aula 21 (diciembre de 2020 - enero de 2021)	62
Figura 4-18 Señal de radón y espectro de frecuencias de la serie larga del despacho 114	66
Figura 4-19 Señal de radón y espectro de frecuencias del Aula 21 (enero 2021).....	67
Figura 4-20 Señal de radón y espectro de frecuencias de la Sala de Reuniones	68
Figura 4-21 Señal de concentración y espectro de frecuencias del Aula Multiusos	69
Figura 0-1 Ejemplo de documento de texto para ser procesado.....	80
Figura 0-1 Vista general de la Sala de Reuniones	83
Figura 0-2 Imágenes del Aula Multiusos	83
Figura 0-1 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Aula Multiusos.....	84
Figura 0-2 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en la Sala de Reuniones.....	85
Figura 0-3 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Despacho 114.....	85
Figura 0-4 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Aula 21 (Enero de 2021).....	86
Figura 0-1 Histograma frente a distribución normal en el Aula Multiusos.....	88
Figura 0-2 Histograma frente a distribución normal en la Sala de Reuniones	88
Figura 0-3 Histograma frente a distribución normal en el Despacho 114.....	89

Figura 0-4 Histograma frente a la distribución normal en el Aula 21 (diciembre 2020 – enero 2021)

.....89

Figura 0-5 Histogramas de las distintas variables meteorológicas frente a distribución normal 90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Radiación de los principales minerales que contienen uranio [24].....	14
Tabla 2-2 Resumen de la correlación entre los factores meteorológicos y la concentración (elaboración propia)	27
Tabla 3-1 Resumen de la red de dispositivos medidores	31
Tabla 3-2 Fechas de inicio y fin de las mediciones por medidores	36
Tabla 3-3 Signo de correlación y cuadrantes	38
Tabla 3-4 Interpretación de la correlación en función del valor del coeficiente de Pearson o Spearman	41
Tabla 4-1 Valor del coeficiente de correlación de Spearman (r_{XY}) para las series de datos crudos	63
Tabla 4-2 P-valor del coeficiente de correlación de Spearman para las series de datos crudos	63
Tabla 4-3 Valor del coeficiente de correlación de Spearman (r_{XY}) tras aplicar la media móvil	64
Tabla 4-4 P-valor del coeficiente de correlación de Spearman tras aplicar la media móvil	64
Tabla 0-1 Coeficiente de correlación de Pearson	87
Tabla 0-2 P-valor correspondiente al coeficiente de correlación de Pearson.....	87
Tabla 0-3 Coeficiente de correlación de Spearman.....	87
Tabla 0-4 P-valor correspondiente al coeficiente de correlación de Spearman	87

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto

1.1.1 Descubrimiento de la radiación

El ser humano, desde sus inicios, ha despertado gran interés por aquello que pueda suponerle una amenaza con el objetivo de paliarla en el menor tiempo posible. A día de hoy, y con las nuevas tecnologías a nuestro alcance, esta tendencia no ha hecho más que acentuarse: buscamos respuesta a todas nuestras preguntas.

Nos remontamos a la Europa Central del s. XVI donde una serie de científicos se preguntaron cuál sería la causa por la que el gremio minero de la zona presentase tan elevada mortandad por enfermedades pulmonares [1]. En aquel entonces la radiación natural, dada su ignorada existencia, no suponía una amenaza y no sería hasta finales del s. XIX y comienzos del s. XX cuando el científico francés Antoine Henri Becquerel, realizando investigaciones sobre la fluorescencia del sulfato doble de uranio y potasio, descubriese la radiactividad casi de forma espontánea.

La radiactividad es un fenómeno físico por el cual los átomos de ciertos compuestos inestables se desintegran espontáneamente radiando energía y partículas subatómicas. Estas partículas pueden ser de diferentes clases y, en consecuencia, serán más o menos dañinas [2]. La unidad empleada por el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el Becquerel (Bq), que equivale a una desintegración por segundo. Para las mediciones de radiación en espacios interiores se suele emplear el Becquerel por metro cúbico (Bq m^3), que representa el número de átomos que se desintegran en un m^3 de aire en el período de un segundo.

1.1.2 El gas radón

El radón fue descubierto en el año 1900 por el científico alemán Ernst Dorn mientras realizaba unos estudios sobre el radio. Sin embargo, no sería hasta 1903 cuando Ernest Rutherford lo catalogase como un nuevo elemento procedente de la descomposición del torio [3]. Este compuesto es uno de los llamados gases nobles, ubicados en el grupo 18 de la tabla periódica de los elementos, como se puede ver en la Figura 1-1. Esto implica que es un compuesto inerte y, por tanto, no reacciona químicamente con otros elementos [4]. Se presenta en la naturaleza en estado gaseoso debido a su alta volatilidad y de manera incolora, inodora e insípida.

Tabla Periódica de los Elementos Químicos

Los elementos 119 y 120 no han sido aislados.
Fuente: IUPAC / Pascual Remón / Asesoramiento: Gabriel Porto



Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos [5]

El radón es un elemento químico que procede de la cadena de desintegración del uranio. Como podemos observar en la Figura 1-2, el uranio-238 se descompone en tres isótopos: protactinio, torio y radio, para más tarde derivar en radón-222 (Rn-222), que será el elemento objeto de estudio de este trabajo [6]. Este compuesto continúa descomponiéndose a lo largo del tiempo y, como consecuencia, seguirá emitiendo radiación durante todo el proceso. Las partículas resultantes de la desintegración podrían provocar efectos nocivos sobre la salud.

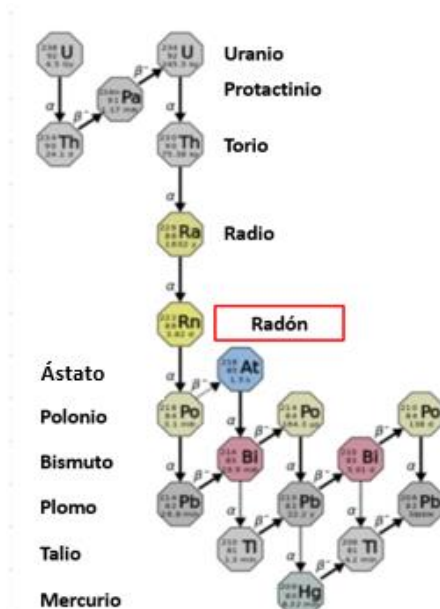


Figura 1-2 Cadena de descomposición del uranio-238 [7]

1.1.3 ¿Dónde se puede encontrar radón?

La fuente principal de radón, como ya se ha mencionado anteriormente, es el uranio que se encuentra distribuido a lo largo de la corteza terrestre. Este gas presenta una gran movilidad, es decir, es capaz de

atravesar materiales y emanar del subsuelo. Las concentraciones en exteriores no suelen sobrepasar los 15 Bq m^{-3} ya que el gas se diluye con el aire y no supone una amenaza para la salud. En interiores, por el contrario, tiende a acumularse alcanzando concentraciones más elevadas. En este segundo caso, los niveles de radón se pueden ver influenciados por las características del suelo, como el tipo de roca o la porosidad, y las grietas o fisuras que presenten los materiales de construcción. Por otra parte, las concentraciones suelen disminuir proporcionalmente con la distancia al suelo, siendo el plano situado un metro por debajo de la superficie el que normalmente presenta una mayor concentración. Las niveles de radón en interiores presentan grandes variabilidades a lo largo del tiempo, de hecho, hay autores que afirman que los fenómenos meteorológicos, pueden tener cierta influencia en dichas variaciones [8].

Por otra parte, el radón puede aparecer también disuelto en el medio acuático, como en lagos o aguas subterráneas [9]. Esto acentúa el problema y motiva a estudiar posibles medidas de mitigación ya que muchas zonas residenciales se abastecen de pozos subterráneos que sufren las consecuencias del gas.

1.1.4 El radón y la salud

Como ya se ha mencionado, el gas radón se presenta como una amenaza contra la salud del ser humano por su capacidad radiactiva. Según el Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos (NCI) es el segundo causante de cáncer de pulmón después del tabaco entre fumadores y el primero entre la población no fumadora [10, 11]. Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) dice que el riesgo de padecer esta enfermedad aumenta en un 16% con cada incremento de 100 Bq m^{-3} [12]. En los últimos años los estudios sobre este gas no han hecho más que crecer debido a los efectos que éste genera. La preocupación social también está aumentando y los titulares en medios de comunicación sobre los efectos son cada vez más comunes, como podemos observar en la Figura 1-3.

La lucha contra el gas radón sigue siendo la asignatura pendiente

Figura 1-3 El Confidencial. 11 de enero de 2022. Eva González. [13]

1.1.5 Normativa

El marco legislativo del radón no comienza hasta la publicación por parte de la Unión Europea (UE) de la norma 90/143/Euratom de 1990 y que no tiene su efecto en España hasta el año 2001, materializándose en el Real Decreto 783/2001 de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes [14, 15].

En el año 2005 ve la luz el Proyecto Internacional del Radón mediante el cual, los más de 30 países participantes, trataron de descubrir estrategias para la reducción y mitigación de radón y concienciar a la población de la potencial amenaza que significaba. Como resultado del proyecto nace el “Manual sobre el radón en interiores”, donde se establece el nivel de referencia en los 100 Bq m^{-3} y nunca sobrepasar el umbral de los 300 Bq m^{-3} [16].

No sería hasta el año 2011 donde se asientan los umbrales de referencia de las concentraciones de radón en los lugares de trabajo mediante la publicación, por parte del Consejo de Seguridad Nuclear, de la instrucción IS-33 “Sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición natural” [17]. Los citados límites de referencia en valores promedio por año son:

- $< 600 \text{ Bq m}^{-3}$: no es necesario control
- $600\text{-}1000 \text{ Bq m}^{-3}$: se debe aplicar un nivel bajo de control

- 1000 Bq m⁻³: se debe aplicar un nivel alto de control.

No obstante, el valor de referencia para lugares de trabajo con personal en movimiento se estableció en los 300 Bq m⁻³.

En el año 2013 la Unión Europea publica la Directiva 2013/59/Euratom, donde se especifican las normas de seguridad para la protección contra radiaciones ionizantes [18]. Como solución parcial a la no transposición de la normativa a nivel nacional, el gobierno aprobó en 2019 una modificación al Código Técnico de la Edificación (CTE), por la cual se incluye la sección HS6 titulada “Protección frente a la exposición al radón” [19]. El cambio determina las medidas a tomar dependiendo de si los edificios son de nueva construcción o ya edificadas para los cuales se indican las medidas de mitigación que es necesario adoptar. Cabe destacar que, tras esta nueva incorporación en el marco legal, se establece de nuevo el nivel máximo de concentración admisible en 300 Bq m⁻³.

1.2 Motivación

Con todo lo visto anteriormente queda reflejada la amenaza que supone convivir con altas concentraciones de radón y el alcance de las lesiones que puede acarrear, incluso provocando la muerte. Esto justifica la creciente preocupación legal y social acerca de reducir los niveles de este gas de tan desconocido comportamiento en viviendas y lugares de trabajo.

La manera de paliar esta amenaza pasa por diseñar equipos e instaurar diferentes medidas de mitigación. Para desarrollar esta tarea de la manera más eficiente posible, es indispensable un buen conocimiento del comportamiento del radón. Si bien es cierto que el número de investigaciones para intentar determinar el patrón de conducta de este gas es cada vez mayor, no son muchos los que tratan de analizar cómo influyen las distintas variables geofísicas en su concentración.

Este trabajo continúa la línea de investigación desarrollada en los últimos años acerca de la concentración de radón en la Escuela Naval Militar (ENM). Ya existen precedentes de elevados niveles de concentración de radón en distintos puntos de la Escuela, como se puede observar en los trabajos fin de grado defendidos anteriormente por el AN Guillermo Muñoz Yébenes y por el AN Álvaro García Denia [20, 21]. Concretamente, el despacho 114 del edificio del Centro Universitario de la Defensa (CUD), uno de los lugares donde se desarrolla este TFG, ha presentado con anterioridad niveles de hasta 2955 Bq m⁻³, tal y como se especifica en la investigación llevada a cabo por el AN Lázaro Benavides durante el curso 2020-2021 [8]. Este estudio nos sirve como punto de partida para realizar nuestro trabajo, ya que se observaron ciertos patrones de señales de concentración que podrían estar ligados a la presencia de alguna variable geofísica, como pueden ser los fenómenos meteorológicos o alguna de carácter cíclico como las mareas.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es determinar la influencia de las diferentes variables geofísicas en la concentración de radón de la ENM. Para ello se desarrollará, a través del análisis matemático, un modelo de correlación entre las variables y la concentración. En concreto, se tratará de estudiar como interfiere cada una de las diferentes variables por separado en la concentración de radón. La complejidad aparece a la hora de abordar esta separación, ya que los fenómenos están relacionados y no es fácil delimitar las influencias de cada uno. De este se derivan otros objetivos complementarios:

- Identificar a partir de documentos científicos y técnicos las variables geofísicas, así como los factores geológicos y constructivos, que tengan influencia en la concentración de radón.
- Justificar la elección del método de correlación en base a la distribución de los datos registrados.
- Identificar las variables que podrían tener un mayor efecto en la concentración de radón.

- Comparación de la influencia de parámetros geofísicos en los distintos lugares objeto de estudio.
- Evaluar si existen otras variaciones cíclicas no descritas en la bibliografía que condicionen la concentración de radón.

1.4 Estructura de la memoria

Una vez establecidos los objetivos que perseguimos en el presente trabajo y conociendo el marco donde nos encontramos, podremos definir la estructura que seguirá el documento en sus diferentes apartados:

- El Capítulo 1 pretende introducir al lector en el contexto bajo el cual se desarrolla el trabajo, justificando la importancia que tiene el tema y presentando el principal objetivo que se busca a lo largo del estudio. Así mismo, se establece el marco legal que regula los niveles de concentración de radón en interiores.
- En el Capítulo 2 se lleva a cabo una revisión del estado del arte haciendo hincapié en los conceptos teóricos que nos ayudarán a comprender las variables objeto de estudio de este trabajo. Se describen los principales factores que influyen en la concentración de radón, focalizando los que atañen a las variables geofísicas.
- El Capítulo 3 comienza describiendo el lugar de estudio, así como los equipos utilizados para realizar el estudio. Continúa presentando los períodos y la manera en la que se han tratado los datos durante el registro. Se exponen desde un punto de vista teórico los parámetros estadísticos, como los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman o el p-valor. Además, se incluye una explicación de la transformada de Fourier, que permitirá el análisis espectral de las señales de radón.
- En el Capítulo 4 se lleva a cabo un análisis de las mediciones de radiación a partir de gráficas, coeficientes de correlación entre distintas variables y el espectro de frecuencias de las señales de concentración.
- Por último, en el Capítulo 5, se exponen las conclusiones extraídas durante el análisis del apartado anterior así como algunas líneas futuras que se pueden desarrollar a partir de este trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

El principal causante de la presencia de este gas en edificios y viviendas es la composición del suelo sobre el que estas se asientan. Por tanto, la concentración de radón en interiores varía en función de la geografía. Además, los niveles de concentración dependerán de factores constructivos, como los materiales, los hábitos de los ocupantes y otras variables aún por determinar y que se encuentran actualmente en estudio.

Antes de comenzar a describir los principales factores influyentes en la concentración de radón hemos de conocer los movimientos del gas y por qué se originan estos desplazamientos.

Como ya se ha discutido en la cadena de desintegración del uranio-238 (Figura 1-2), el proceso de generación del radón comienza con la desintegración del radio. Este compuesto emite una partícula alfa provocando que el radón se introduzca en el interior del mineral y vaya hacia los poros del mismo. A este fenómeno se le conoce como emanación que, para ser más precisos, es la cantidad de radón que sale de la roca y se incorpora a los poros.

Una vez en los poros el radón se transportará por difusión, advección o movimientos de ascendencia o subsidencia. La difusión es un proceso muy repetido en la naturaleza que consiste en el movimiento por diferencia de gradientes de concentración, de los más altos a los más bajos. Además, el radón se ve afectado por las diferencias de presión y temperatura. Este fenómeno es conocido como movimientos de ascendencia o subsidencia (plano vertical) o movimientos advectivos (plano horizontal), que están modelizados por la ley de Darcy. El movimiento en el plano vertical es más rápido que el difusivo, por lo que será el principal contribuyente en la exhalación de radón al exterior.

Otro fenómeno que hemos de tener en cuenta es la permeabilidad del terreno que, básicamente, mide la separación existente entre los poros de un material. A más permeabilidad, más separación y, por tanto, más fácil será el proceso de emanación. Esta característica se ve muy afectada por la humedad, ya que el agua rellena el espacio entre poros [22].

2.1 Factores geológicos y constructivos

Según diversos estudios la composición del terreno donde se asiente la edificación, es decir, el tipo de suelo será el factor más influyente en la concentración [23]. Como ya se ha discutido anteriormente, el radón proviene de la descomposición del uranio que se sitúa sobre la corteza terrestre. En concreto, este se encontrará en minerales y rocas, que no son más que una composición de varios minerales. En la Tabla 2-1 se presenta la cantidad de desintegraciones que se producen por kilogramo en los principales minerales.

Minerales	Actividad (Bq kg ⁻¹)
Cuarzo	20,9
Feldespatos	33,2
Biotita	99,6
Moscovita	145,1
Hornablenda	7,9
Piroxenas	44,2
Olivino	0,0615
Epidota	528,9

Tabla 2-1 Radiación de los principales minerales que contienen uranio [24]

En cuanto a la influencia del tipo de roca, se sabe que el llamado ciclo de las rocas es un proceso por el cual determinados minerales, bajo unas condiciones de presión y temperatura a lo largo del tiempo, se transforman en otros. A continuación, se presentan los tres grupos de rocas principales haciendo referencia a la presencia de uranio en su composición.

- **Sedimentarias:** se forman a partir de fragmentos (detritos) de otras rocas o por acumulación de materia orgánica. La cantidad de uranio presente en este tipo de roca es muy variable pues depende de las condiciones en las que se haya dado la sedimentación y de su distribución, entre otros factores. Además, los componentes radiactivos se van dispersando, por lo que las nuevas rocas tienen menos cantidades de uranio que la roca madre [25]. Sobre su aspecto, suelen ser rocas muy porosas, cualidad que facilita la difusión de radón a través de los poros.
- **Ígneas:** las rocas ígneas suponen más del 90% de la corteza terrestre. La concentración de uranio en este tipo de rocas es proporcional a la cantidad de óxido de sílice (SiO₂) que, a su vez, es inversamente proporcional a la densidad de la roca. La composición de estas rocas se verá determinada por las características del magma [26]. Los ejemplos más relevantes de esta clase son los granitos que se pueden encontrar en el suelo de Galicia y el oeste de España.
- **Metamórficas:** son rocas formadas a partir de rocas ígneas y sedimentarias que han sufrido alteraciones a su forma original debido a condiciones de presión y temperatura determinadas. Tienden a mantener su alta concentración de uranio y algunas de las que presentan un nivel más elevado son la pizarra, gneises y esquistos [27]. En España tienen presencia en la parte más occidental de la península, como pueden ser Cáceres o Salamanca.

En la Figura 2-1 se pueden observar los principales dominios geológicos de la península. El enclave de la ENM se sitúa en la posición marcada con la estrella, zona claramente dominada por la presencia de silicio. Puesto que este compuesto es proporcional a la cantidad de uranio, se puede suponer que las concentraciones de radón serán mayores en esta parte de la geografía. En la Figura 2-2 se puede observar la concentración correspondiente al percentil 90 en la península. En concreto, en el caso del lugar del lugar de estudio el percentil 90 se sitúa por encima de los 400 Bq m⁻³.



Figura 2-1 Distribución de los dominios geológicos (elaboración propia)

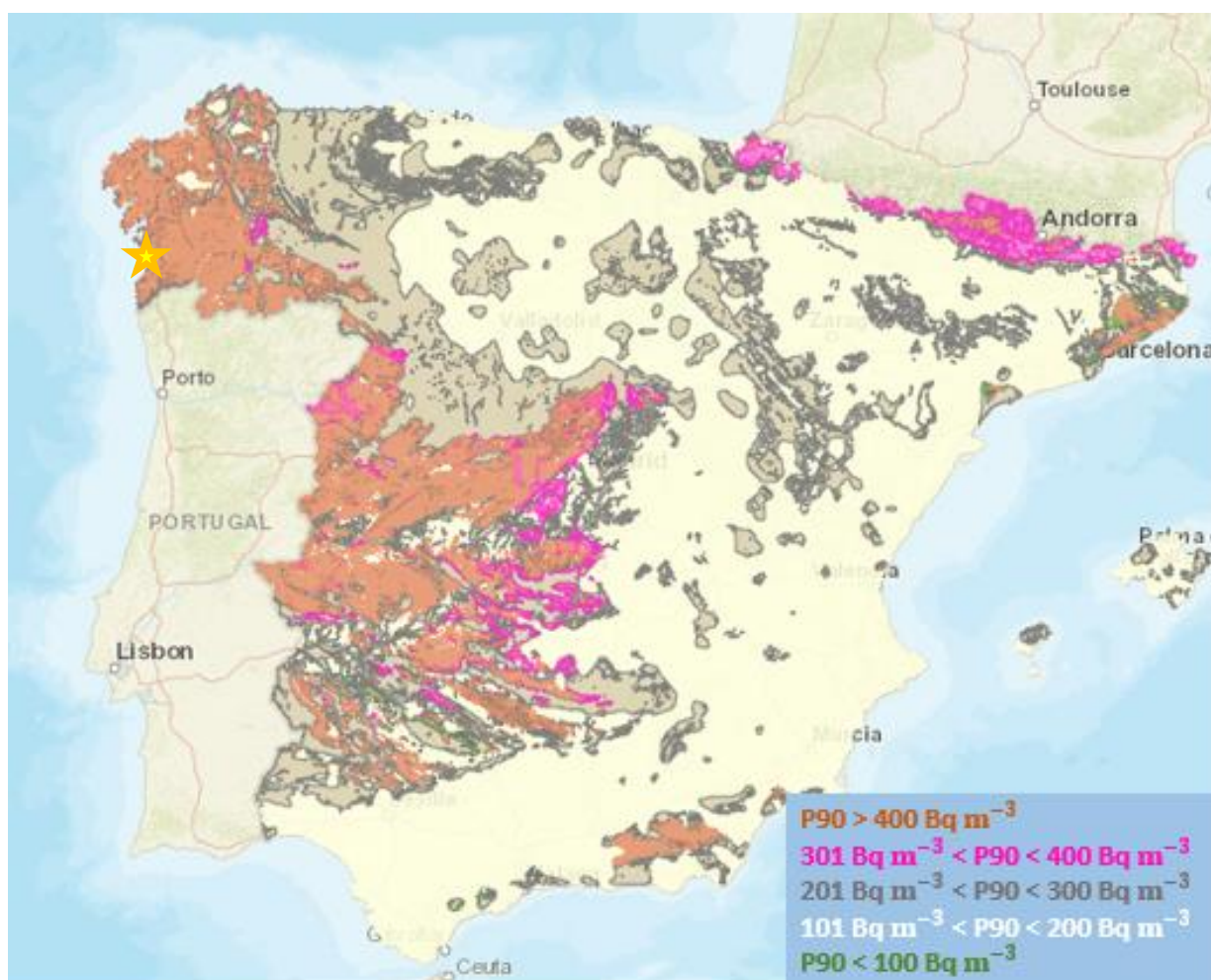


Figura 2-2 Mapa de radón en España [28]

En cuanto a los factores constructivos, las características de la propia vivienda, como pueden ser la antigüedad o los materiales de construcción, contribuyen en la concentración de radón. Las vías de entrada (grietas, desagües) como se puede ver en la Figura 2-3, son determinantes a la hora de limitar la concentración del gas. Las mayores concentraciones de radón en interiores se suelen dar en las plantas más bajas, ya que el gas emana del suelo y por diferencias de presiones se establece en los lugares más cercanos a este. De hecho, en una misma habitación, como norma general, a menor altura existirá mayor concentración.

Por otra parte, existen materiales empleados en la construcción considerados fuentes de radón debido a los aditivos derivados del uranio, como pueden ser el hormigón o el ladrillo [29]. La influencia de estos componentes puede explicar hasta el 20% de la concentración de radón [30]. Además, un factor que no se puede pasar por alto son los hábitos de los usuarios, como puede ser la ventilación. El intercambio de aire con el exterior permite la salida de aire contaminado con radón desde el interior, para dar paso a aire limpio del exterior. Este recurso se puede plantear como la ventilación natural de las estancias habitables o la ventilación de lugares cerrados como sótanos o soleras. A día de hoy existen equipos que permiten la ventilación sin que suponga una pérdida de temperatura en el interior [31].

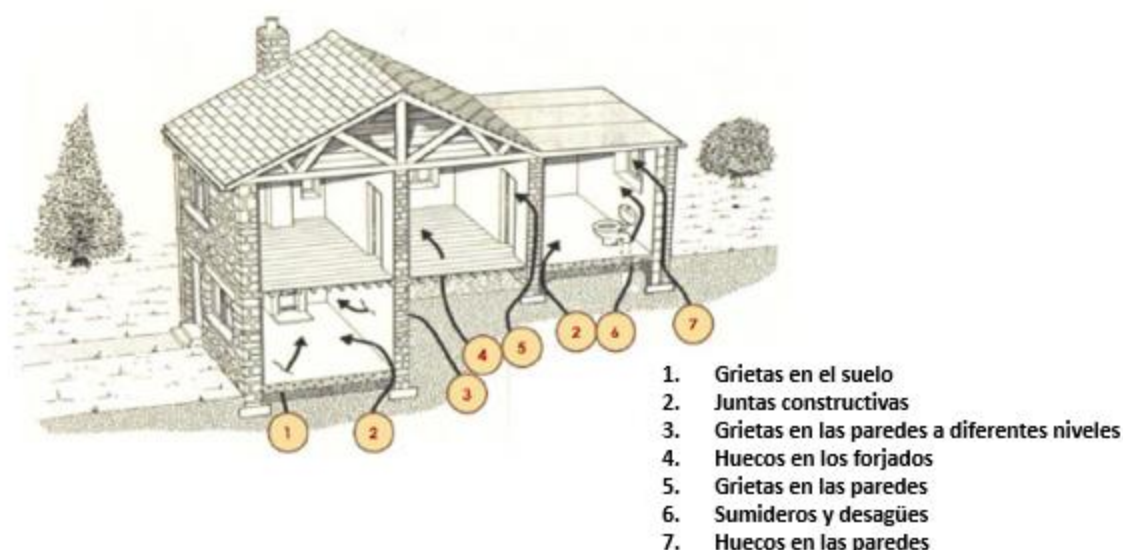


Figura 2-3 Vías de entrada de radón [24]

2.2 Fenómenos geofísicos

El radón existente en el aire de los edificios proviene del subsuelo donde se asienta. Es transportado por movimientos advectivos e impulsado por una diferencia de presiones entre el interior y el exterior. Se pueden diferenciar dos tipos de variables geofísicas. Los parámetros meteorológicos, que son sucesos cambiantes y los fenómenos con variaciones cíclicas, como pueden ser las estaciones, los ciclos lunares o las mareas terrestres y oceánicas.

2.2.1 Parámetros meteorológicos

El efecto que producen los cambios de las condiciones meteorológicas en el radón ha sido probado en varios estudios basados en el registro continuo de los niveles de concentración en interiores, así como de las condiciones meteorológicas en el mismo espacio temporal [32, 33]. Las investigaciones demuestran que los niveles del gas fluctúan en distintos intervalos de tiempo que van desde ciclos de 6 horas, hasta diarios o incluso mensuales.

Para poder analizar las variaciones de radón en función de fenómenos geofísicos hay que tener en cuenta que existen variables dependientes unas de otras, es decir, que si se da una podría darse otra y,

por tanto, es difícil separar sus efectos. Por ejemplo, en la Figura 2-4 se presenta la relación entre la velocidad del viento y la presión atmosférica obtenida en un estudio llevado a cabo por Borja Frutos Vázquez en Madrid en el año 2009. Se puede observar que cuando la presión disminuye el viento arrecia, y viceversa, los periodos de bajas presiones se corresponden con disminuciones en la velocidad del viento.

Diversos estudios concluyen que las concentraciones de radón en las primeras horas de la mañana son más altas que en las primeras horas de la tarde [34]. Esto se debe fundamentalmente a las variaciones diurnas, como pueden ser la velocidad del viento, la presión atmosférica y la temperatura. Hábitos tan cotidianos como el de ventilar a primera hora de la mañana interfieren en la concentración del gas. Los días de lluvia, por ejemplo, se registran concentraciones menores a causa de que supone un incremento significativo en la humedad que, como ya se ha desarrollado, influye en la permeabilidad del suelo dificultando la exhalación de radón.

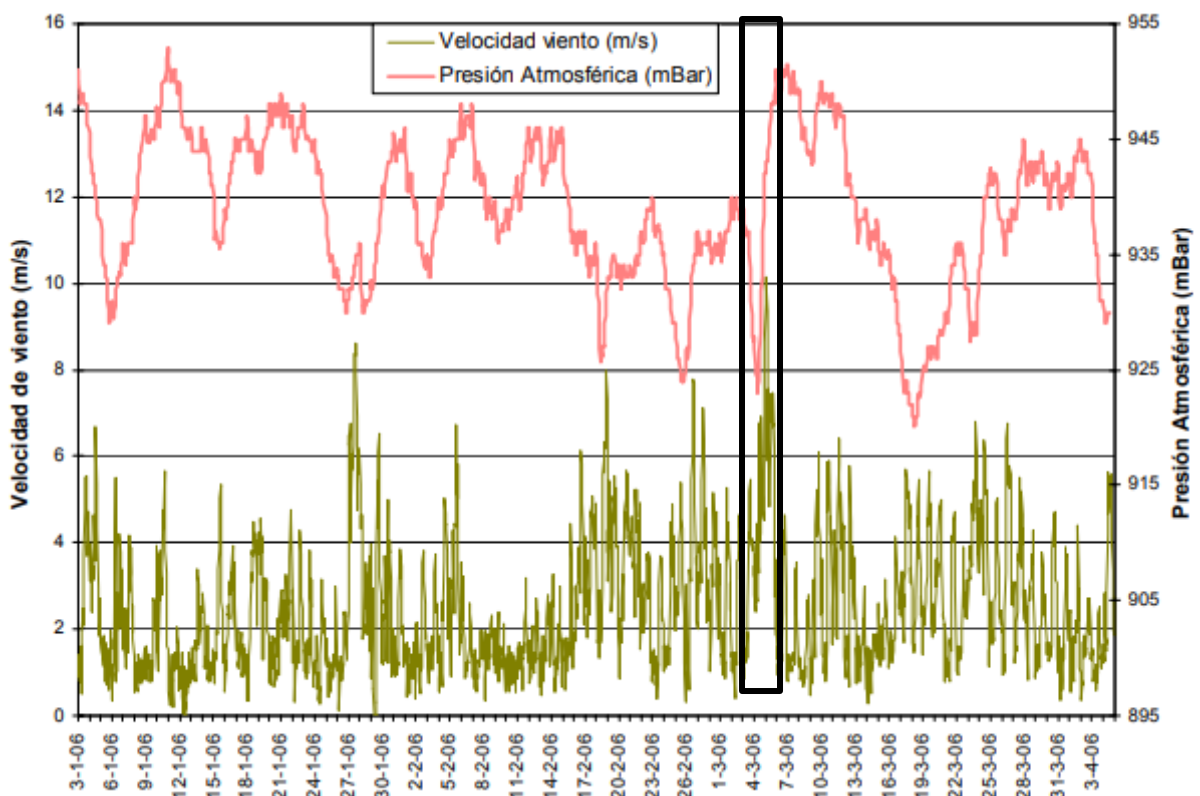


Figura 2-4 Dependencia entre presión atmosférica y velocidad del viento [35]

No todas las variables meteorológicas influyen de manera directamente proporcional a la concentración de radón. En un estudio de concentración en la planta baja de un edificio en Estados Unidos se descubrió que los niveles de radón en interiores están correlacionados negativamente con la humedad interior, con la temperatura exterior y la velocidad del viento. Por el contrario, el mismo estudio afirma que la presión barométrica exterior tiene una correlación positiva. Para concluir, el autor dice que no se observa ningún tipo de correlación entre la concentración y la presión barométrica interior o la temperatura en el interior de la habitación [36].

Veamos a continuación cómo influyen algunas de las diferentes variables geofísicas en la concentración de radón y si guardan algún tipo de correlación entre ellas, basándonos en algunos de los estudios que se han llevado a cabo en los últimos años.

Precipitaciones

Las precipitaciones llevan consigo una saturación de la humedad del suelo y del subsuelo. Esto perjudica la permeabilidad del terreno, pues se reduce la distancia entre poros y, en consecuencia, se dificulta el proceso de exhalación [37]. Es por este motivo que la salida de radón se focaliza en aquellas zonas del terreno más secas, como pueden ser los asentamientos de edificios, produciéndose un aumento de la concentración en interiores.

Sin embargo, la cantidad de agua que se infiltra en el terreno genera también un aumento en la presión de este, lo que supone una diferencia de presiones entre el interior y exterior y por tanto la posibilidad de que exista un flujo de radón [35].

Las precipitaciones suelen estar ligadas a bajas presiones, es decir, son fenómenos meteorológicos que suelen ir de la mano, tal y como se muestra en la Figura 2-5. Además, se puede suponer, y así concluyen diversos estudios, que las precipitaciones guardan una correlación positiva con la concentración de radón. Por ejemplo, Papastefanou (2007) concluye, tras realizar un estudio en Grecia, que las concentraciones de radón son más elevadas en períodos lluviosos que de sequía [38].

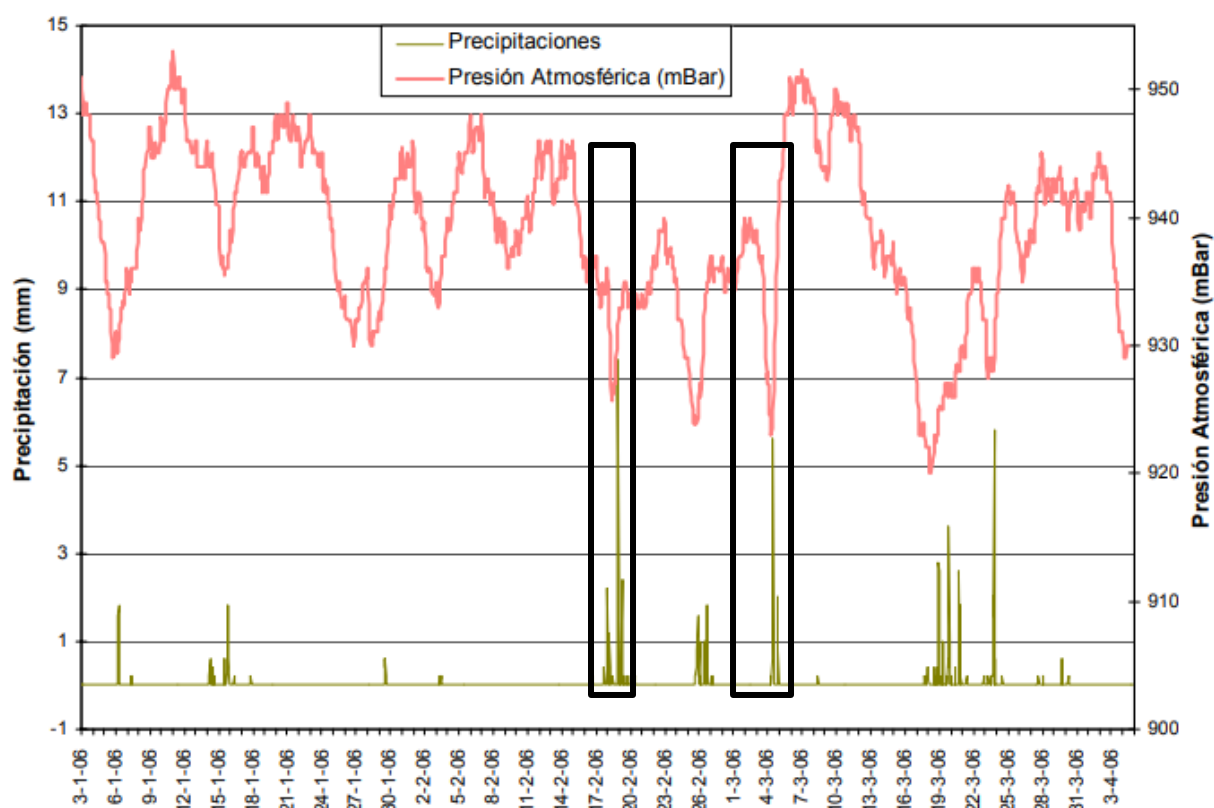


Figura 2-5 Dependencia entre presión atmosférica y precipitaciones [35]

Presión barométrica

Los cambios en la presión atmosférica parecen, según indican diversos estudios, un factor determinante en la concentración de radón [39]. En un informe realizado por el catedrático Luis Santiago Quindós Poncela (2011), se concluye que la diferencia de presiones entre el exterior y el interior de la vivienda no alcanza de media el hPa [37]. Sin embargo, la variación de presión que sufre el terreno no se iguala de la misma manera por lo que podrían, y así lo hacen, generarse gradientes de presión durante este período de desigualdad. Dependiendo del terreno el tiempo de desfase entre presiones será mayor o menor. Cuando el gradiente de presiones es negativo, es decir, baja la presión se originan movimientos de radón hacia el interior de la vivienda.

Como se ve en el ejemplo de la Figura 2-6 los picos más elevados de concentración se suelen producir en el momento que se dan las mayores depresiones. Por el contrario, en los momentos de altas

presiones se puede ver que la concentración es prácticamente nula. Algunas medidas de mitigación se basan en poder controlar las variaciones de presión en el terreno y así evitar o minimizar los efectos del gradiente de presión.

Como ya se ha expuesto anteriormente, la diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la vivienda es determinante para que el radón pueda penetrar desde el suelo o, por el contrario, podamos expulsarlo. En una investigación llevada a cabo por Cavallo et al., (1996) concluyen que la diferencia de presiones entre verano e invierno es notable debido a los cambios de temperatura que sufre el aire entre las dos estaciones [40]. En el período estival apenas se llegaba a medio hPa de diferencia mientras que en invierno alcanzaba los 4 hPa.

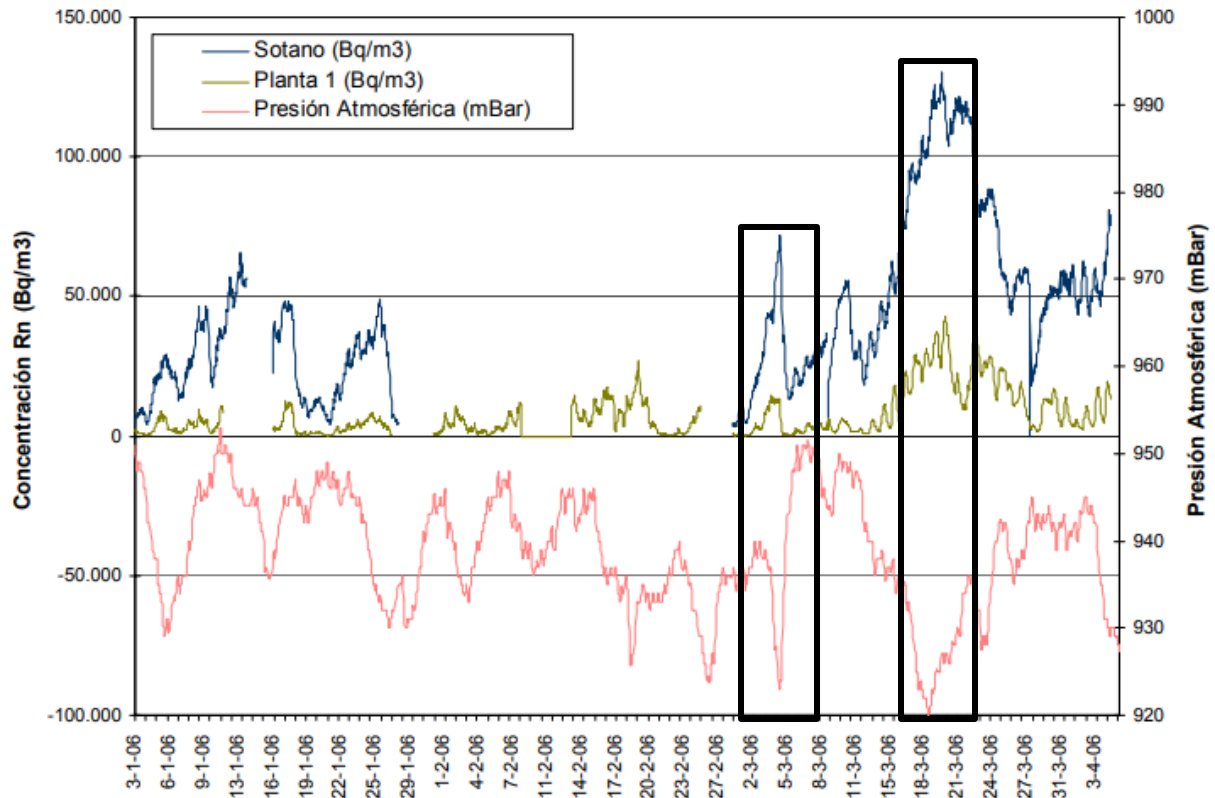


Figura 2-6 Concentración de radón frente a la presión barométrica en el primer cuatrimestre del año [35]

En la Figura 2-7 se puede corroborar que la concentración de radón mantiene cierta correlación negativa a nivel diario con la presión. Pero ya se ha comentado que no es la única variable influyente en los cambios de concentración del gas.

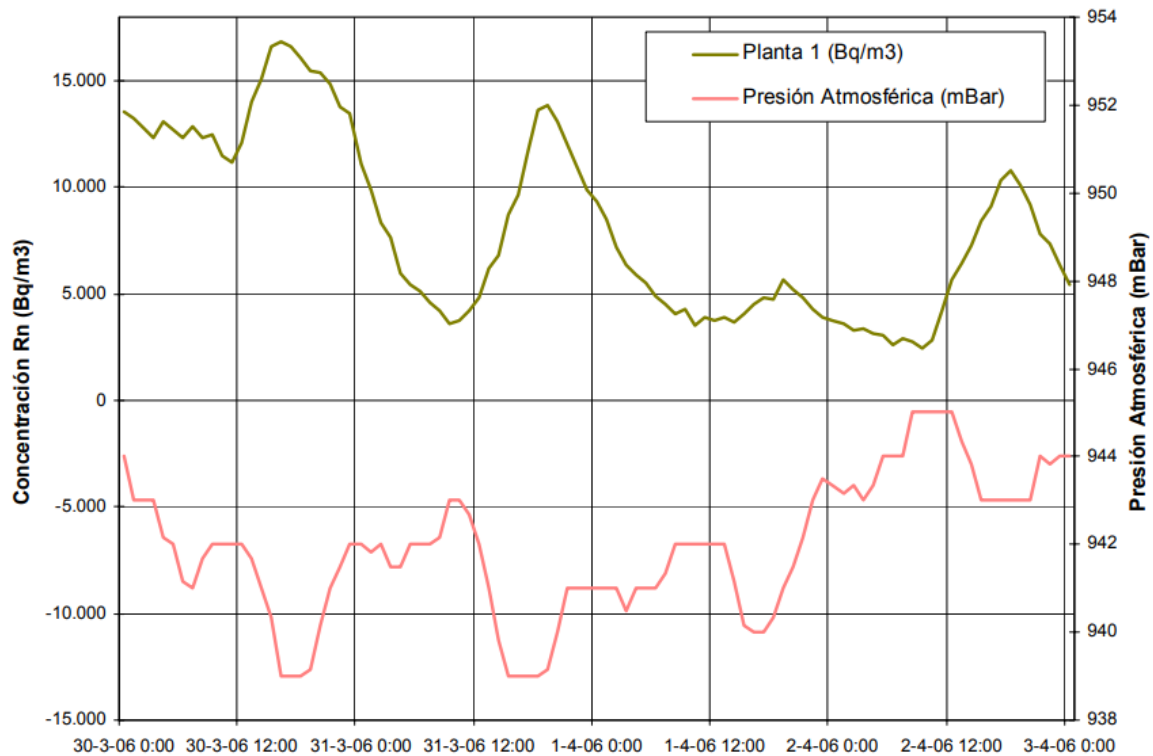


Figura 2-7 Concentración de radón frente a la presión en el período de una semana [35]

Temperatura

El aire constituye el medio de transporte del radón por excelencia. El Consejo de Seguridad Nuclear afirma que la temperatura tiene la capacidad para modificar los flujos convectivos del aire, es decir, un aumento de la temperatura provocará el ascenso del aire y, por consiguiente, del radón que arrastra [17].

La temperatura de un mismo lugar tiene distintos comportamientos a lo largo del año. Analizando una muestra larga, se podría observar un patrón de variación estacional ya que en verano e invierno las temperaturas son muy distintas en la mayor parte del globo. Los hábitos de los usuarios también son diferentes, en invierno las ventilaciones son mucho menos usuales que en verano, donde las ventanas suelen estar abiertas.

Durante el día, generalmente, se produce un incremento de temperatura y, como consecuencia, el aire tiende a subir, lo que desemboca en una disminución de la concentración en el nivel del suelo. Por el contrario, por la noche, en latitudes medias, se suele producir una estabilización de la atmósfera, una bajada de temperaturas y por consiguiente los valores de concentración se incrementan en los niveles más bajos.

Como se puede apreciar en la Figura 2-8, que muestra la temperatura exterior frente a la concentración de radón registradas en la tesis doctoral de Frutos Vázquez (2009), se puede apreciar que las variables no tienen, a priori, ninguna correlación [35]. Si bien es cierto, existe un patrón en la gráfica de la temperatura exterior achacado al ciclo diurno ya que la temperatura aumenta a lo largo del día y vuelve a disminuir por la noche. Esta variación cíclica también se puede apreciar en la línea de concentración.

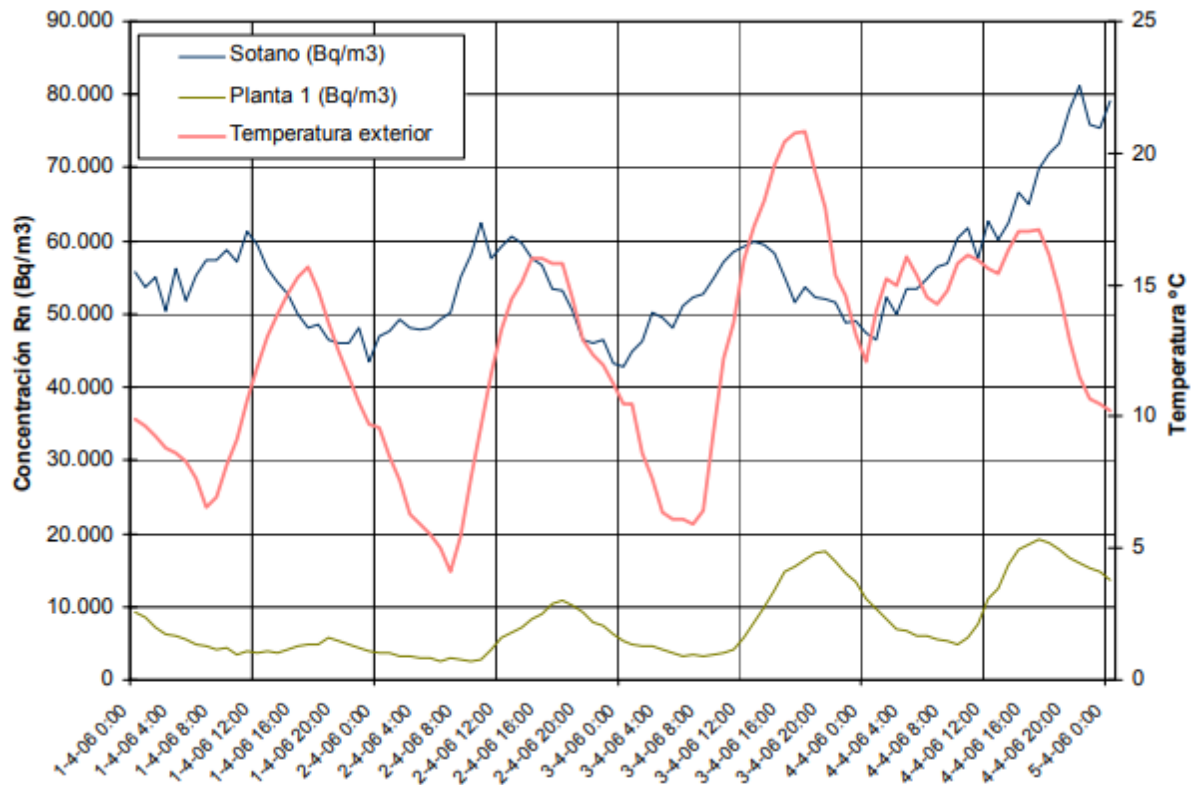


Figura 2-8 Concentración de radón frente a la temperatura exterior [35]

El cambio de temperatura en el interior lleva consigo un incremento en la presión barométrica en el interior de la vivienda. Este fenómeno es conocido como efecto Stack o efecto chimenea y regula el comportamiento de los gases sometidos a cambios de temperatura [41]. Básicamente, explica que el aire caliente de los interiores sufre una expansión (ley de los gases ideales) y por tanto tiende a fugarse por cualquier hueco en paredes o techos. Esto genera una depresión en el interior que el gas radón aprovecha para infiltrarse y así igualar las presiones.

Richard Cothern (1990) llega a la conclusión de que, debido al efecto Stack, en un edificio de 5 metros una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de 20°C suponía aproximadamente 4 hPa de diferencia entre el exterior y el interior [42]. Esta diferencia de presión se traduce en un flujo de 100 m³ h⁻¹ de aire contaminado de radón desde el terreno a través de cañerías, desagües, grietas etc.

Lluís Font (1997) a través de un modelo informático propio genera una fórmula que relaciona la diferencia de presiones, exterior-interior, con la diferencia de temperaturas y la dirección del viento, asegurando que existe una razón de proporcionalidad [23].

Existen otros autores que han desarrollado su propia fórmula matemática para relacionar la diferencia de temperaturas con el flujo de radón. Sesana et al., (2003) afirman basándose en su propio modelo que, si la temperatura interior es mayor que la temperatura exterior existe flujo de radón, y viceversa, si la temperatura interior es menor que la exterior el flujo sería de dentro hacia fuera y, por tanto, no existe flujo de radón [43].

En el estudio de Fernández Villar (2007), la autora concluye que a pesar de no existir una clara correlación entre la temperatura exterior y la temperatura interior, sí se puede apreciar cierta relación entre las variables si se atiende al registro de dispersión diaria, como se puede ver en la Figura 2-9 [24].

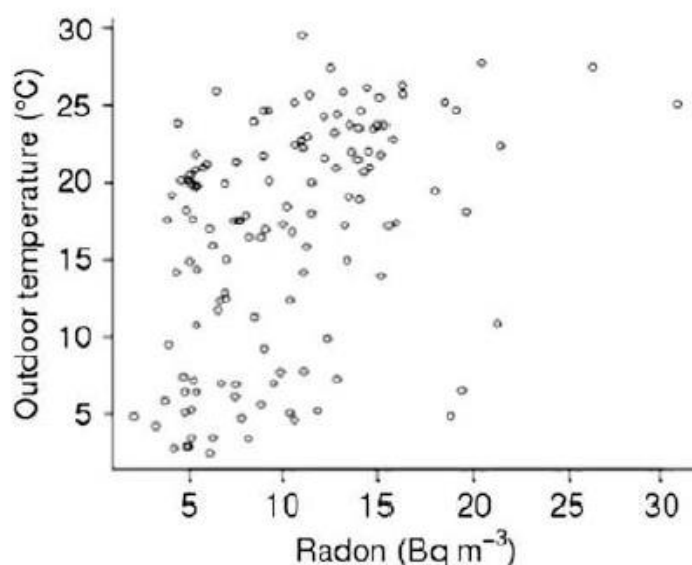


Figura 2-9 Dispersión diaria de la concentración de radón en función de la temperatura [24]

Si observamos la gráfica de la Figura 2-10 donde se representa el gradiente de presión frente a la concentración de radón desarrollada en la tesis doctoral de Borja Frutos Vázquez (200) podemos ver que el gradiente de presión es positivo en casi todo momento y los valores negativos coinciden cuando la temperatura exterior es mayor a la temperatura interior [35]. Por otro lado, se puede ver que la diferencia de presión máxima no supera los 3 Pascales.

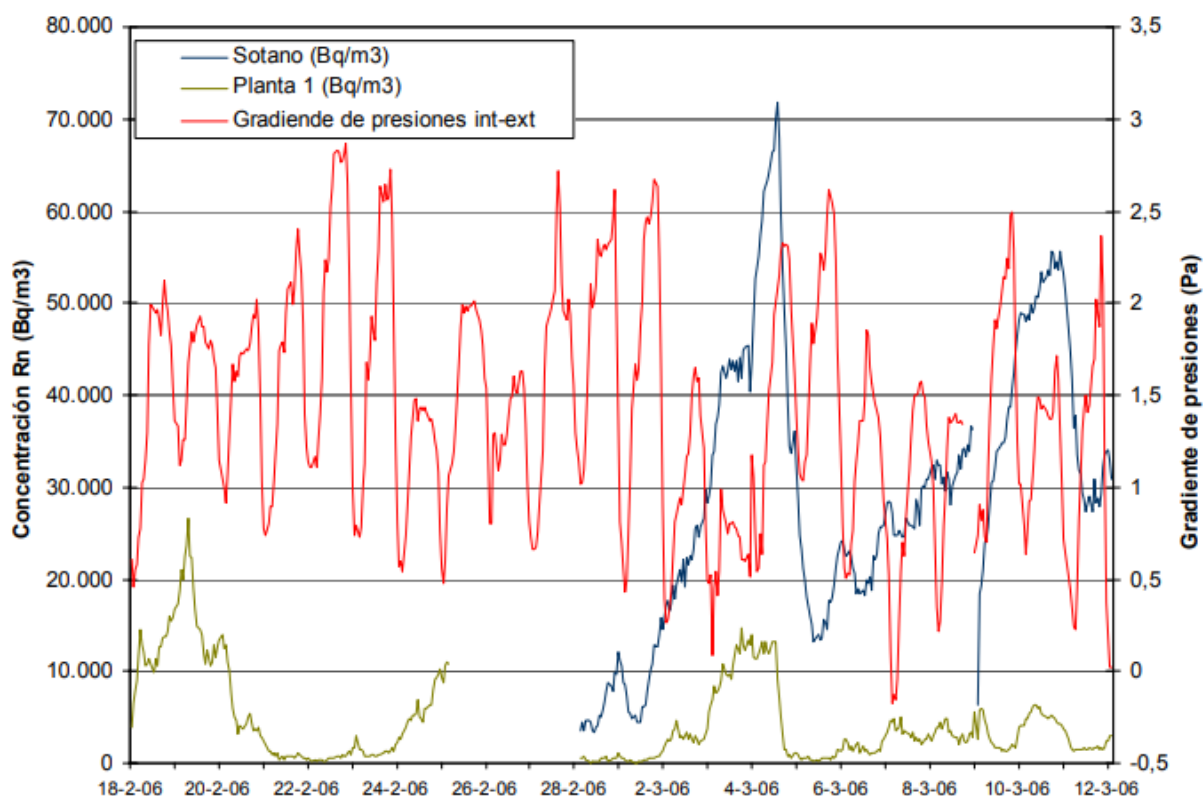


Figura 2-10 Concentración de radón frente al gradiente de presiones [35]

Viento

El viento es un fenómeno meteorológico provocado por la tendencia de todo fluido a compensar sus gradientes de presión y temperatura. Dependiendo de su velocidad y dirección generará gradientes de presión alrededor de los edificios. Si se llegan a producir variaciones en los campos de presión se podrían

inducir diferencias de presión entre el interior y el exterior del edificio provocando el movimiento del radón hacia la parte interna de las viviendas.

En un estudio llevado a cabo por Nazaroff et al., (1985) concluyeron que cuando la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior es pequeña y se dan altas velocidades de viento también se dan altas concentraciones de radón y, por el contrario, cuando la diferencia de temperaturas es grande, por ejemplo en invierno, y se dan vientos de carácter flojo la concentración de radón disminuye [44]. También observaron que las altas velocidades de viento guardaban correlación con la disminución en la concentración de radón del gas emanado desde el suelo.

Otro estudio, llevado a cabo por Eaton y Scott (1984), se centró en investigar los efectos del viento a través de un modelo de elementos finitos [45]. Se utilizó un edificio a escala en un túnel de viento para simular la presión a la que está sometida el suelo y se tomaron los datos meteorológicos de la ciudad de Toronto a lo largo de un año entero. El autor concluyó que tanto la velocidad como la dirección influyen en el aumento de la exhalación del gas, pero no encontró el coeficiente de correlación simple entre las variables por la diferencia del tiempo atmosférico entre las diferentes estaciones del año.

Según el documento elaborado por el CSN y que lleva por título *Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios* (2010), el viento tiene dos efectos opuestos, por las cuales se pueden encontrar distintas razones de correlación [30]. Cuando el viento entra en el interior a través de ventanas y juntas la concentración disminuye ya que aumenta la cantidad de aire en relación a la cantidad de radón. Por otro lado, este viento provoca diferencias de presiones que derivan en movimientos de succión que favorecen el incremento de concentración en interiores.

En la Figura 2-11, se presenta la gráfica de concentración de radón frente a la velocidad del viento desarrollada en un estudio de la Universidad Politécnica de Madrid, llevado a cabo por el doctor Borja Frutos Vázquez en 2009 [35]. Se puede observar que a mayor velocidad de viento la concentración de radón disminuye de forma casi lineal.

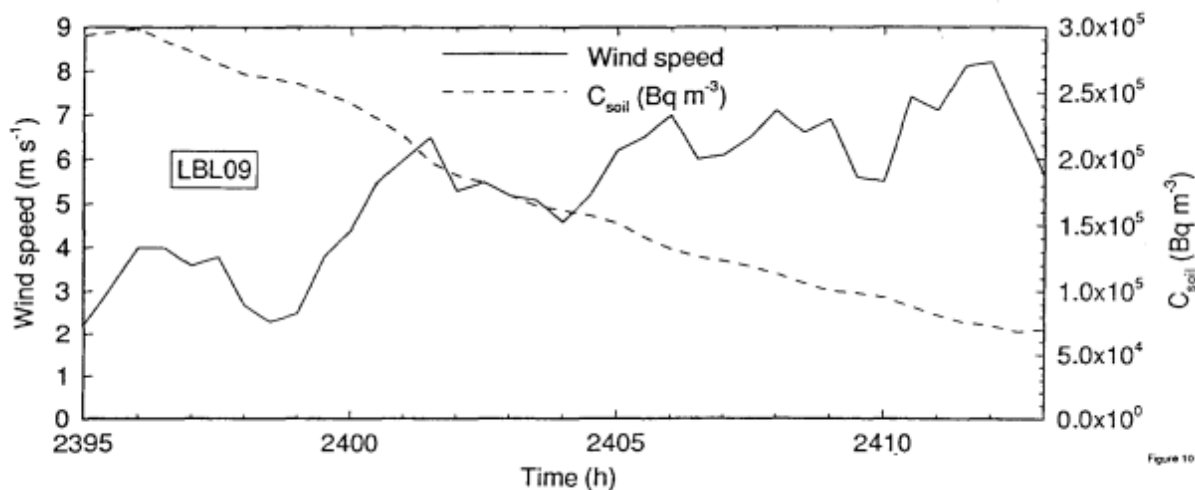


Figura 2-11 Gráfica de la concentración de radón frente a la velocidad del viento [35]

El citado estudio, llevado a cabo en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, se consiguió comprobar de manera experimental ambos comportamientos y cuál de los dos tiene mayor efecto sobre la concentración.

Para ello se diseñó una vivienda a escala constituida por un sótano y una planta baja con el objetivo de poder analizar la efectividad de las medidas anti-radón instaladas en cada una de ellas. Observando los resultados obtenidos, presentados en la gráfica de la Figura 2-12, se puede concluir que los valores máximos en la intensidad de viento coinciden con aumentos considerables en la concentración de radón en interiores. De aquí los autores deducen que, de los dos comportamientos que puede tener el viento en la concentración de radón, el aparentemente más relevante es el que genera el efecto de succión.

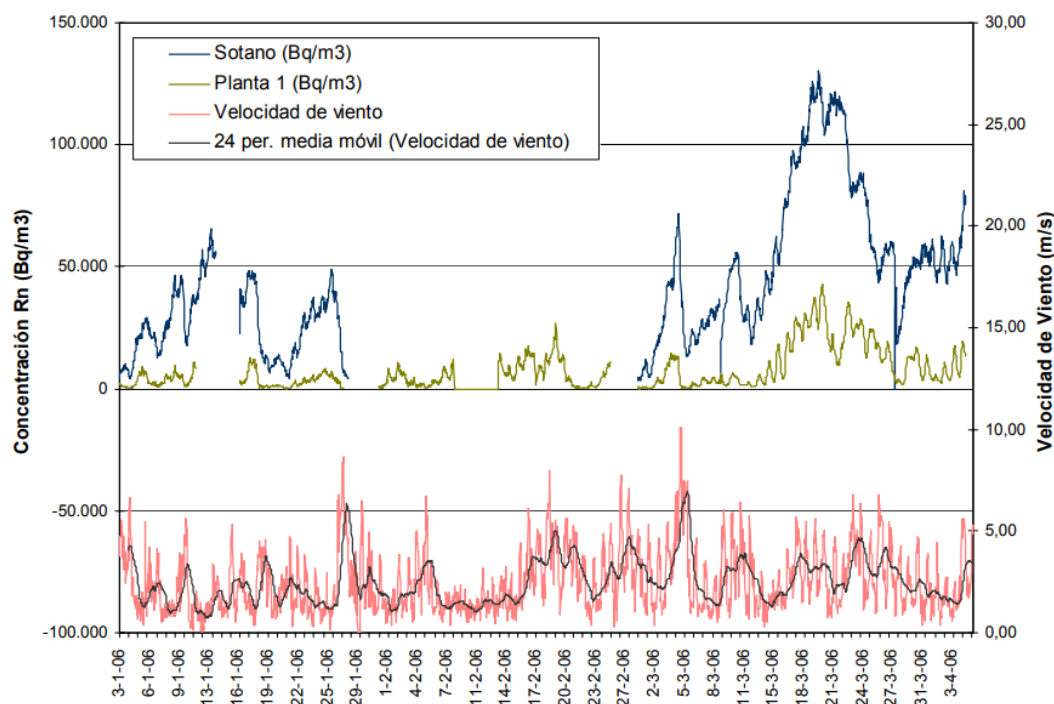


Figura 2-12 Concentración de radón frente a la velocidad del viento [35]

Viendo los estudios expuestos anteriormente se puede observar que no existe una única conclusión acerca de la correlación entre el viento y la concentración de radón. Existen otros parámetros como pueden ser la ubicación del lugar de estudio, la calidad de su aislamiento, la velocidad, dirección o incluso la temperatura del aire las que determinen los niveles de concentración.

La universidad de Berkeley, siguiendo la línea de investigación sobre la influencia de la presión barométrica sobre la concentración, presentó un estudio donde, tras analizar sus registros, concluyó que cuando existen gradientes de presión elevados se daban también altos niveles de concentración [46]. Sin embargo, destacan que no solo se daban altas concentraciones con elevados gradientes, es más, períodos de elevados niveles de radón coincidían con diferencias muy suaves de presiones. Por tanto, si bien es cierto que los gradientes de presión tienen gran influencia sobre la concentración no es la única variable a tener en cuenta para analizar los niveles del gas en interiores.

Una posible respuesta a lo ya mencionado la propone un informe emitido en 1992 que investiga los ciclos de variación de la presión [47]. El estudio asegura que la presión sigue unos patrones de variación llamados mareas barométricas. Estas mareas son originadas por la influencia gravitatoria de los cuerpos celestes como pueden ser el Sol o la Luna que, sumadas a un calentamiento de la atmósfera causada por el ozono, producen estas variaciones. Numéricamente el estudio dice que estas variaciones pueden suponer flujos de hasta $0,2 \text{ Bq s}^{-1}$, que es más del doble que el flujo que puede existir por el fenómeno de difusión.

2.2.2 Otras variables geofísicas

Además de las variables meteorológicas, existen otro tipo de fenómenos que pueden interferir en la variación de las concentraciones de radón. Los estudios que a continuación se presentan ponen de manifiesto la posible correlación que puede existir entre la concentración de radón y algunos de los fenómenos cíclicos que se dan en la naturaleza, como son los ciclos lunares o los cambios en el nivel freático.

Ciclos lunares

En algunos estudios en los cuales no parecía existir correlación aparente entre la concentración de radón y el diario del tiempo atmosférico, se descubrió que al superponer los datos de concentración sobre el calendario lunar si se hallaban correlaciones. Los datos se replanteaban desde la hora de comienzo de la fase de luna nueva de ese mes y terminando con la luna nueva del siguiente mes, el equivalente a 29 días.

En el estudio de F. Aumento (2002) se afirma que las correlaciones y los patrones de la señal se repetían de forma cíclica a lo largo de los meses lunares durante al menos un año [48]. El autor asegura que las variaciones bruscas e inesperadas de estos patrones se producen a causa de fenómenos vulcanológicos o sísmicos que tienen lugar de manera puntual. De hecho, para constatar esta información se intentó desarrollar el mismo estudio en la línea de intersección de dos placas tectónicas dando lugar a patrones confusos. Si atendemos a la gráfica presentada en la Figura 2-13 desarrollada en el estudio, se puede afirmar que sí existe un patrón en la señal de radón en función de los ciclos lunares, sobre todo en el período de luna nueva. Se representan las concentraciones de radón de la primera semana de cada ciclo lunar obteniéndose una forma de gráfica similar.

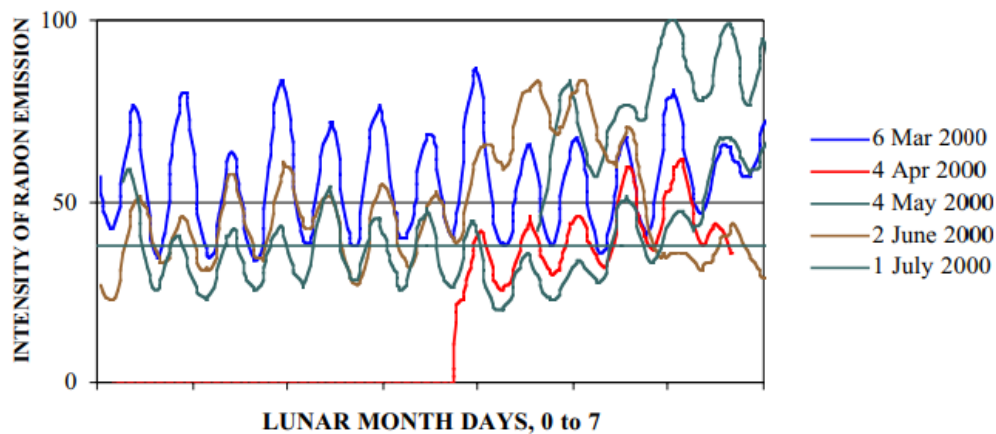


Figura 2-13 Concentración de radón durante la primera semana del ciclo lunar [49]

En un estudio llevado a cabo por la IRPA (Asociación Internacional para la Protección de Radón) se consiguen extraer mediante la transformada de Fourier las distintas frecuencias de la señal de radón y correlacionarlas con los ciclos lunares [49]. Como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 2-14 ambas variables están relacionadas, pero no inmediatamente, es decir, la concentración de radón se ve influenciada con un poco de retraso respecto a la variación de la fase lunar.

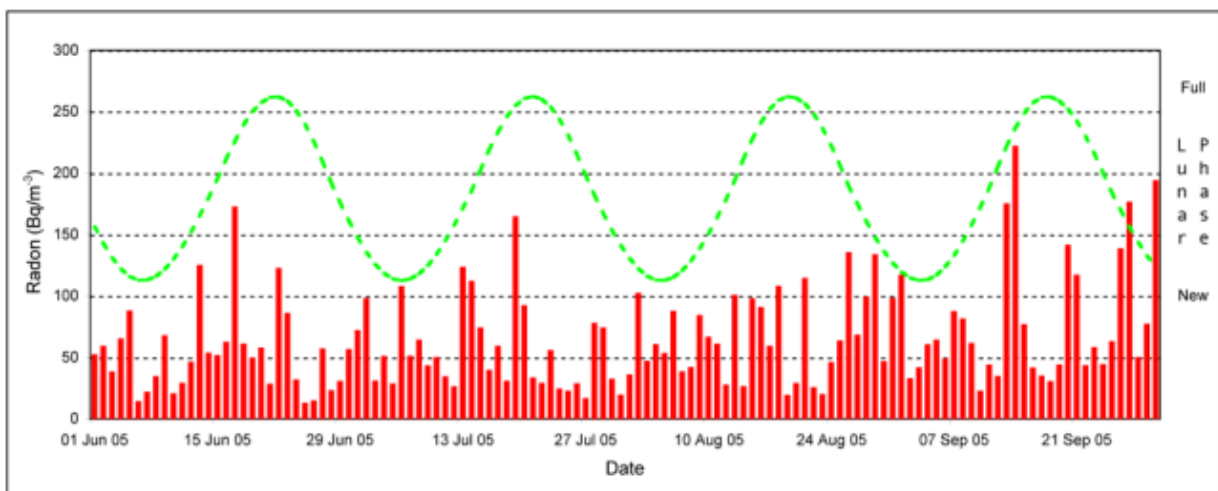


Figura 2-14 Concentración de radón frente a la fase lunar [49]

Ciclos de mareas

Existen diversas fuerzas en la naturaleza, como pueden ser la gravitatoria o la centrífuga, que rigen el comportamiento de los cuerpos. Otra de esas fuerzas es la generada por la presencia de cuerpos celestes tales como el sol o la luna, que modifican el campo gravitatorio de la tierra. El efecto de la atracción que tiene la luna, conjuntamente con el sol, se conoce como marea terrestre [50]. Estas mareas tienen diversas derivadas, como pueden ser las conocidas mareas oceánicas donde se aprecian grandes movimientos de masas de agua, pudiendo alcanzar diferencias de metros en algunos lugares del planeta.

La amplitud de la marea oceánica, como sabemos, está estrechamente ligada con las fases de la luna, coincidiendo sus máximos poco tiempo después de las fases de luna nueva y de luna llena. Este retraso temporal es conocido como “edad de las mareas” y es el resultado de la oposición de la viscosidad del agua a las fuerzas gravitacionales. El radón también sigue estas variaciones gravitacionales asociadas a los movimientos luni-solares, es decir, de alguna manera el radón del subsuelo se puede considerar un fluido continuo. El fenómeno de exhalación viene producido por los movimientos de dilatación-compresión que sufre la corteza terrestre y como consecuencia también los acuíferos son sometidos a estos movimientos [51]. El gas no se mueve de manera comparable a las mareas oceánicas o terrestres, ya que la condición de gas noble le hace reaccionar muy fácilmente a los cambios gravitacionales. Esto significa que necesita menos fuerza gravitacional para comenzar a moverse, con lo que no es de extrañar que aparezca desfasado respecto a las mareas oceánicas. Su mayor sensibilidad a fuerzas de atracción gravitacional produce un agotamiento en su fuente de suministro, es decir, el gas alcanza su punto de emanación máxima antes de que se den las amplitudes máximas de la marea oceánica. A partir del momento de emanación máxima el radón sufre una reducción paulatina de la intensidad, por lo que cuando se producen las amplitudes de marea máxima la curva de la señal de radón ya estará decreciendo [52].

De la misma manera, las mareas terrestres tienen movimiento vertical y horizontal. La corteza terrestre se ve afectada por el movimiento en el plano horizontal debido a que, como hemos apuntado anteriormente, está sujeta a contracciones y dilataciones que derivan en la liberación de gases desde el suelo, entre los que se encuentra el radón. De igual modo, los acuíferos sufren los mismos movimientos que acaban resultando en la expulsión de radón [48]. En un estudio llevado a cabo por Marino Doménico et al, (2018) realizan mediciones de radón frente a las variaciones de marea terrestre [53]. Las señales de marea están formadas por diferentes armónicos, es decir, sumas de funciones sinusoidales. Cada una de las componentes del sumatorio de funciones está relacionada con una variable como pueden ser las interacciones gravitacionales de la luna o el sol.

Analizando las funciones presentes en la Figura 2-15 a través de un programa matemático obtuvieron que las correlaciones para las fluctuaciones diurnas eran de 0,75 mientras que la correlación para las fluctuaciones semi diurnas eran 0,94. Sin embargo, el estudio concluye indicando que a pesar de la alta correlación encontrada serían necesarios más años de análisis de datos para poder asegurar que las mareas terrestres y la concentración de radón son variables que guardan gran correlación. El motivo que dan los autores es que pueden existir determinadas variables meteorológicas causantes de las variaciones de la concentración o del nivel freático [53].

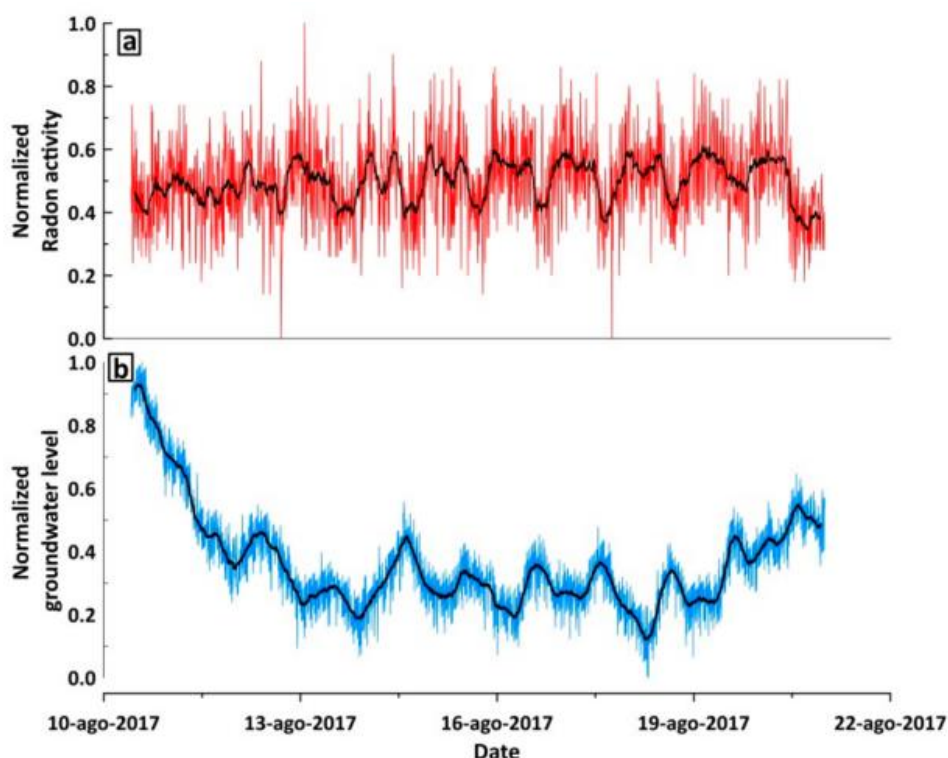


Figura 2-15 Concentración de radón frente a amplitud de marea terrestre [53]

Aunque se puede apreciar que no todos los estudios concluyen de la misma manera respecto a las correlaciones existentes entre la concentración de radón y las diferentes variables geofísicas, se ha elaborado a modo resumen una tabla de cómo aumenta o disminuye la concentración respecto a las distintas variables (Tabla 2-2).

Fenómeno Geofísico	Comportamiento	Concentración de radón
Presión	Disminuye	Aumenta
Viento	Aumenta	Aumenta/Disminuye
Precipitaciones	Aumenta	Aumenta
Temperatura	Aumenta	Aumenta/Disminuye
Diferencia de temperatura (int-ext)	Positiva	Aumenta
Ciclo Lunar	Luna llena/nueva	Aumenta
Marea terrestre u oceánica	Aumenta	Aumenta

Tabla 2-2 Resumen de la correlación entre los factores meteorológicos y la concentración (elaboración propia)

Tras analizar, a partir de las investigaciones de diversos autores, las distintas variables geofísicas y cómo pueden llegar a influir en la concentración de radón podemos concluir que es muy difícil delimitar el comportamiento individual de cada uno de los fenómenos geofísicos. Como ya se ha mencionado anteriormente, los fenómenos meteorológicos no ocurren por separado, es más, la variación de un fenómeno meteorológico provoca la aparición de otro. Un ejemplo de ello es la relación que hay entre los descensos de presión y la aparición de precipitaciones.

A continuación, se procederá con el desarrollo de nuestro propio estudio de correlación entre las distintas variables geofísicas y la concentración de radón en el recinto de la Escuela Naval Militar.

3 METODOLOGÍA Y MEDICIÓN

3.1 Lugar de estudio

La Escuela Naval Militar constituye el único centro de formación de los futuros oficiales de la Armada española. El lugar acoge las instalaciones del Centro Universitario de la Defensa encargado de impartir el grado de Ingeniería Mecánica a los alumnos.

En los últimos años el recinto ha sido objeto de estudio, ya que se ha demostrado que presenta elevadas concentraciones de radón en diversos puntos [8, 21, 54]. Es por esto que el trabajo, tal y como ha sido motivado, consiste en observar qué patrones presentan las concentraciones de radón y determinar qué grados de correlación existen con los diversos fenómenos geofísicos y con sus frecuencias.

Para ser capaces de realizar un análisis de la señal de radón lo más riguroso posible, se han ubicado diferentes medidores de concentración de radón en distintos puntos de la ENM. De esta manera, en caso de que exista alguna variación entre ellos, se podrán analizar las causas que influyen en estos cambios.

En la Figura 3-1, se puede observar el recinto completo de la Escuela Naval Militar donde se destacan los lugares relevantes y aquellos escogidos para llevar a cabo el análisis.



Figura 3-1 Recinto de la Escuela Naval Militar (elaboración propia)

- En el edificio del CUD, en concreto en el despacho 114 que está ubicado en la planta baja, se han medido con anterioridad elevados niveles de concentración, llegando a alcanzar concentraciones 10 veces mayores que la permitida [8]. Debido al riesgo que suponen las altas concentraciones de radón el despacho ha sido reconvertido en almacén. Además, se decidió instalar un sistema de sensores que recogen datos durante todo el año a diferentes alturas. Entre ellos se encuentra un medidor AlphaE-Ultra (Figura 3-3) que monitoriza, además de los niveles de concentración, otros parámetros de interés como la temperatura, la presión o la humedad. En la Figura 3-2 se puede ver la ubicación del despacho en cuestión respecto al patio de aulas y la explanada.

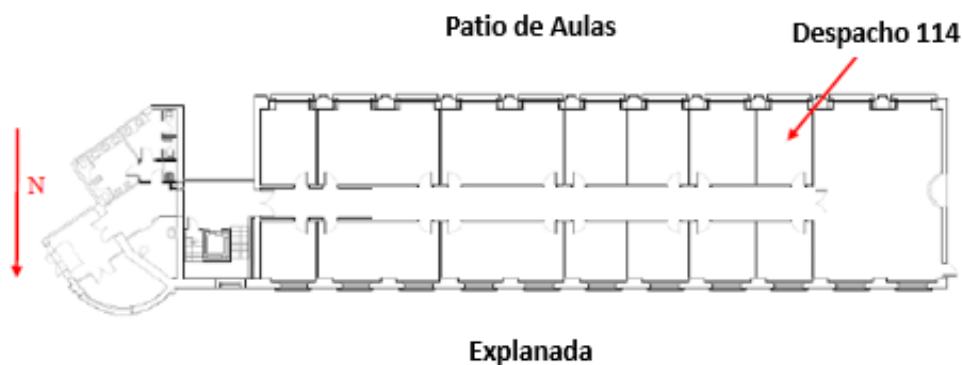


Figura 3-2 Ubicación del Despacho 114 en el edificio del CUD (elaboración propia)

- En el Aula 21, emplazamiento del simulador de navegación, se ha colocado un medidor RadonEyeRD200. Cabe destacar que en esta aula se estaban realizando obras y reformas durante el período de medición, por lo que las medidas se vieron afectadas por el continuo movimiento de entrada y salida de los operarios produciendo ventilaciones naturales. Para el análisis de datos se ha reducido la muestra a aquellos períodos donde no exista influencia de variables externas. El interés de incluir esta aula en nuestro estudio viene a raíz de las mediciones y posteriores resultados extraídos durante el desarrollo de un trabajo realizado durante el curso 2020-2021. En el citado trabajo [8], se encontraron patrones de variación de radón con frecuencias de 6 horas, lo que nos hace pensar que la influencia del nivel freático se pueda ver acentuada en esta zona.
- En el edificio de investigación del CUD, se han medido las concentraciones de radón en dos habitaciones distintas: en el Aula Multiusos y en la Sala de Reuniones. En la primera de ellas los datos han sido tomados por un medidor RadonEyeRD200; en la segunda sala se han instalado dos medidores RadonEyeRD200. La intención con el segundo medidor era la de asegurar las mediciones en caso de fallo del primero. Ambos han obtenido las mismas concentraciones sin haber experimentado fallo. Cabe destacar que el gran atractivo de esta zona de medición es que el asentamiento es terreno ganado al mar. Esto puede tener una influencia significativa en los niveles de radón ya que el factor “composición del suelo” tendrá mucho menos peso en esta zona.

A continuación, se muestra en la Tabla 3-1 un resumen con las habitaciones y la identificación de los medidores instalados en cada una:

Habitación	Modelo de Medidor	Número de Identificación
Despacho 114	RadonEyeRD200	6
	AlphaE-Ultra	-
Aula 21: Simulador de Navegación	RadonEyeRD200	39
Aula Multiusos	RadonEyeRD200	37
Sala de Reuniones	RadonEyeRD200	40
	RadonEyeRD200	41

Tabla 3-1 Resumen de la red de dispositivos medidores

3.2 Equipos y mediciones

3.2.1 Equipos de medición

En este apartado se presentarán los equipos medidores que hemos utilizado para extraer los datos de las concentraciones de radón a lo largo del tiempo, así como algunos de los parámetros meteorológicos.

AlphaE-Ultra

Uno de los equipos de medición utilizados es el AlphaE-Ultra (Figura 3-3) desarrollado por la empresa francesa Bertin Instruments, fundada tras el accidente nuclear de Chernóbil. Este dispositivo nos permite obtener la medida rápida de radón transcurridas las 2 primeras horas de medición. Puede utilizarse tanto para medir la concentración de radón en interiores como exteriores, además de servir como dispositivo de medición de dosis y exposición personal, lo que lo hace propicio para trabajadores expuestos al riesgo de altas concentraciones.

Presenta los datos de forma automática en $\text{kBq h}^{-1} \text{m}^{-3}$. Su batería de hasta 6 meses de duración le permiten prescindir de una toma de corriente en el lugar de la medición, aunque incorpora la opción de operación permanente mediante una toma de USB. En nuestro caso lo utilizamos de manera inalámbrica. Tiene un error de calibración del $\pm 10\%$. Se pueden regular los intervalos de medición entre 1 minuto y 12 horas, para nuestro estudio fue configurado para medir cada 10 minutos. Además, incorpora sensores de medición de temperatura, de humedad y de presión. La dosis máxima que es capaz de medir es de 10 MBq m^{-3} mientras que su sensibilidad es de 20 Bq m^{-3} . Los datos se pueden extraer utilizando un cable USB conectado al ordenador [55]. Cabe destacar que tiene un almacenamiento limitado de medidas, alcanzando como máximo los 8500 registros, que en función del tiempo de integración irá de los 6 a los 4250 días.



Figura 3-3 Medidor AlphaE-Ultra [55]

RadonEyeRD200

Este dispositivo (Figura 3-4) ha sido utilizado en trabajos previos sobre las concentraciones de radón [21] [20]. El equipo ha sido desarrollado por la firma surcoreana RadonEye. Su tamaño y peso le convierten en un dispositivo versátil ya que puede ser colocado en cualquier lugar. El inconveniente es que necesita estar conectado a una toma de corriente para cumplir sus funciones con garantías. Los datos comienzan a presentarse en Bq m^{-3} o en pCi L^{-1} una hora después de la puesta en funcionamiento. Analiza la concentración mediante cámara de ionización cada 10 minutos y expone el valor de la media horaria [56].

El umbral de detección máximo está fijado en 3696 Bq m^{-3} con una precisión de $\pm 10\%$. Los datos son extraídos del dispositivo vía Bluetooth a través de un teléfono móvil, donde hemos de tener instalada la aplicación RadonEye. En caso de tener varios dispositivos medidores en una misma área de cobertura hemos de seleccionar mediante su identificación visual el dispositivo en cuestión.

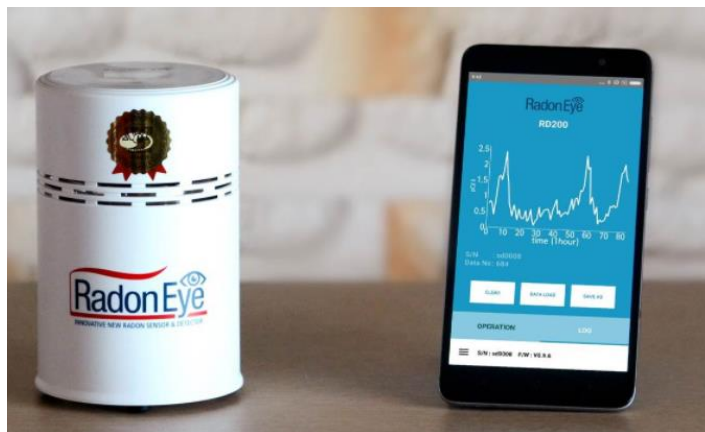


Figura 3-4 Dispositivo RadonEye con aplicación [56]

Sensor BME200

Este sensor (Figura 3-5) integra en un único dispositivo sensores de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. Se conecta directamente a un microcontrolador que es el que procesa los datos. En nuestro caso se trata de un dispositivo Raspberry, que no es más que un ordenador de placa única.

En cuanto a las especificaciones de los sensores, destacan por su bajo consumo energético con una frecuencia de muestreo máxima de 157 Hz. En el ámbito de la presión es capaz de medir desde los 300 hPa hasta los 1100 hPa con una precisión de 1 hPa. Admite rangos de temperatura desde los -40°C

hasta los 85°C con una precisión de 1°C. Por último, ofrece el registro de humedad con una precisión de $\pm 1\%$.

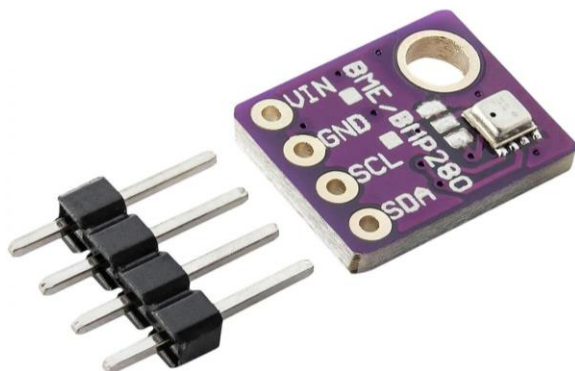


Figura 3-5 Sensor BME280

Sensores de temperatura

Se han colocado dispositivos medidores de temperatura (Figura 3-6) en las aulas del edificio de investigación y en el Aula 21. El objetivo de esta medición es poder ver si existe correlación entre la concentración de radón y la humedad relativa, así como con la temperatura.

El modelo de medidor utilizado es el “Datalogger de temperatura”. Los datos se extraen de un programa llamado One Wire Viewer que luego se pueden exportar al ordenador. El medidor es capaz de medir todo el rango de humedad relativa, con una precisión de $\pm 5\%$ y de -40°C hasta los 85°C con una precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Es capaz de almacenar hasta 8192 medidas, dependiendo de la resolución programada. El intervalo de medición se puede fijar desde el segundo hasta las 273 horas. El principal inconveniente es que tiene una vida útil de 10 años.



Figura 3-6 Botones medidores de temperatura

Obtención de datos meteorológicos, ciclos lunares y mareas

La correlación con las diversas variables meteorológicas constituye uno de los pilares fundamentales del presente trabajo. Es por esto que la información de los mismos debe ser rigurosa y, por consiguiente, ha de estar contrastada por diversas fuentes.

En primer lugar, se decidió realizar una búsqueda sobre las posibles estaciones meteorológicas en base a su proximidad y prestaciones. Como resultado se escogió la estación meteorológica del Puerto de Marín, perteneciente a la red de Puertos del Estado y administrada por Meteogalicia. En la Figura 3-7, se muestra la situación de la citada estación de medición respecto a la Escuela Naval Militar, incluyendo las distancias aproximadas a los lugares de estudio.



Figura 3-7 Distancia desde la estación meteorológica a las distintas habitaciones (elaboración propia)

A continuación, se describen los sensores principales con los que cuenta la estación del Puerto de Marín (Figura 3-8) [57]:

- Incluye un anemómetro-veleta, desarrollado por la empresa Campbell, que proporciona una medición de intensidad con una precisión de $\pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$ y $\pm 3^\circ$ en la dirección.
- La sonda de presión, desarrollada por la empresa finlandesa Vaisala, tiene una desviación de $\pm 0,3 \text{ hPa}$ a 20°C
- La radiación solar global se mide a través de un piranómetro de fabricación holandesa capaz de detectar radiaciones de hasta 2000 W m^{-2} . Para medir la radiación ultravioleta se utiliza un biómetro desarrollado por la misma empresa.
- El pluviómetro de cazoleta diseñado por una empresa alemana mide las precipitaciones por acumulación con una precisión del $\pm 2\%$.
- La CPU que administra y realiza el tratamiento de datos es el Datalogger CR1000X, fabricado por la marca americana Campbell Scientific. Tiene una velocidad de muestreo de 300 Hz y es capaz de operar en condiciones extremas de temperatura.
- Por último, destacamos el higrómetro que proporciona las mediciones de temperatura y humedad. Presenta una precisión de $\pm 0,8\%$ para la humedad y de $\pm 0,1 \text{ K}$ a 23°C . Es capaz de medir todo el espectro de humedad relativa y de -50°C hasta los 100°C de temperatura.



Figura 3-8 Estación Meteorológica del Puerto de Marín [57]

La página web de Meteogalicia ofrece una base de datos desglosada por provincias y municipios donde se publican los registros de las mediciones recogidas por cada una de sus estaciones meteorológicas. Como ya se ha mencionado anteriormente, en el presente estudio nos hemos servido del registro de la estación del Puerto de Marín, que ofrece las siguientes variables:

- Precipitaciones ($L m^{-2}$)
- Velocidad del viento y su desviación típica a 10 m ($km h^{-1}$)
- Dirección del viento y su desviación típica a 10 metros ($^{\circ}$)
- Velocidad de la racha de viento y su dirección a 10 metros ($km h^{-1}$)
- Horas de sol
- Humedad relativa a 1,5 metros (%)
- Presión (hPa)
- Presión reducida (hPa)
- Radiación solar global ($W m^{-2}$)
- Radiación ultravioleta ($W m^{-2}$)
- Temperatura de la lluvia a 1,5 metros ($^{\circ}C$)
- Temperatura media a 1,5 metros ($^{\circ}C$)
- Temperatura de la radiación ultravioleta ($^{\circ}C$)

En base a la bibliografía expuesta en el estado del arte y con el objetivo de agilizar el tratamiento de los datos, se decidió analizar las 5 variables meteorológicas que más influencia pueden tener en la densidad de desintegración. Las variables elegidas son:

- Precipitaciones ($L m^{-2}$)
- Humedad relativa a 1,5 m (%)
- Presión (hPa)
- Temperatura media a 1,5 m ($^{\circ}C$)
- Velocidad del viento a 10 m ($km h^{-1}$)

3.2.2 *Períodos de medición*

Los dispositivos medidores RadonEye200RD del edificio de investigación y del Aula 21, se iniciaron el día 22 de diciembre, coincidiendo con el inicio del permiso de Navidad de los alumnos. De esta manera se disminuyó el riesgo de influencias externas, como puede ser el movimiento de personas entrando y saliendo de las distintas habitaciones o la ventilación habitual en períodos laborales.

Las mediciones del despacho 114 fueron extraídas desde distintos dispositivos. El período de medición del RadonEye200RD se extiende desde el mes de noviembre hasta el 24 de enero. Además, como se ha mencionado anteriormente, la habitación cuenta con un medidor Alpha-E Ultra, de mejores

prestaciones que el anterior, con un período de medición desde el 17 de diciembre al 15 de enero. Por último, cuenta con un sistema de sensores que funciona de manera permanente, registrando el valor de distintos parámetros en varias alturas. Los datos son almacenados en un dispositivo Raspberry del que posteriormente se extraen para su análisis. Las mediciones fueron escogidas en función de la duración de los períodos de interés para el trabajo.

Además, se extrajo una serie de concentraciones más larga registrada por este sistema de sensores y procesada por un dispositivo Raspberry. Esta serie recogía datos de concentración desde el mes de agosto hasta el mes de enero. El análisis de un período de tiempo más largo permite la normalización de los datos, evitando así valores anómalos y, por tanto, que las frecuencias de la señal de concentración sean más fidedignas. Los resultados obtenidos tras el análisis de correlación entre estas frecuencias y los fenómenos cíclicos serán más rigurosos.

A continuación, se muestra una tabla resumen con las fechas de medición de cada sensor:

Habitación	Modelo de medidor	Fecha de inicio	Fecha de fin
Despacho 114	RadonEyeRD200	22/12/21 11:35	24/01/2022 13:35
Despacho 114	AlphaE-Ultra	15/12/2021 11:00	17/02/2022 10:40
Despacho 114	RadonEyeRD200 conectado a Raspberry	1/08/2021 01:00	21/01/2022 14:00
Aula 21	RadonEyeRD200	22/12/2021 11:15	24/01/2022 13:20 ¹
Aula 21	RadonEyeRD200	26/01/2022 12:30	03/02/2022 14:00
Aula Multiusos	RadonEyeRD200	22/12/2021 14:20	24/01/2022 12:50
Sala de Reuniones	RadonEyeRD200	22/12/2021 11:45	24/01/2022 12:40

Tabla 3-2 Fechas de inicio y fin de las mediciones por medidores

Siguiendo las recomendaciones de los propios fabricantes, así como la manera de proceder en otros estudios de medición de radón, se decidió colocar los medidores a un metro de altura aproximadamente y separados de las paredes. Como ya se ha discutido anteriormente, los niveles de radón más elevados se dan en las capas más cercanas al suelo, por lo que para tener una medición general de la habitación se decidió colocar el medidor a esta altura.

3.2.3 Tratamiento de datos

En este apartado se pretende explicar de manera somera cómo se ha llevado a cabo el almacenamiento y posterior tratamiento de los datos.

Los datos meteorológicos son recogidos cada 10 minutos y presentados como un archivo de texto separado por columnas. Por su parte, los datos de densidad de desintegración se presentan de distinta manera dependiendo del dispositivo. Los medidores AlphaE-Ultra y el RadonEyeRD200 realizan una medición cada 10 minutos y presentan la media horaria de las concentraciones. La Raspberry, en cambio, permite acceder al registro de los datos diezminutales en el despacho 114.

Para poder equiparar ambas variables se decidió expresar los datos meteorológicos de manera horaria. Para ello, se decidió hacer el promedio de las variables de humedad relativa (a partir de ahora humedad), presión, temperatura a 1,5 m (a partir de ahora temperatura) y velocidad del viento a 10 m (a partir de ahora velocidad del viento), mientras que de la variable precipitaciones se hizo el sumatorio de las 6 mediciones que constituyen una hora, para obtener como resultado $L\ m^{-2}\ h^{-1}$.

¹ Se tuvieron que descartar la mayoría de los datos.

Para la representación de los resultados nos hemos servido de dos softwares y de un lenguaje de programación:

- *Microsoft Excel* para realizar un primer tratamiento de los datos, así como para descartar aquellas mediciones atípicas, que más tarde pudiesen derivar en una peor lectura de las gráficas y dificultar el análisis de las mismas. Se pueden ver ejemplos de estas hojas de cálculo en el Anexo I.
- *Matlab* ha sido utilizado para realizar un análisis de frecuencias basado en la transformada de Fourier, mediante funciones implementadas en el propio programa.
- *Python* ha sido el lenguaje de programación a través del cual hemos graficado todos nuestros datos. Además, hemos utilizado distintas librerías para extraer los coeficientes de correlación y otros parámetros estadísticos que facilitan la interpretación de los resultados.

3.3 Modelos de correlación de variables

A la hora de analizar dos variables de forma simultánea surgirá la pregunta de qué relación guardan entre ellas y, en caso de existir, si dicha relación es estadísticamente significativa. Es decir, si existe algún tipo de patrón que determine cómo se comporta una en función de la variación de la otra.

Los modelos de correlación cuantifican cómo es la relación entre dos variables. No debemos confundir este término con el de regresión, que trata de modelar mediante una ecuación esta relación y así ser capaz de predecir el valor de una a partir de la otra. Por otra parte, en los modelos de correlación la asignación de las variables a X o Y (siendo X-Y los ejes de coordenadas) es independiente, mientras que en la regresión sí tiene efecto [58]. Cabe destacar que correlación no implica causalidad, es decir, que dos variables se comporten conjuntamente no significa que una sea causada por la otra.

Se analizará el comportamiento de la variable “densidad de desintegración” de nuestro lugar de estudio, que hemos ido analizando a lo largo del tiempo y que trataremos de ver si guarda alguna relación, es decir, se correlaciona y en qué grado, con las distintas variables geofísicas.

Para poder analizar la correlación hemos de servirnos de ciertos parámetros cuantificables que nos relacionan ambas variables. Uno de estos parámetros es la covarianza que se expresa como:

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N - 1}$$

donde $\bar{x}, \bar{y}$ son las medias de cada variable, y x_i, y_i el valor de las variables en cada observación.

Este parámetro nos da una idea del grado de variación combinada de las variables respecto a sus medias y para ello, es necesario que ambas tengan la misma escala. En nuestro caso, los pares de variables objeto de estudio, “densidad de desintegración”, en Bq m⁻³, y los parámetros meteorológicos con sus respectivas unidades, no cuentan con el mismo orden de magnitud. Por ejemplo, la concentración puede llegar a tomar valores absolutos por encima de mil, mientras que la humedad nunca superará el valor absoluto de la centena. Para poder utilizar el parámetro de la covarianza, las unidades de medida de ambas variables tienen que ser comparables en valor absoluto. Por ello, hemos de utilizar los conocidos como coeficientes de correlación que no necesitan de este requisito.

Existen distintos tipos de modelos de correlación que presentan sus respectivos coeficientes. Los coeficientes de correlación toman valores entre 1 y -1, siendo el primero significado de correlación positiva perfecta y el segundo de correlación negativa perfecta. En este trabajo presentaremos los coeficientes de correlación de Pearson y de Spearman, aunque existen más parámetros que determinen el coeficiente de correlación entre dos variables.

Básandose en la teoría que a continuación se expone, se ha realizado un análisis de datos para la elección del coeficiente a utilizar quedando reflejado en el Anexo V: Justificación del Coeficiente de Correlación.

3.3.1 Modelo de correlación de Pearson

Karl Pearson nació en 1857 y destaca por establecer la disciplina de la estadística matemática. En 1985 presenta su modelo de correlación, que en términos matemáticos se expresa como:

$$r_{XY} = \frac{\Sigma(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{[\Sigma(X-\bar{X})^2 \Sigma(Y-\bar{Y})^2]^{1/2}} = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} S_{YY}}}$$

donde $\bar{x}, \bar{y}$ son las medias muestrales de las variables y los valores de S_{XX} , S_{XY} y S_{YY} corresponden a las sumas de los cuadrados corregidas y al producto cruzado de XY .

Si bien es cierto que hay autores que han desarrollado otras metodologías para calcular el coeficiente [59]. El denominador de la expresión corrige el posible fallo en escala que pudiese existir entre las variables objeto del estudio.

Para explicar el presente modelo de correlación vamos a suponer que nuestros pares de variables (X_n, Y_n) se encuentran ordenados y se estudia su comportamiento con respecto a un plano cartesiano con origen en $\bar{x}, \bar{y}$ ubicados en el centro del diagrama [60]. En la Tabla 3-3 se muestra el signo del coeficiente en función del cuadrante donde se sitúe la nube de puntos y la covarianza de las variables.

Nº de caso	Covarianza de X e Y		Signo de correlación	Cuadrantes de la nube
Caso 1	$X_i > \bar{X}$	$Y_i > \bar{Y}$	+	1 y 3
Caso 2	$X_i < \bar{X}$	$Y_i < \bar{Y}$	+	1 y 3
Caso 3	$X_i > \bar{X}$	$Y_i < \bar{Y}$	-	2 y 4
Caso 4	$X_i < \bar{X}$	$Y_i > \bar{Y}$	-	2 y 4
Caso 5	Desviaciones compensadas		+ o -	Todos

Tabla 3-3 Signo de correlación y cuadrantes

Además, como ya se ha mencionado anteriormente, el coeficiente de Pearson cuantifica el grado de correlación existente entre las dos variables, es decir, indica la fuerza con la que estas se vinculan. Los autores Goodwin y Leech concluyeron en un estudio sobre el parámetro estadístico que, factores como el tamaño de la muestra o la variabilidad de las características de interés pueden modificar los resultados [61].

Si observamos la Figura 3-9, podremos ver las distintas dispersiones por cuadrantes explicadas en la Tabla 3-3. El caso a) presenta un coeficiente de correlación positivo con una pendiente positiva y ocupando los cuadrantes 1 y 3; el caso b) muestra un coeficiente de correlación negativo con una pendiente negativa estableciéndose en los cuadrantes 2 y 4; por su parte los casos c) y d) presentan coeficientes de correlación muy débiles, ya que muestran una nube de puntos muy esparcida por todos los cuadrantes. La cuantificación del coeficiente de correlación de Pearson viene expresada por el valor de r en cada gráfica, donde las dispersiones más lineales toman valores absolutos cercanos a la unidad.

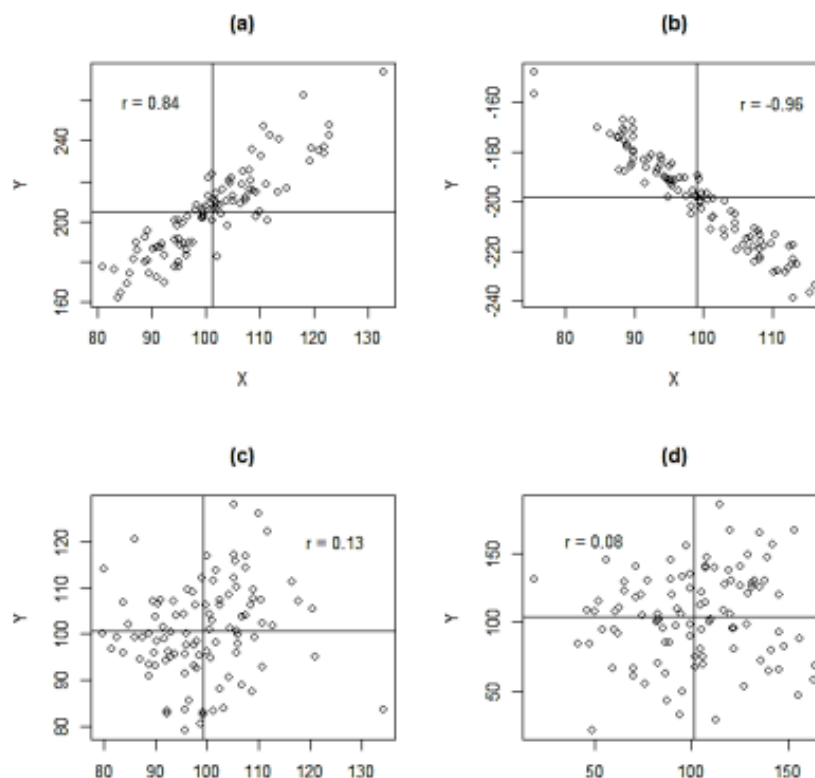


Figura 3-9 Coeficiente de correlación en función de la dispersión de nube de puntos

A continuación, se describirán las propiedades más relevantes de este coeficiente [60]:

- **Adimensionalidad:** mediante el cociente entre el producto de las variables XY y sus respectivos cuadrados se cancelan las unidades de numerador y denominador. Esto lo hace versátil y de fácil interpretación.
- **Relación lineal:** es importante entender esta característica para no cometer errores en las conclusiones al utilizar el coeficiente de Pearson. Como ya se ha explicado anteriormente, los valores del coeficiente estarán comprendidos entre ± 1 . Los valores extremos significarán perfecta asociación lineal positiva o negativa, mientras que el valor nulo será evidencia de que no existe relación lineal entre las variables de estudio. Es decir, el coeficiente solo mostrará la fuerza de relación lineal entre ellas, por lo que, el valor 0 no implica que no exista otro tipo de relación entre las variables.
- **Simetría:** las características atribuidas a X y Y son intercambiables, es decir, el coeficiente de Pearson no establece ninguna de las características como explicativa de la otra.
- **Independencia con respecto al origen y escala:** el coeficiente de Pearson no verá alterado su valor por realizar la misma operación lineal a todas sus variables. Es decir, el valor se mantendrá constante, aunque se le sumen, resten, multipliquen o dividan constantes.

Cabe destacar que el análisis de Pearson es idóneo para correlaciones paramétricas donde la distribución de datos sigue una curva Gaussiana (Figura 3-10) o distribución normal, caracterizada por su simetría respecto a la media de las mediciones. Sin embargo, los datos que se adquieren en períodos de observación o muestreo, propios de las ciencias naturales o sociales, raramente siguen una distribución normal. Por este motivo, cuando tratamos de analizar el grado de correlación que existe entre variables de este tipo tenemos que recurrir a modelos de correlación no paramétricos, es decir, modelos donde las variables no se distribuyen de manera normal (Figura 3-11). Un ejemplo de modelo de correlación no paramétrico es el de Spearman.

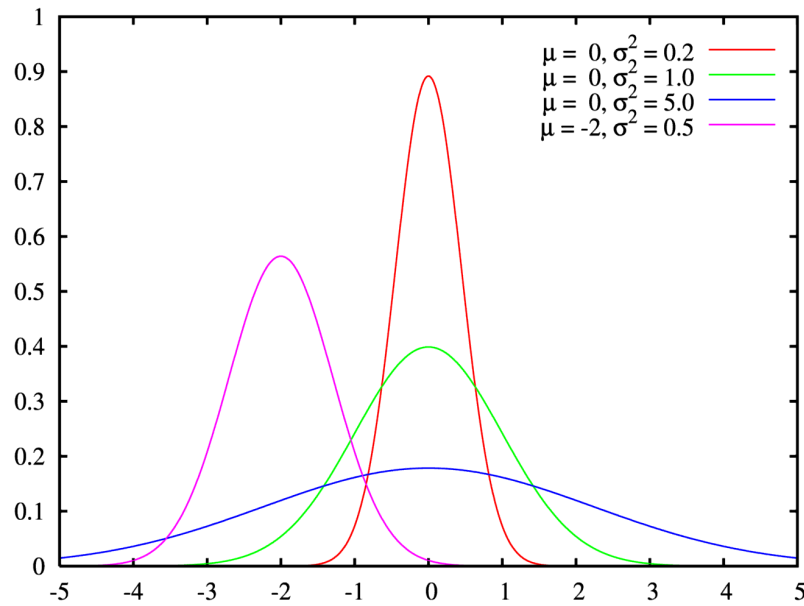


Figura 3-10 Curva Gaussiana

3.3.2 Modelo de correlación de Spearman

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo de correlación de Spearman es un modelo no paramétrico, donde las variables se distribuyen de manera libre. Este modelo estadístico fue presentado por el psicólogo británico Charles Spearman en 1904. El coeficiente de correlación de Spearman, o también conocido como rho de Spearman, trata de cuantificar la correlación existente entre dos variables independientes [62].

A diferencia del ya mencionado coeficiente de Pearson, no tiene en cuenta la relación lineal entre las dos variables, en otras palabras, mide el grado de asociación entre dos cantidades sin importar su linealidad o su orden de magnitud. Por ejemplo, si dos instrumentos de medida miden cantidades distintas de manera sistemática la correlación puede ser ± 1 a pesar de no tener ningún tipo de relación. Es recomendable utilizar este coeficiente de correlación cuando las variables de estudio no estén distribuidas según la normal [63].

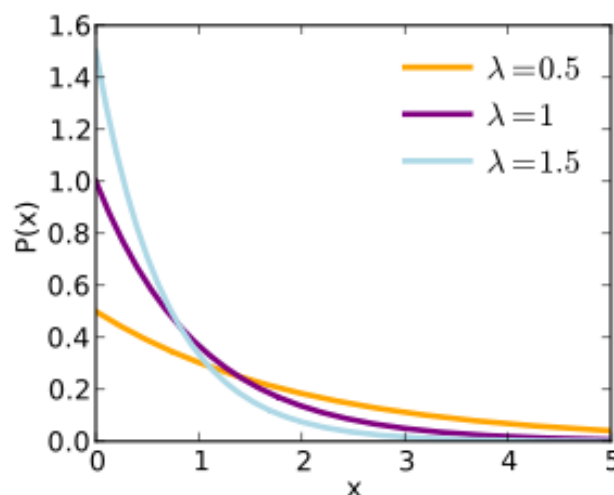


Figura 3-11 Distribución exponencial

Este coeficiente ordena los rangos de las variables para más tarde compararlos. De esta manera, tras analizar a diversos autores, vemos que existen dos métodos para calcular el coeficiente de correlación: la primera de ellas diseñada por el propio Spearman y otra propuesta por Kendall, más compleja. La

expresión matemática empleada en este estudio para el cálculo del coeficiente r_s es la propuesta por Spearman:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n^3 - n}$$

siendo d_i la diferencia entre los rangos de X e Y para cada par de variables. La n representa el número de pares de variables a correlacionar.

Una vez calculado el coeficiente r_s hay que comprobar que cumple con el α establecido, que representa el nivel de confianza a partir del cual se acepta la hipótesis nula (H_0). Existe una tabla que establece el valor mínimo del coeficiente de correlación para un número n de pares de variables y un α determinado. Si el valor calculado es menor que el valor tabulado, se aceptará la hipótesis nula (H_0) a nivel del valor de α . Por ejemplo, si el valor $\alpha = 0,05$ y se cumple que el valor del coeficiente establecido por la tabla es mayor que el valor del coeficiente calculado, entonces se puede afirmar con un 95% de confianza que no existe correlación entre los pares de variables [62].

Por último, se incluye una tabla con la interpretación de la correlación entre las variables en función del valor de los coeficientes de Pearson o Spearman.

Rango de valores de r_{XY} o r_s	Interpretación
$0 \leq r_{XY} < 0,1$	Correlación nula
$0,1 \leq r_{XY} < 0,3$	Correlación débil
$0,3 \leq r_{XY} < 0,5$	Correlación moderada
$0,5 \leq r_{XY} < 1$	Correlación fuerte

Tabla 3-4 Interpretación de la correlación en función del valor del coeficiente de Pearson o Spearman

3.3.3 P-valor

En ese apartado vamos a presentar otro parámetro estadístico que nos servirá para comprobar la fiabilidad de nuestros resultados.

Se define el p-valor como la probabilidad de que nuestra correlación haya sido producto del azar. Para un p-valor de 0,1 significa que con un 10% de probabilidad nuestros resultados de correlación son fruto del azar. El valor límite que se establece normalmente para poder tener en cuenta los resultados de un análisis de correlación es p-valor $\leq 0,05$. Por tanto, todo lo que esté por debajo de este valor es una buena garantía de validez.

3.3.4 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática con aplicación en multitud de campos. A pesar de que debe su nombre al matemático francés Joseph Fourier existen otros científicos de renombre, como Euler, Lagrange o Gauss, que han contribuido a su desarrollo. Básicamente, se define como una transformación matemática para pasar señales expresadas en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

La transformada de Fourier asegura que toda función periódica puede ser expresada como suma trigonométrica de funciones sinusoidales del mismo período. Las funciones sinusoidales, como se puede ver en la Figura 3-12, tienen únicamente una frecuencia. Es la suma de estas funciones, y por consiguiente de sus respectivas frecuencias, la que da lugar a la señal resultante [64]. En nuestro trabajo trataremos de evaluar las distintas frecuencias que componen la señal resultante de radón y estudiar si guardan algún tipo de relación con los fenómenos cíclicos o meteorológicos.

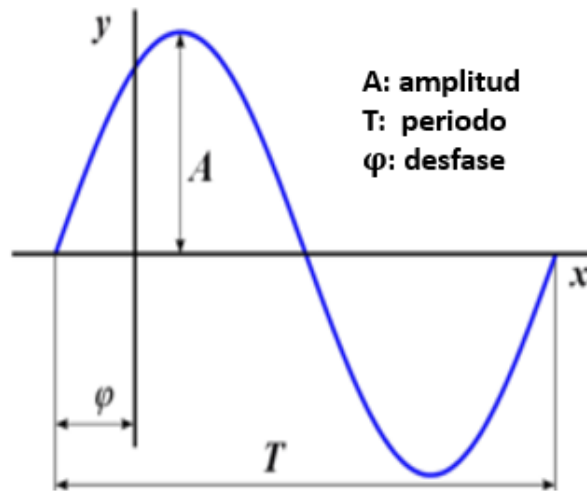


Figura 3-12 Señal sinusoidal (elaboración propia)

La señal sinusoidal se modela según la siguiente ecuación matemática en función del tiempo:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

siendo A la amplitud, ω la velocidad angular, t la variable tiempo y φ el desfase

A continuación, describiremos desde un punto de vista más matemático la transformada.

Conceptos previos

Una función se define como una relación de dependencia entre una variable y otra, de tal manera que a cada valor de la variable independiente le corresponde un único valor de la variable dependiente. En nuestro caso, esta relación de dependencia se puede expresar en función del tiempo, es decir, expresamos la concentración de radón en función del tiempo. La resultante de esto es la señal de radón, que no es más que una función donde a cada valor de tiempo le corresponde un único valor de concentración de radón.

Otro concepto importante a tener en cuenta es el de espectro de frecuencias, que se define como el conjunto de frecuencias que constituyen una única señal. En nuestro caso, trataremos de definir las funciones sinusoidales que componen nuestra señal de radón; en otras palabras, analizar el espectro de frecuencias de nuestra señal de radón.

Poniendo un ejemplo, un tono musical se modela como un sumatorio de tonos puros que a su vez son señales sinusoidales. Las frecuencias de estos armónicos superiores son múltiplos de los armónicos simples. Si modelamos la señal más completa y uniforme, es decir, suponemos que todos los tonos suenan con la misma intensidad y que además todos tienen el mismo período, obtendríamos la siguiente función matemática que define nuestra señal [65]:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{2\pi i n t}$$

Explicación matemática

La transformada de Fourier se define según la siguiente expresión:

$$\hat{f}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i s t} f(t) dt$$

Se puede observar que integrando la frecuencia respecto al tiempo enfrentado a $e^{-2\pi i s t}$, podemos extraer el valor de la función compleja de s , donde $s \in \mathbb{R}$. El espectro periódico de una función es un

conjunto constituido probablemente por muchas frecuencias, pero de carácter discreto. En cambio, la transformada de Fourier de una señal no periódica produce un espectro continuo de frecuencias.

4 RESULTADOS

Una vez sentadas las bases teóricas de las herramientas matemáticas que se han utilizado para llevar a cabo el análisis de correlación y el estudio de frecuencias, se procede a presentar los resultados del estudio. En los siguientes subapartados se muestran las distintas mediciones de radón obtenidas durante el período de observación y sus posibles relaciones con las variables meteorológicas y otros fenómenos cíclicos.

Como norma general, en los gráficos se presenta en el eje de abscisas (eje X) la variable tiempo, en horas, y en el eje de ordenadas (eje Y) la densidad de desintegración de radón, en Bq m^{-3} . También se incluye una leyenda para identificar cada una de las variables.

Antes de comenzar el análisis de las variables de estudio, cabe recordar que la densidad de desintegración depende en gran parte de la geología del terreno y de los materiales de construcción, tal y como se ha expuesto en la bibliografía incluida en el estado del arte. Por este motivo, las diferencias de concentración de radón entre estancias de los distintos edificios se pueden ver afectadas por factores que no son objeto de estudio de este trabajo.

4.1 Influencia de los factores meteorológicos en la densidad de desintegración

A continuación, se presentarán los resultados de nuestro estudio de correlación entre las diferentes variables meteorológicas y las mediciones de concentración en las distintas habitaciones. En esta sección se podrá ver de forma gráfica cómo varía la señal de radón debido a la influencia de las precipitaciones, la humedad, la presión, la temperatura y la velocidad del viento.

Se han desarrollado gráficos tanto de carácter general como de períodos concretos, que muestran alguna particularidad que es relevante mencionar en el estudio. Además, se presentan gráficos de dispersión para cada variable con el objetivo de analizar su comportamiento por separado.

Como ya se ha mencionado en el estado del arte, las variaciones de radón no se pueden atribuir solo a una única variable meteorológica, es decir, que varía por la influencia simultánea de las mismas. Además, la presencia de muchas de ellas lleva consigo la aparición de otras.

4.1.1 Análisis general de las densidades de desintegración

La Figura 4-1 representa las mediciones llevadas a cabo durante el estudio. En el eje de abscisas se representa el número de horas desde el día 22 de diciembre de 2021 a las 1000UTC hasta el día 24 de enero de 2022 a las 1400UTC, por ser el período de medición más largo, correspondiente al despacho 114. En ella se presentan, diferenciadas por colores, las señales de densidad de desintegración de las distintas habitaciones sobre un mismo eje temporal.

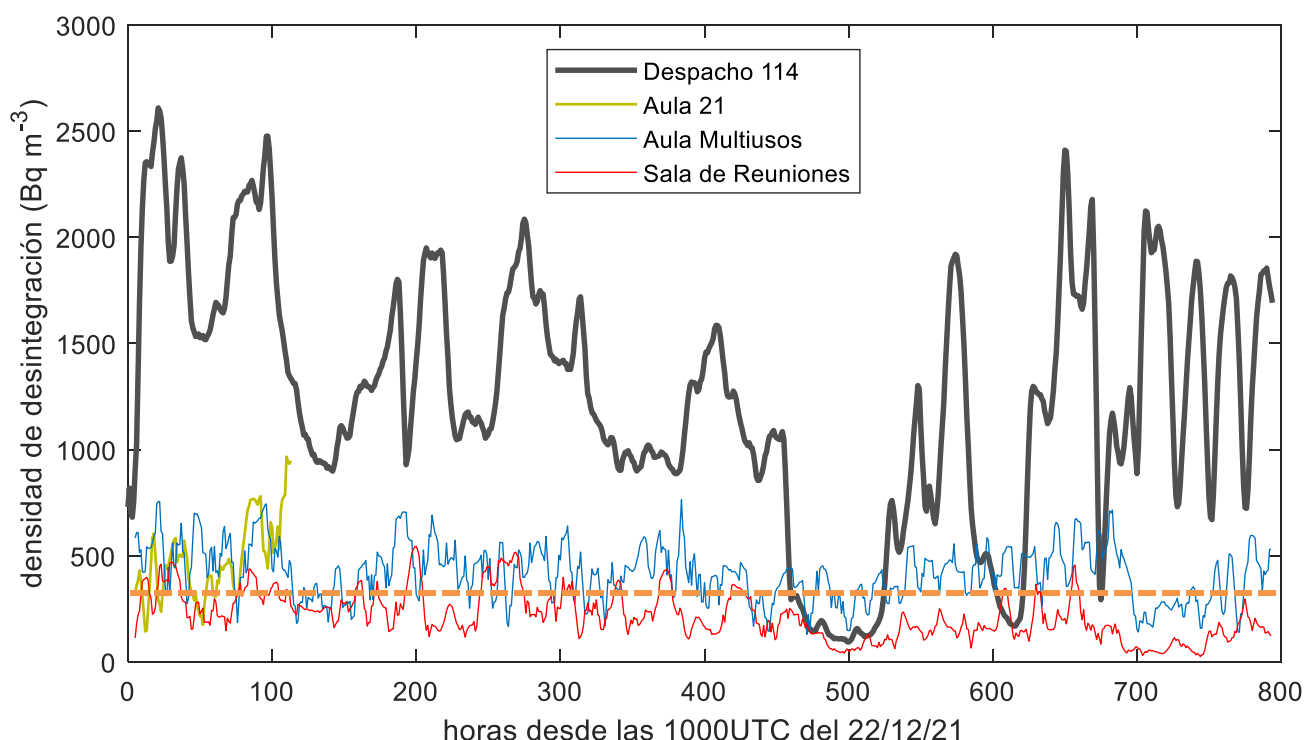


Figura 4-1 Gráfica de la densidad de desintegración de las distintas habitaciones

En la Figura 4-1, se ha establecido una línea en los 300 Bq m^{-3} que marca el límite de concentración permitido por ley, tal y como se describe en el apartado de Normativa perteneciente a la introducción. El umbral marcado por la línea de puntos permite ver de manera rápida que la gran mayoría de mediciones tomadas están por encima de lo permitido, en concreto el 75,4% de las horas registran concentraciones por encima de los 300 Bq m^{-3} . Coincidiendo con las conclusiones extraídas en estudios anteriores, se puede afirmar que los niveles de radón en la Escuela Naval Militar siguen siendo potencialmente peligrosos, pues superan en muchos casos los niveles permitidos, incluso llegando a registrar mediciones 10 veces mayores [8, 21, 54].

Lo primero que cabe destacar es la señal resultante de la medición llevada a cabo en el Aula 21. Como ya se ha mencionado anteriormente, el aula donde se ubica el simulador de navegación sufrió una reforma desde finales del mes de diciembre hasta principios del mes de enero que provocó modificaciones en las condiciones de medición. La entrada y salida de operarios derivó en la ventilación de la habitación causada por los movimientos de masas de aire provenientes del exterior. Como ya se ha visto, este fenómeno modifica la concentración de radón, ya que disminuye la cantidad existente del gas por m^3 de aire puro.

Por otra parte, las continuas caídas del suministro eléctrico realizadas de manera intencionada para trabajar en los cuadros, supusieron el apagado en más de una ocasión de nuestro dispositivo, perdiendo buena parte del registro de datos e imposibilitando la asignación temporal de los mismos.

Por todo esto, para el Aula 21 se decidió establecer dos períodos cortos, donde las mediciones parecen no estar afectadas por efectos externos. La primera de ellas se establece desde el 22 de diciembre de 2021 a las 1400UTC hasta el día 26 de diciembre de 2021 a las 2359UTC. El segundo período de medición se extiende desde el 26 de enero de 2022 a las 1030UTC hasta el 3 de febrero de 2022 a las 1230UTC, por lo tanto no está incluido en la Figura 4-1, pero las correspondientes gráficas de densidad de desintegración respecto a las variables meteorológicas se presentarán a posteriori.

Para proceder con el análisis general de la gráfica presentada en la Figura 4-1 se ha decidido normalizar cada una de las señales de desintegración. El proceso de normalización es una herramienta matemática que genera como resultado una señal más suavizada. Esto implica que aquellos datos que se

han visto influenciados por hechos puntuales, como por ejemplo puede ser abrir una puerta, no tengan tanta repercusión en el gráfico.

El proceso explicado anteriormente se ha llevado a cabo en dos etapas. Primero se ha utilizado una media móvil con una ventana temporal de 20 mediciones, con el objetivo de eliminar ruidos y mejorar la capacidad de interpretación de la señal. Más tarde, se han normalizado los datos de concentración de radón de cada habitación poniéndose en función del valor máximo y mínimo de cada serie. De tal manera que la imagen de cada dato se expresa como:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Las series normalizadas toman valores entre 0, el valor mínimo, y 1, el valor máximo. La nueva gráfica, mostrada en la Figura 4-2, mantiene la tendencia con las mediciones de una misma habitación, pero no se pueden comparar entre ellas. Esta gráfica complementa a la expuesta en la Figura 4-1 y facilita la interpretación de resultados.

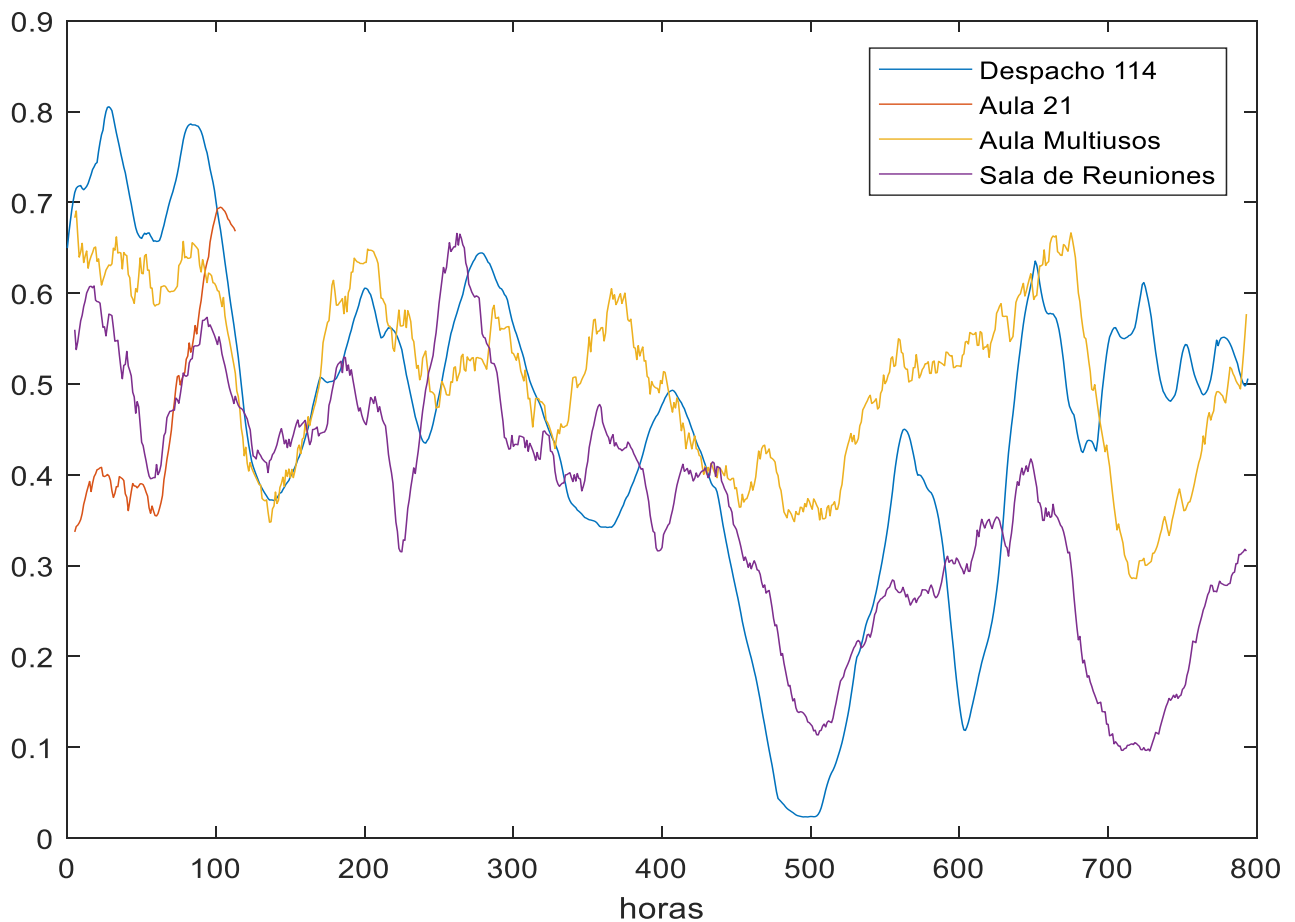


Figura 4-2 Comparativa de las señales de radón normalizadas tras aplicar la media móvil

Se puede observar en las gráficas del Aula Multiusos (azul) y de la Sala de Reuniones (rojo) un patrón bastante similar, y diferente del obtenido para el despacho 114, pues ambas están en el edificio de investigación del CUD (Figura 3-1). Por este motivo, no es de extrañar que su señal de radón se vea influenciada por las mismas variables. Se puede apreciar que el nivel de concentración medio presentado en el Aula Multiusos ($532,56 \text{ Bq m}^{-3}$) es mayor al medido en la Sala de Reuniones ($260,94 \text{ Bq m}^{-3}$). Esto puede deberse, en parte, a la situación respecto al mar, pues ya se ha mencionado anteriormente que el asiento del citado edificio es terreno ganado al mar. Otro factor que puede intervenir en la diferencia de concentraciones entre uno y otro es la porosidad del suelo. Al haber sido generado de manera artificial, el reparto y la composición pueden no ser homogéneos en derivados del uranio y que, por tanto, en unas

zonas los movimientos característicos del radón, como la exhalación, se produzcan con una mayor facilidad en una que en otra. Además, la situación en el interior del edificio es distinta. La Sala de Reuniones está en el interior, rodeada por otras habitaciones y sin ventanas. Por el contrario, la sala multiusos se encuentra pegada al mar y cuenta con ventanas. Se añaden en el Anexo III imágenes de ambas habitaciones y se destaca una grieta en el Aula Multiusos que puede influir en la medición por permitir la entrada de aire.

Por último, tal y como se observa en la Figura 4-2, los niveles de concentración de radón en el despacho 114 del edificio del CUD presentan un nivel medio más elevado de densidad de desintegración, llegando a los 1244,93 Bq m⁻³. Se pueden apreciar oscilaciones repentinas de máximos a mínimos, que más tarde se estudiará si tienen correlación con variaciones de alguno de los fenómenos geofísicos. Si se observa el intervalo de tiempo entre las horas 450 y 525, que coincide con la vuelta de las vacaciones de Navidad en los días 9, 10 y 11 de enero, se percibe una bajada repentina y prolongada de la concentración de radón. Con mucha probabilidad, se deba a un aumento de la ventilación del aula durante algunos días, que como ya se ha visto, ayuda a regular los niveles de concentración de radón, haciendo que disminuyan.

4.1.2 Análisis de las densidades de desintegración por habitaciones

A continuación, se irán discutiendo las densidades de concentración medidas en cada habitación y su posible correlación con los fenómenos meteorológicos, concretamente con las variables de precipitaciones, humedad relativa, presión, velocidad del viento, temperatura exterior y diferencia de temperaturas. Se incluirán gráficas de las señales normalizadas de concentración de radón frente a las mediciones de las variables meteorológicas. Además, se ha realizado un gráfico de dispersión, incluyendo la línea de tendencia, de cada una de las variables meteorológicas frente a la densidad de desintegración de cada aula.

Cabe desatacar que las variables velocidad del viento y humedad relativa no se presentarán en las gráficas por razones de claridad. Sus oscilaciones están ligadas con las variaciones de presión y precipitaciones. El análisis de las citadas variables se realizará a partir de sus respectivos gráficos de dispersión.

Aula Multiusos

A continuación, se realizará el análisis de las mediciones del Aula Multiusos, ubicada en el edificio de investigación del CUD (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6).

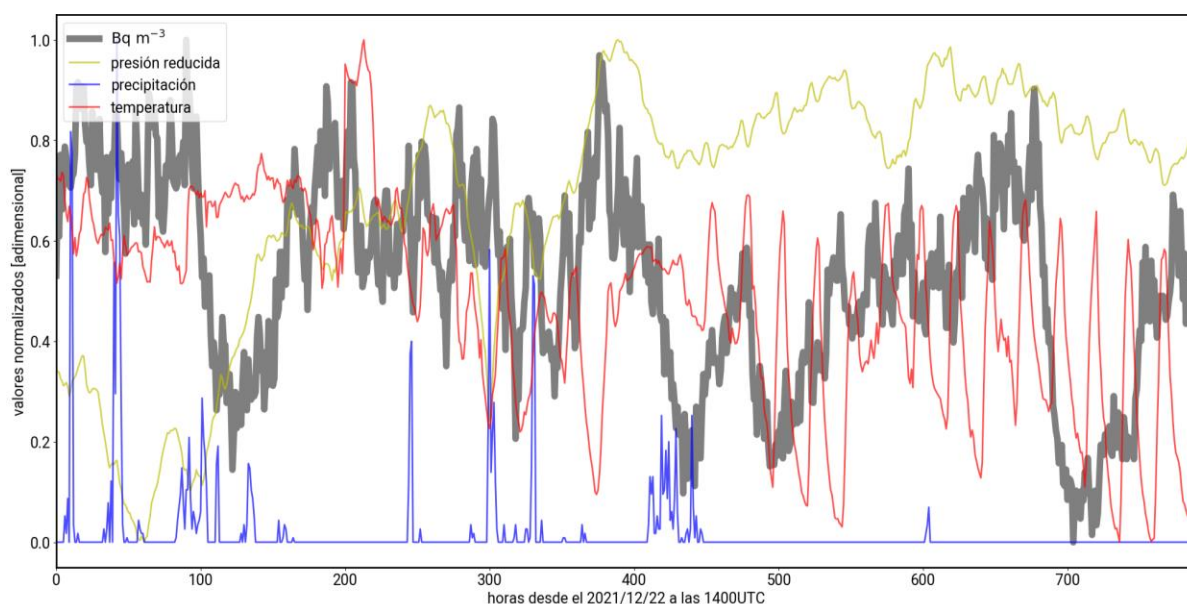


Figura 4-3 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Aula Multiusos

Respecto a la variable de precipitaciones se puede observar, como norma general, que tras un incremento de las mismas se produce a posteriori una disminución en la señal de radón, como se puede observar alrededor de la hora 250. Como ya se ha visto en la bibliografía descrita en el estado del arte, las precipitaciones suponen un incremento de la humedad y, por tanto, la distancia entre poros del terreno se reduce, lo que dificulta la exhalación de radón [35]. En el intervalo de tiempo definido entre la hora 250 y 300, se observa que los máximos relativos de las precipitaciones suponen mínimos relativos en la señal de radón. Cabe mencionar que el efecto que generan las precipitaciones no es inmediato y que la intensidad de las mismas se relaciona directamente con el tiempo que tarda el terreno en cambiar su composición y, por consiguiente, la distancia entre poros.

Por otra parte, también se ha estudiado a raíz de diversos autores, que las precipitaciones pueden influir de manera proporcional en la concentración de radón, generando diferencias de presión entre el interior y el exterior, que resulten en flujos de gas hacia el interior. Este fenómeno puede ser el causante de que el pico de precipitaciones acontecido alrededor de la hora 300 lleve consigo un pico en la concentración de radón [37]. Analizando la línea de tendencia incluida en el gráfico de dispersión de la variable (Figura 4-6), se observa una ligera correlación positiva con la concentración.

En cuanto a la variable de presión, se sabe que las precipitaciones están normalmente relacionadas con períodos de baja presión atmosférica (borrascas) mientras que las altas presiones suelen traer consigo períodos de estabilidad atmosférica. A raíz de las conclusiones de la bibliografía y habiendo analizado la variable de precipitaciones, cabría esperar que la presión sea inversamente proporcional a la concentración de radón.

Los máximos relativos de concentración coinciden, mayoritariamente, con mínimos relativos de presión. Esto se puede ver en el intervalo de la hora 600 a la 700. Se puede observar en la gráfica antes de llegar a la hora 400, que el máximo absoluto de concentración coincide aproximadamente con su homólogo de presión. Esto, que puede parecer contrario a todo lo explicado, se podría ver justificado por el primer descenso brusco de temperaturas que acontece en ese momento. Viendo el eje del tiempo se percibe que, en ningún momento anterior al descrito se alcanzan temperaturas exteriores tan bajas ni se producen oscilaciones tan pronunciadas.

Analizando el gráfico de dispersión de la variable de presión, incluido en la Figura 4-6, se puede observar que la pendiente de la línea de tendencia es negativa, coincidiendo con lo expuesto en la bibliografía. Además, las concentraciones más bajas de radón se dan cuando la presión es elevada, es

decir, para concentraciones entre 200 Bq m^{-3} y 300 Bq m^{-3} , la presión se mantiene por encima de los 1025 Pascales. Esto quiere decir que la presurización de compartimentos o habitaciones sí es, en principio, una medida eficaz necesaria para mantener los niveles de radón controlados. En caso de no poder controlar la presión interior nunca se podrá mantener la concentración de radón por debajo de los límites.

Respecto a la variable de temperatura se ha decidido hacer una separación a la hora de analizar su influencia en la concentración de radón. Por una parte, se observará la variación de la señal de radón en función de la temperatura exterior (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por otra parte, tal y como se expone en la bibliografía, una de las principales causantes de los flujos de radón es la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior, por ello se ha decidido analizar de manera específica esta variable presentando su propia gráfica (Figura 4-4).

En cuanto a la temperatura exterior presentada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar que, de manera general, los mínimos relativos en la variable se corresponden con máximos relativos en la concentración de radón, como se puede observar, entre otros, en el intervalo comprendido entre la hora 300 y la 425. Respecto a la gráfica de dispersión (Figura 4-6), destaca la ligera correlación positiva que se puede apreciar en la pendiente de su línea de tendencia [30, 35]. Además, se observa que las temperaturas superiores a 20°C llevan consigo concentraciones elevadas. Cabe recordar que en la bibliografía expuesta se observan efectos contrarios en la concentración de radón respecto a la variable de temperatura exterior.

En la Figura 4-4 se presenta la variable de diferencia de temperaturas, frente a la señal de concentración. Analizando ambas variables se puede observar que en los períodos donde se producen máximos relativos en la diferencia de temperatura se suelen dar máximos relativos en la concentración de radón, tal y como se puede comprobar en el intervalo entre la hora 170 y la 270 donde se presentan patrones de comportamiento muy semejantes. Esto puede tener su explicación en la diferencia de presiones que se genera y, por tanto, en el flujo de radón entrante que se deriva, con el objetivo de compensar la depresión [40, 46]. De forma general se observa que no siempre las reacciones en la concentración de radón ante las oscilaciones de la diferencia de temperatura se producen de manera instantánea, como se puede ver alrededor de la hora 450.

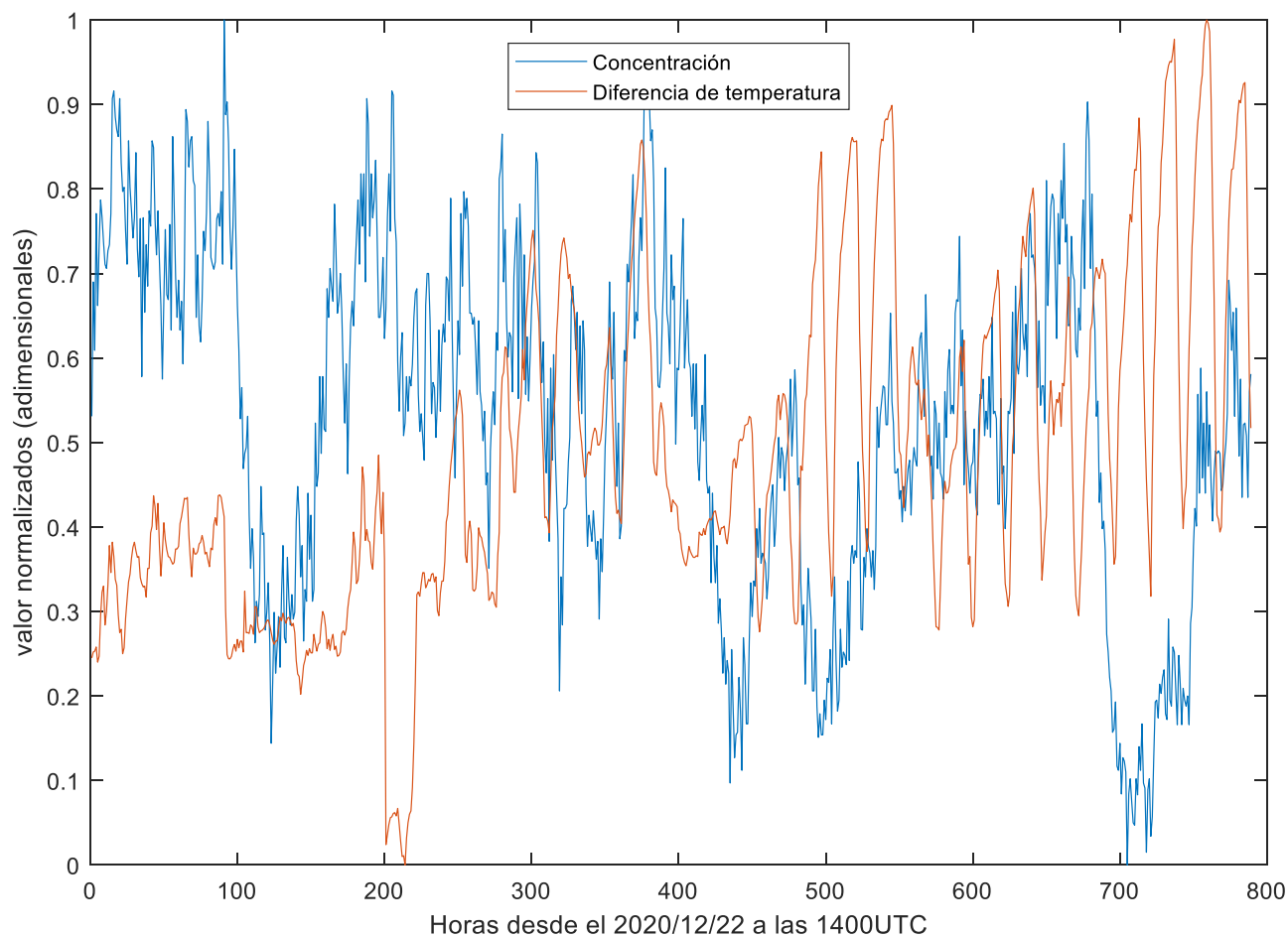


Figura 4-4 Concentración de radón frente a la diferencia de temperatura en el Aula Multiusos

Por otra parte, si analizamos la gráfica de dispersión de la diferencia de temperatura incluida en la Figura 4-5, vemos que presenta una línea de tendencia con pendiente negativa. Esto quiere decir que se correlaciona de manera negativa con la concentración de radón. Además, se observa que cuando la temperatura exterior es mayor que la interior, es decir, cuando la diferencia de temperatura es negativa no se producen concentraciones bajas de radón.

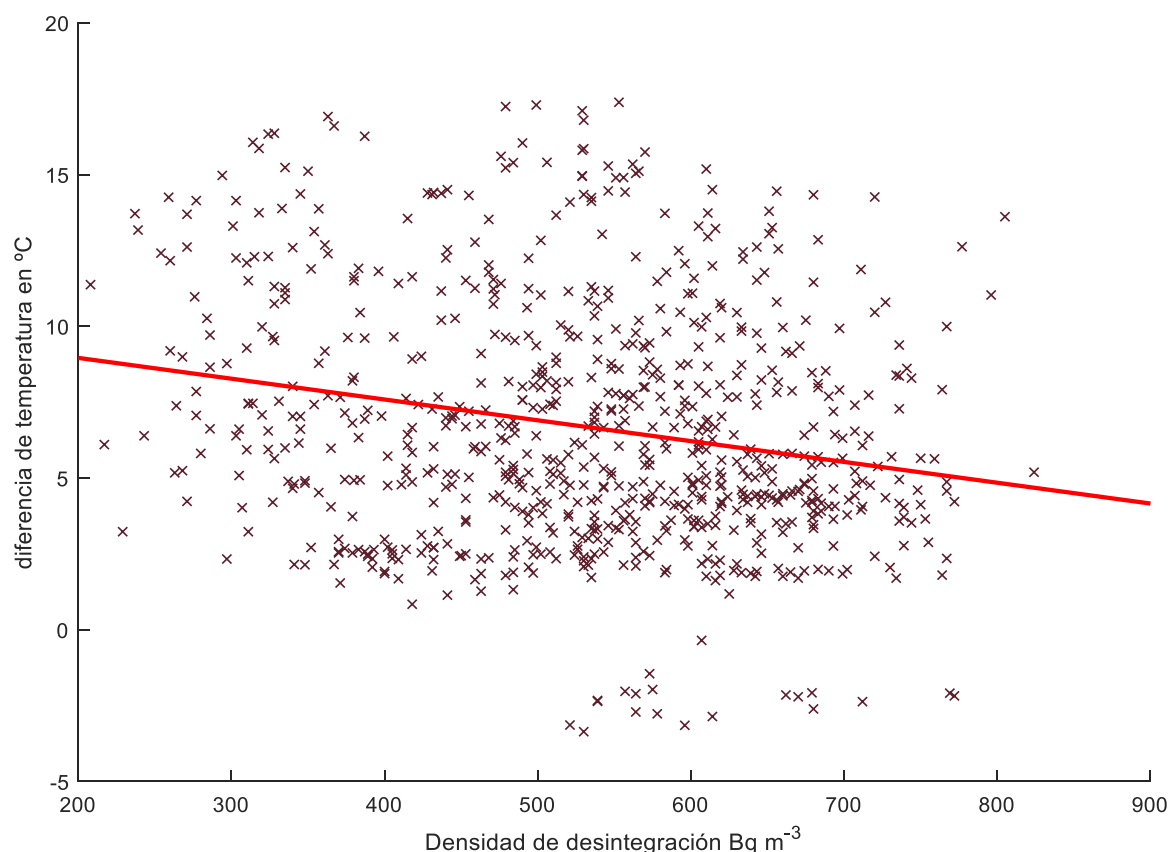


Figura 4-5 Gráfico de dispersión de la diferencia de temperatura en el Aula Multiusos

En cuanto a la gráfica de dispersión de la velocidad del viento a 10 metros frente a la densidad de desintegración, se puede ver en primer lugar, fijándonos en la pendiente de la línea de tendencia, una ligera correlación positiva. Esto, en parte, coincide con la bibliografía expuesta en el estado del arte, ya que la variable velocidad del viento puede producir dos efectos contrarios en la concentración de radón [30, 35]. Si la intensidad del viento es muy elevada, podría llegar a provocar una disminución en la concentración, mediante la introducción de aire limpio en el interior de la habitación. Por el contrario, para intensidades de viento bajas o moderadas, el efecto producido será un gradiente de presión que acabará derivando en un flujo entrante de radón.

Se puede ver en la Figura 4-6 que para las intensidades más altas de viento ($> 20 \text{ m s}^{-1}$) existen más registros de mediciones de concentración de perfil bajo que de perfil alto. El caso contrario se puede observar con intensidades medias de viento, entre 15 m s^{-1} y 20 m s^{-1} , ya que existe un mayor número de mediciones de concentración de perfil alto que de perfil bajo.

Por su parte, la variable de humedad relativa presenta una clara correlación positiva con la densidad de desintegración (Figura 4-6). La humedad provoca una disminución en la permeabilidad del terreno, lo que acaba produciendo un mayor flujo de radón focalizado en aquellas zonas más secas, como pueden ser los asentamientos de edificios [37].

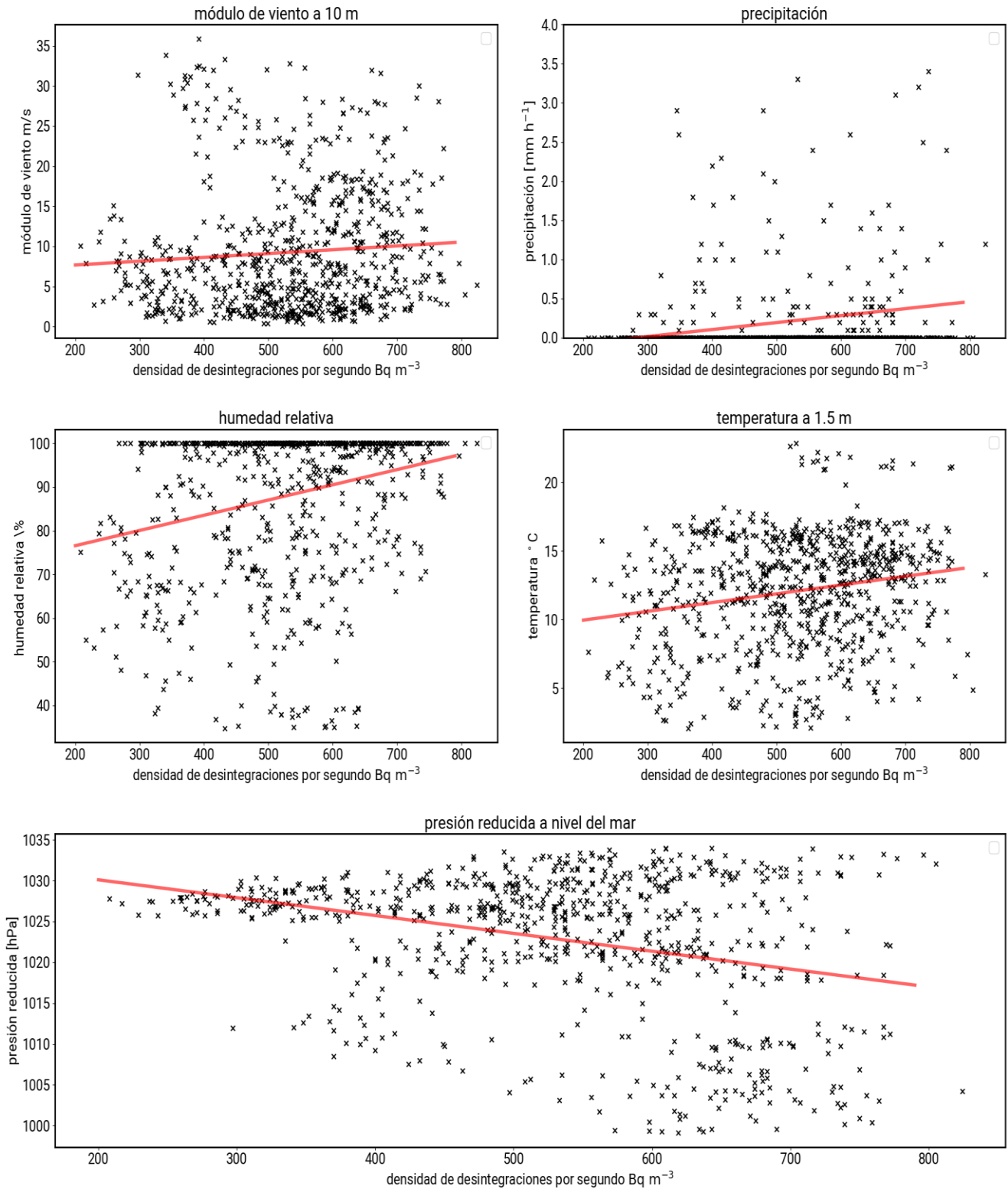


Figura 4-6 Gráficos de dispersión en el Aula Multiusos

Sala de Reuniones

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a la Sala de Reuniones (Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10). Como se vio en la Figura 4-2, la señal de radón es muy similar a la obtenida en el Aula Multiusos por su proximidad.

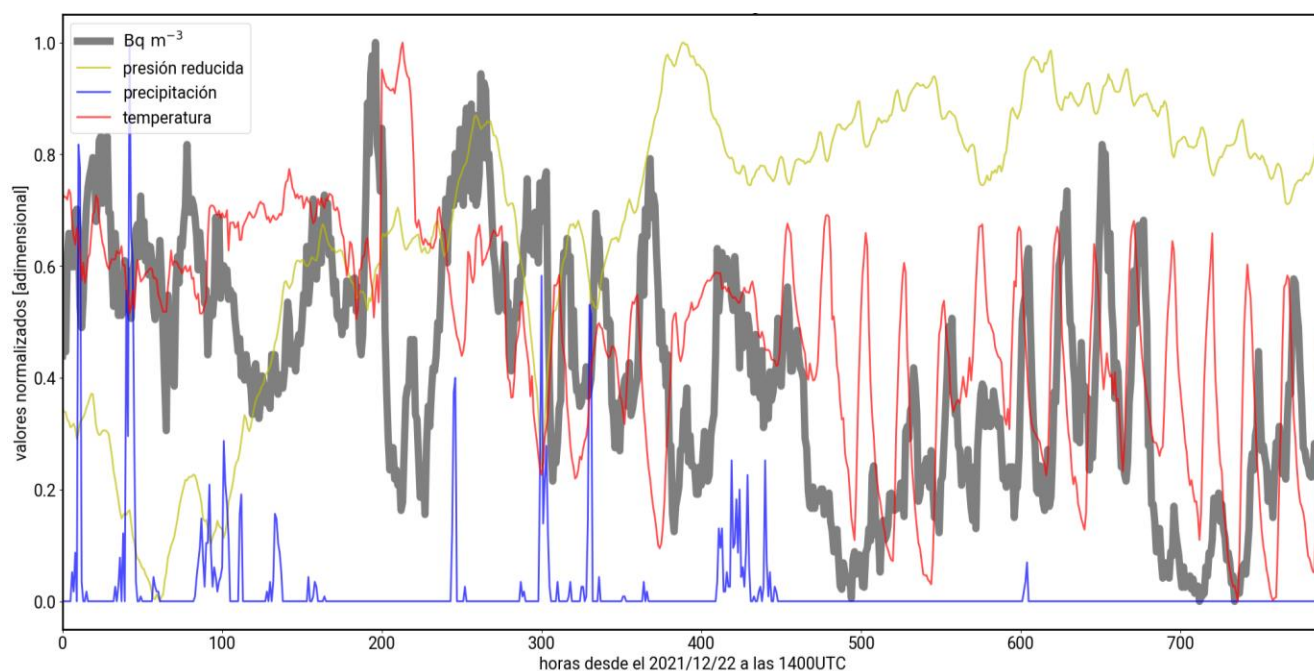


Figura 4-7 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en la Sala de Reuniones

Haciendo un comparativo general entre las tendencias descritas en las señales de radón de la Sala de Reuniones y del Aula Multiusos, analizada anteriormente, se observa que, en el caso de la Sala de Reuniones las oscilaciones son más pronunciadas, pero con menos frecuencia. Además, el registro de medición más bajo de ambas habitaciones se da en el mismo intervalo de tiempo, alrededor de la hora 700. Sin embargo, este hecho motiva la existencia de otros efectos, ya que en la Sala de Reuniones se da un valor parecido poco antes de la hora 500, que dista mucho del valor que se da a la misma hora en el Aula Multiusos.

La variable de precipitaciones es similar a la ya analizada en el Aula Multiusos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El gráfico de dispersión presenta una línea de tendencia que da idea de una ligera correlación positiva, tal y como se vio en el caso anterior. En este caso, el máximo relativo de precipitaciones acontecido alrededor de la hora 300 coincide en el tiempo con un máximo relativo en la concentración de radón que poco tiempo después sufre un descenso brusco. Esto nos puede dar idea del tiempo que necesita el terreno para cambiar sus propiedades con respecto a la permeabilidad y, por consiguiente, ser un factor determinante en la exhalación de radón. Además, si observamos alrededor de la hora 50 vemos que el máximo relativo de precipitaciones se produce poco antes de un máximo relativo de concentración, confirmando ese tiempo de reacción del sustrato.

Observando el comportamiento de la variable presión reducida en la Figura 4-7 se observa que, tal y como se ha mencionado en el caso anterior, como norma general, las precipitaciones se dan en períodos de descenso de presiones. Esto se puede ver en el intervalo entre las horas 500 y 750 donde los máximos relativos de presión coinciden con los mínimos relativos de densidad de desintegración. En el caso de la Sala de Reuniones a diferencia del Aula Multiusos, el máximo absoluto de presión registrado alrededor de la hora 380, coincide con un mínimo relativo de concentración. Además, se ve de forma clara (Figura 4-10) que en este caso tampoco se registraron concentraciones bajas en períodos de altas presiones.

Respecto a la variable de temperatura exterior, llama la atención que, tanto en el Aula Multiusos como en la Sala de Reuniones, alrededor de la hora 200, el patrón de oscilación dibujado por la señal de radón es el inverso al trazado por la señal de temperatura exterior. Sin embargo, analizando los módulos de concentración en la Figura 4-1, se observa que los registros obtenidos en la Sala de Reuniones son mucho menores a los obtenidos en el Aula Multiusos. En cuanto a la gráfica de dispersión se puede afirmar que las temperaturas exteriores más frías no llevan consigo altas concentraciones de radón, esto se puede ver reflejado en el ciclo diurno que se expone más adelante.

Respecto a la variación de la concentración debida a la diferencia de temperatura, tal y como se explicó en el caso anterior, de forma general se observa que los extremos relativos de una y otro coinciden. La influencia del resto de variables se puede ver en los extremos absolutos, pues no se corresponden con su homólogo de la otra variable. Como ya se ha indicado anteriormente, en la Figura 4-7, se puede observar que a partir de la hora 500 hay una relación directa con la concentración de radón, siendo la variable que más influye en las oscilaciones. De la misma manera, el período entre la hora 500 y la 700 de la Figura 4-8, se puede ver como la variable diferencia de temperatura provoca el mismo efecto.

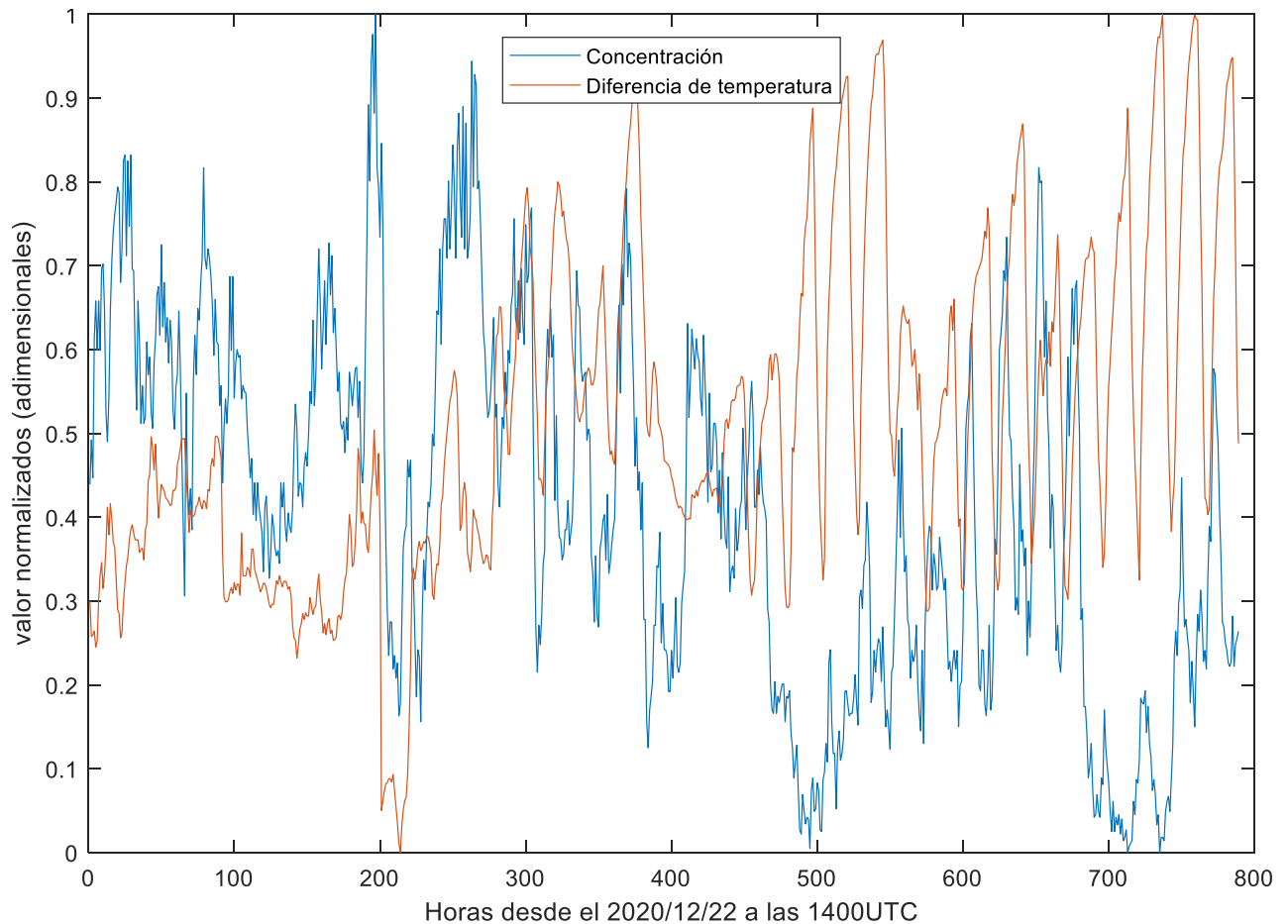


Figura 4-8 Concentración de radón frente a la diferencia de temperatura en la Sala de Reuniones

En la Figura 4-9, se observa de nuevo la correlación negativa que presenta el gráfico de dispersión de la diferencia de temperatura respecto a la concentración. En este caso, diferencias de temperatura negativas dan valores de concentración bajos.

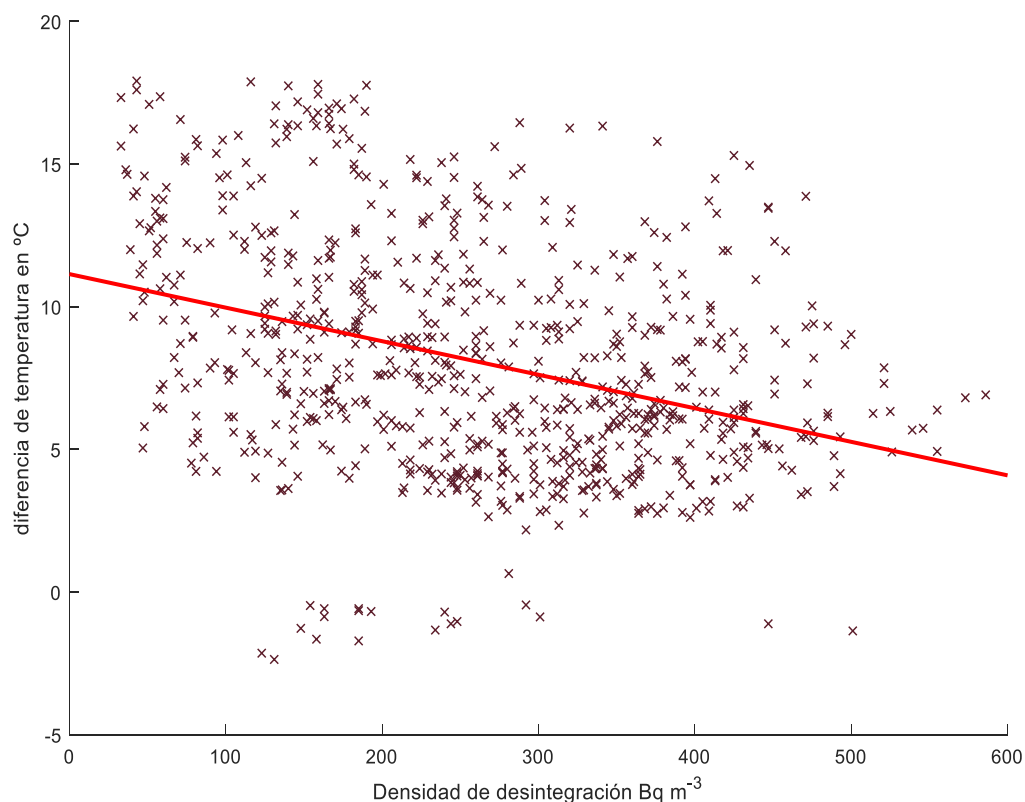


Figura 4-9 Gráficos de dispersión de la diferencia de temperatura en la Sala de Reuniones

Observando la gráfica de dispersión de la variable viento a 10 metros se puede apreciar que la línea de tendencia tiene pendiente positiva por lo que presenta ligera correlación con la densidad de desintegración. Por otra parte, la línea de tendencia de la Sala de Reuniones presenta mayor pendiente que la del Aula Multiusos. Esto puede deberse al efecto inverso del viento, ya que cómo se muestra en el Anexo III, la Sala de Reuniones a diferencia del Aula Multiusos no cuenta con ventanas, por lo que las altas velocidades de viento pueden generar filtraciones por la grieta o juntas y provocar una disminución de la concentración [30].

Por su parte, la humedad describe una recta de regresión con clara una correlación positiva presentando una dispersión bastante parecida a la registrada en el Aula Multiusos (Figura 4-10).

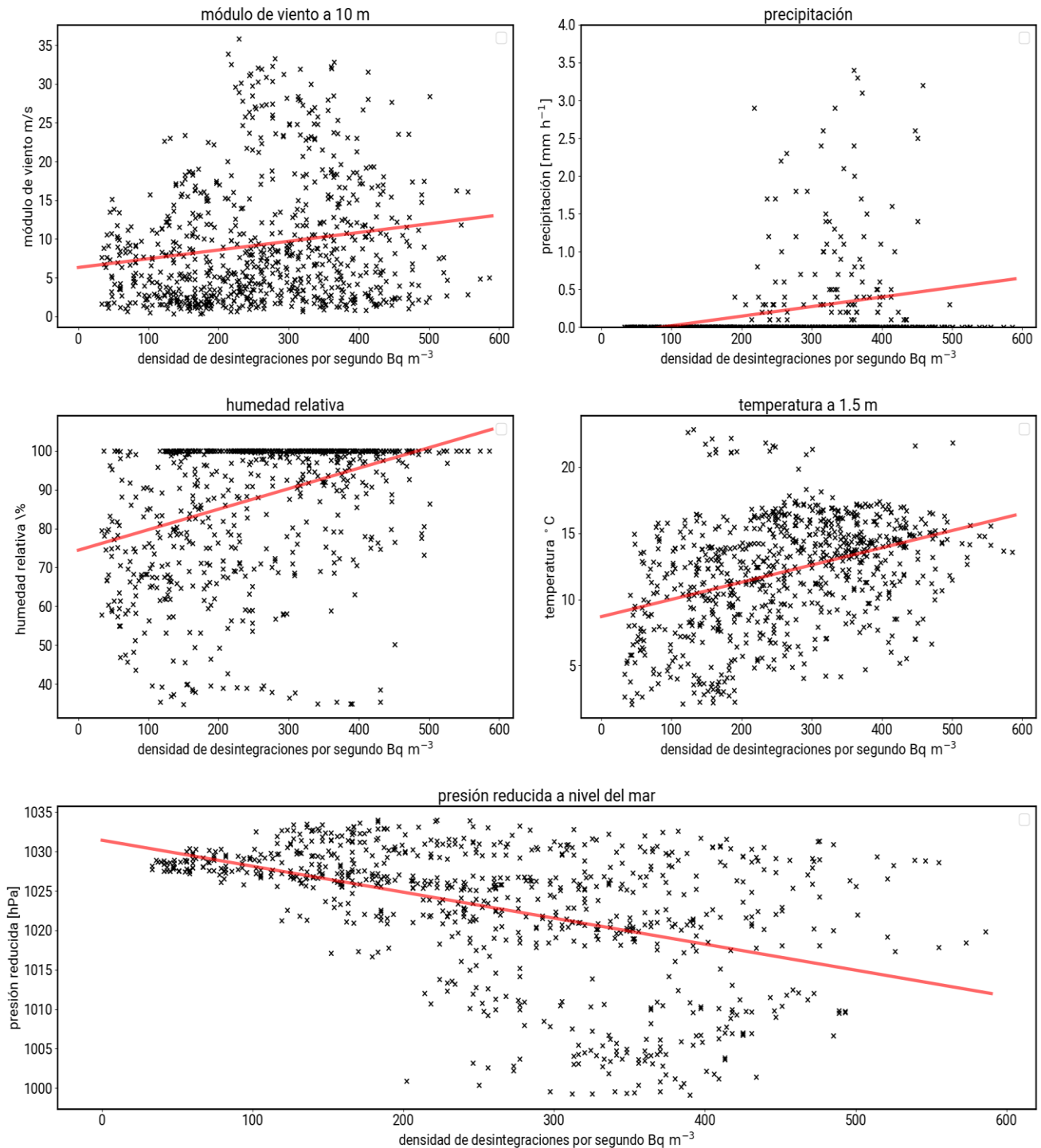


Figura 4-10 Gráficos de dispersión en el Sala de Reuniones

Despacho 114

Tras presentar las habitaciones ubicadas en el edificio de investigación del CUD, se procederá con el análisis de las gráficas obtenidas del despacho 114, donde se han registrado los valores más altos de concentración, coincidiendo con la tendencia de años anteriores (Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14).

El despacho 114 es la habitación que presenta los valores más extremos, es decir, la diferencia entre su medición máxima y mínima es la más elevada. Si se observa la gráfica de la Figura 4-2, lo primero que llama la atención es que el despacho 114 presenta un máximo relativo en el instante donde se registran los mínimos absolutos de las otras dos habitaciones, alrededor de la hora 700. Además,

alrededor de la hora 200 se produce una disminución repentina en el nivel de concentración que no se da en ninguna de las dos habitaciones descritas anteriormente (ver valor absoluto en Figura 4-1). Esto puede estar originado por la influencia de otros factores distintos a los meteorológicos que se estudiarán a continuación. Por otra parte, el intervalo de medición desde la hora 450 hasta la hora 520 es atípicamente bajo qué, cómo ya se ha indicado anteriormente, puede estar relacionado con el encendido de la ventilación en la habitación entre los días 9 y 11 de enero.

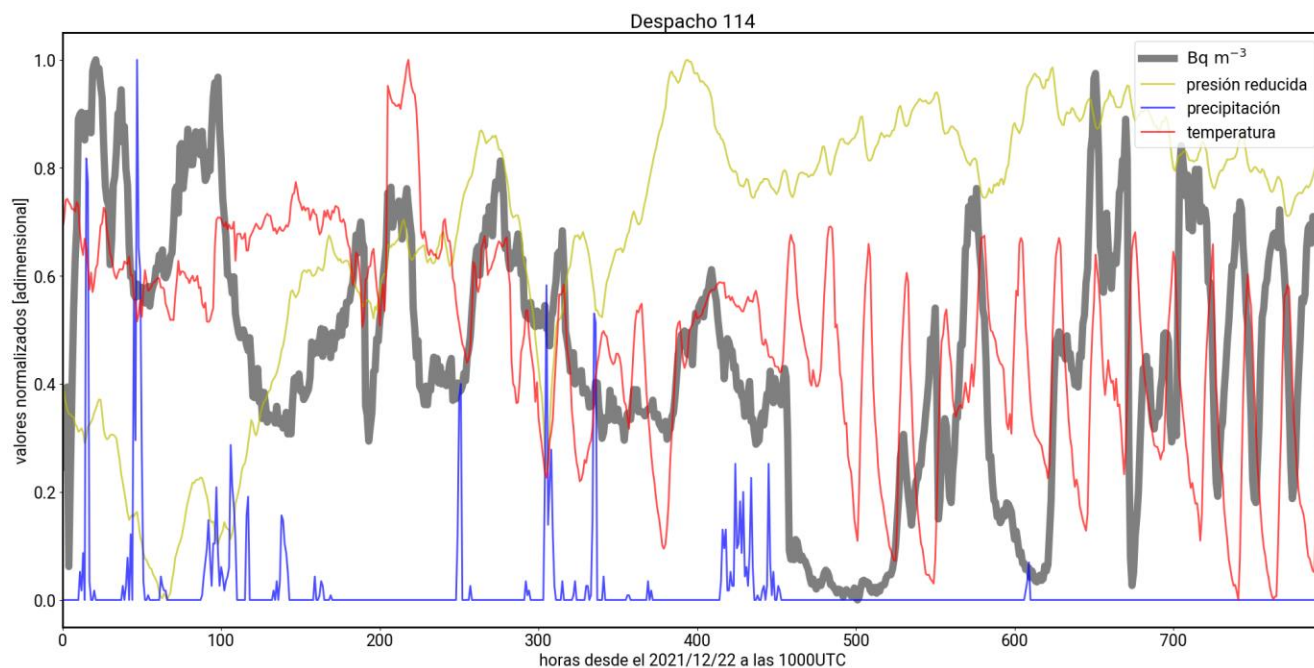


Figura 4-11 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el despacho 114

En cuanto a la variable de precipitaciones, en este caso se puede observar que en el intervalo de las 400 primeras horas los máximos relativos de precipitaciones no se corresponden tan claramente con los máximos relativos de concentración. Esto puede deberse al tipo de suelo que rodea al despacho 114, pudiendo ser menos permeable. Sin embargo, como se puede comprobar en la Figura 4-11 pasada la hora 400, los máximos relativos en las precipitaciones coinciden otra vez con máximos relativos de concentración. Por este último motivo la línea de tendencia muestra una leve correlación positiva.

Pasando a discutir la influencia de la variable de presión en el despacho 114, vemos que los períodos en los que se dan descensos de presión se corresponden con máximos relativos en la concentración, tal y como se venía dando en los casos anteriores. En el gráfico de dispersión incluido en la Figura 4-14, se puede apreciar como de nuevo para registros bajos de concentración se dan siempre valores altos de presión. Respecto a la línea de regresión, se observa que coincide con los casos ya analizados, presentando una clara correlación negativa.

En este caso, a diferencia de los anteriores, en el intervalo de tiempo entre las horas 200 y 250, la señal de radón sigue el patrón que describe la temperatura exterior en ese momento. Con lo que respecta al diagrama de dispersión de esta variable, se puede observar que para temperaturas exteriores que superen los 20°C no se dan concentraciones menores a 1000 Bq m³.

Respecto a la variable de diferencia de temperatura, vemos en la Figura 4-12 que los registros de ambas variables confirman, como norma general, lo expuesto en análisis anteriores, coincidiendo sus extremos relativos. Sin embargo, en el diagrama de dispersión de la Figura 4-13, a diferencia de los anteriores, se observa que la recta presenta una pendiente de es positiva. Para los valores más bajos de temperatura la concentración es aproximadamente 1000 Bq m³.

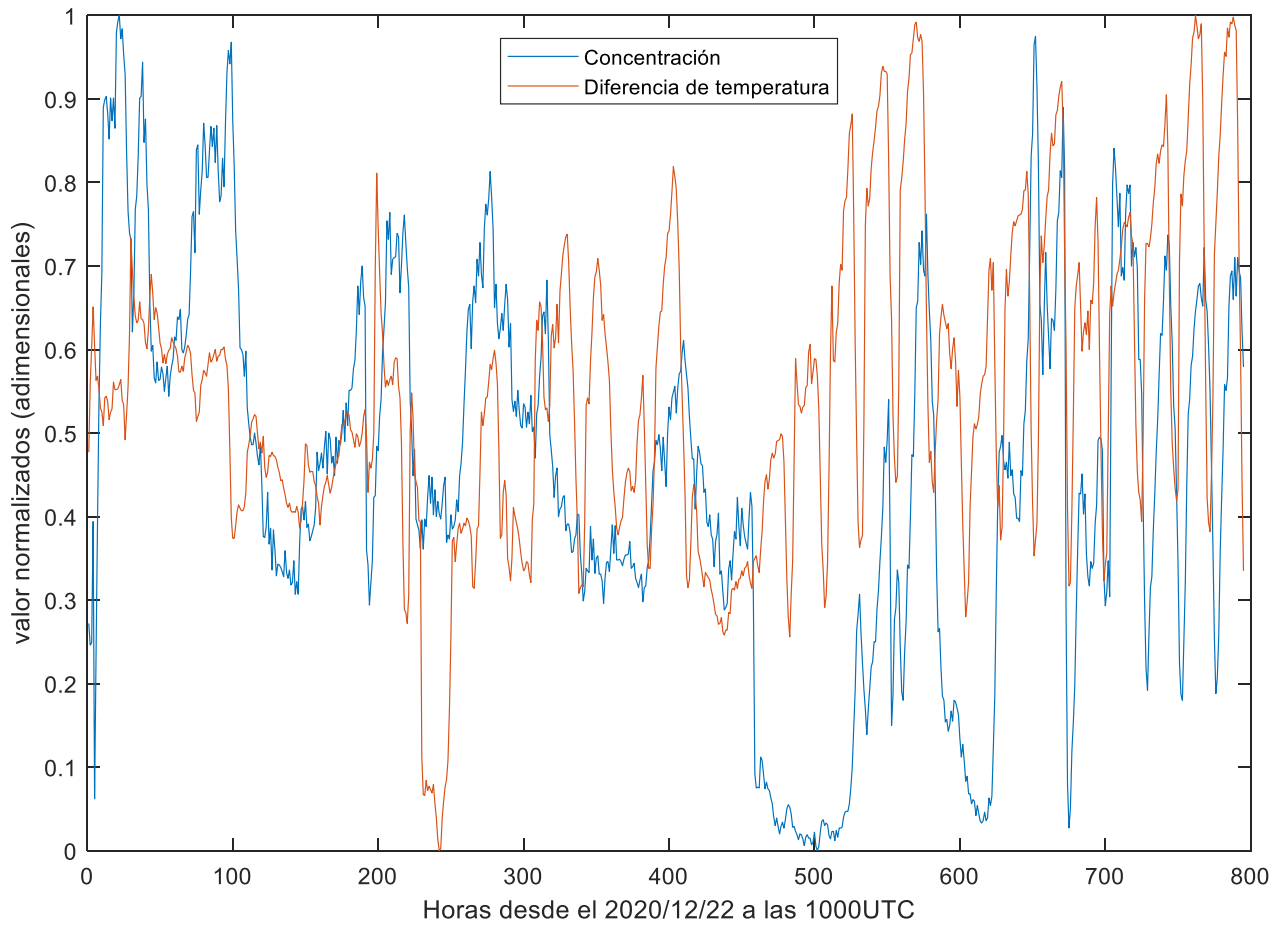


Figura 4-12 Concentración de radón frente a la diferencia de temperatura en el despacho 114

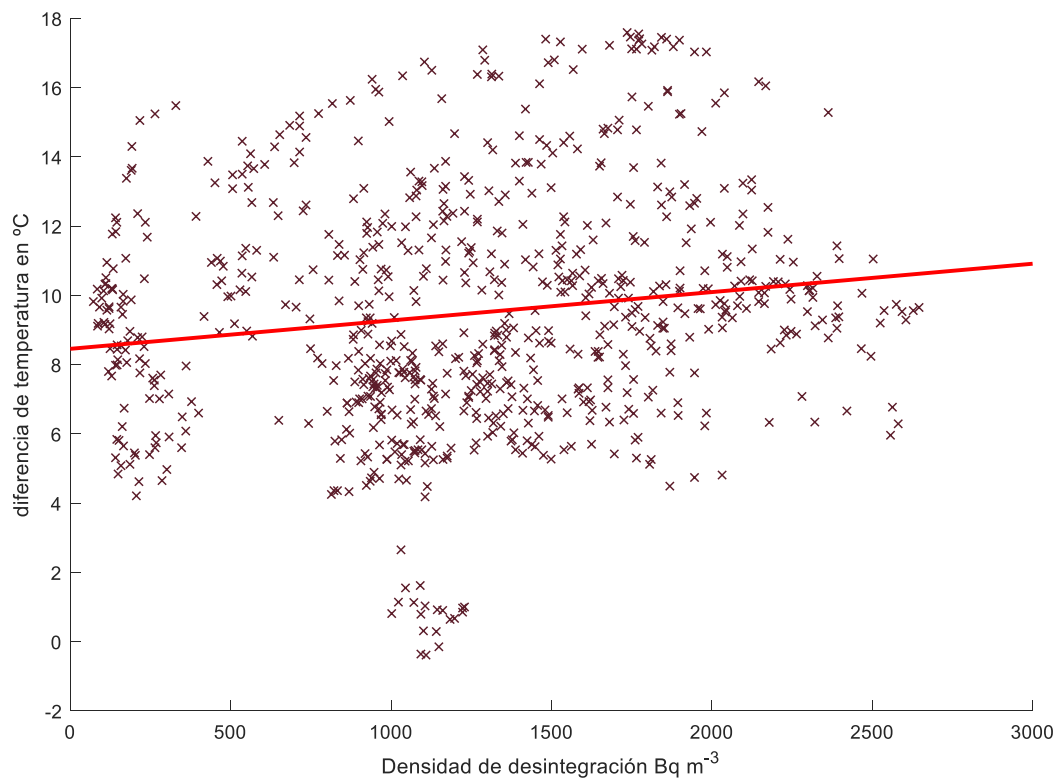


Figura 4-13 Gráficos de dispersión de la diferencia de temperatura en el despacho 114

Como ya se ha dicho anteriormente, la humedad está estrechamente ligada con las precipitaciones. De la gráfica de dispersión se puede apreciar que, para valores bajos de humedad, inferiores al 60%, se dan valores medios de concentración, es decir, no se dan valores por debajo de 500 Bq m⁻³ ni por encima de 2000 Bq m⁻³.

La variable viento presenta en la gráfica de dispersión (Figura 4 11) una correlación ligeramente positiva, indicada por su línea de tendencia. Se observa que para valores altos de viento no se dan concentraciones bajas de radón., esto que aparentemente es contrario a lo analizado en casos anteriores puede tener su explicación en el valor de viento registrado por la estación meteorológica. El efecto del viento en el despacho 114 es mínimo, por lo que los valores del registro no influyen en la concentración de radón.

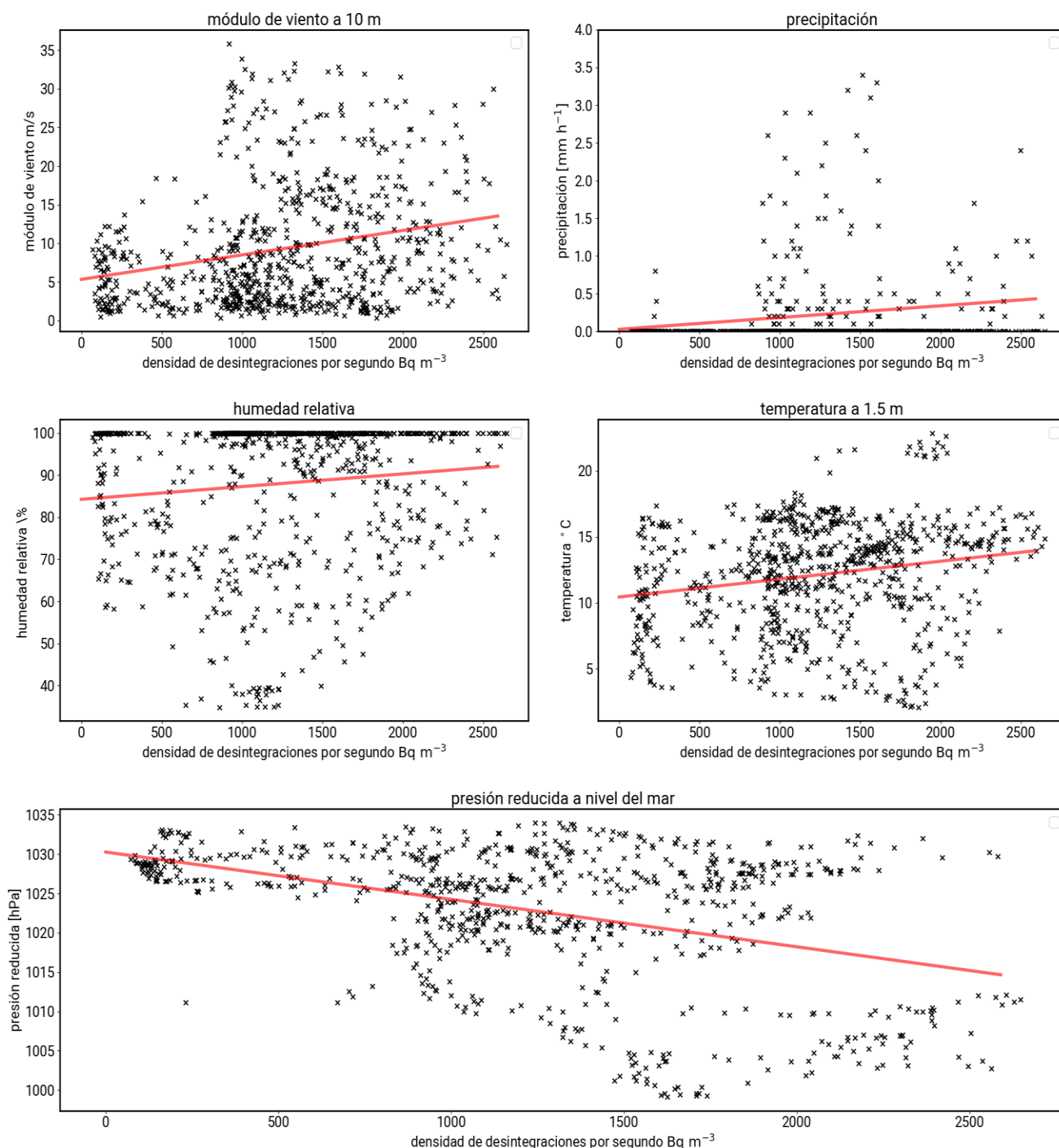


Figura 4-14 Gráficos de dispersión en el despacho 114

Aula 21²

Como ya se ha explicado anteriormente, los datos del Aula 21 fueron saneados debido a influencias externas, de tal manera que se limitó el análisis a períodos cortos de medición. Por este motivo, se vio necesario descartar las concentraciones registradas este año, por ser un período no significativo, con el objetivo de poder extraer conclusiones. Para poder analizar los fenómenos meteorológicos sobre las oscilaciones de concentración de radón en este aula, se ha decidido tomar los datos medidos en el curso 2020-2021 por la A.N. Cristina Camacho Martín que van desde el 18 de diciembre a las 1030UTC hasta el 13 de enero a las 1630 [54].

Por tanto, las gráficas que se presentan a continuación han sido realizadas a partir de las mediciones registradas en dicho período (Figura 4-15, Figura 4-16 y Figura 4-17)

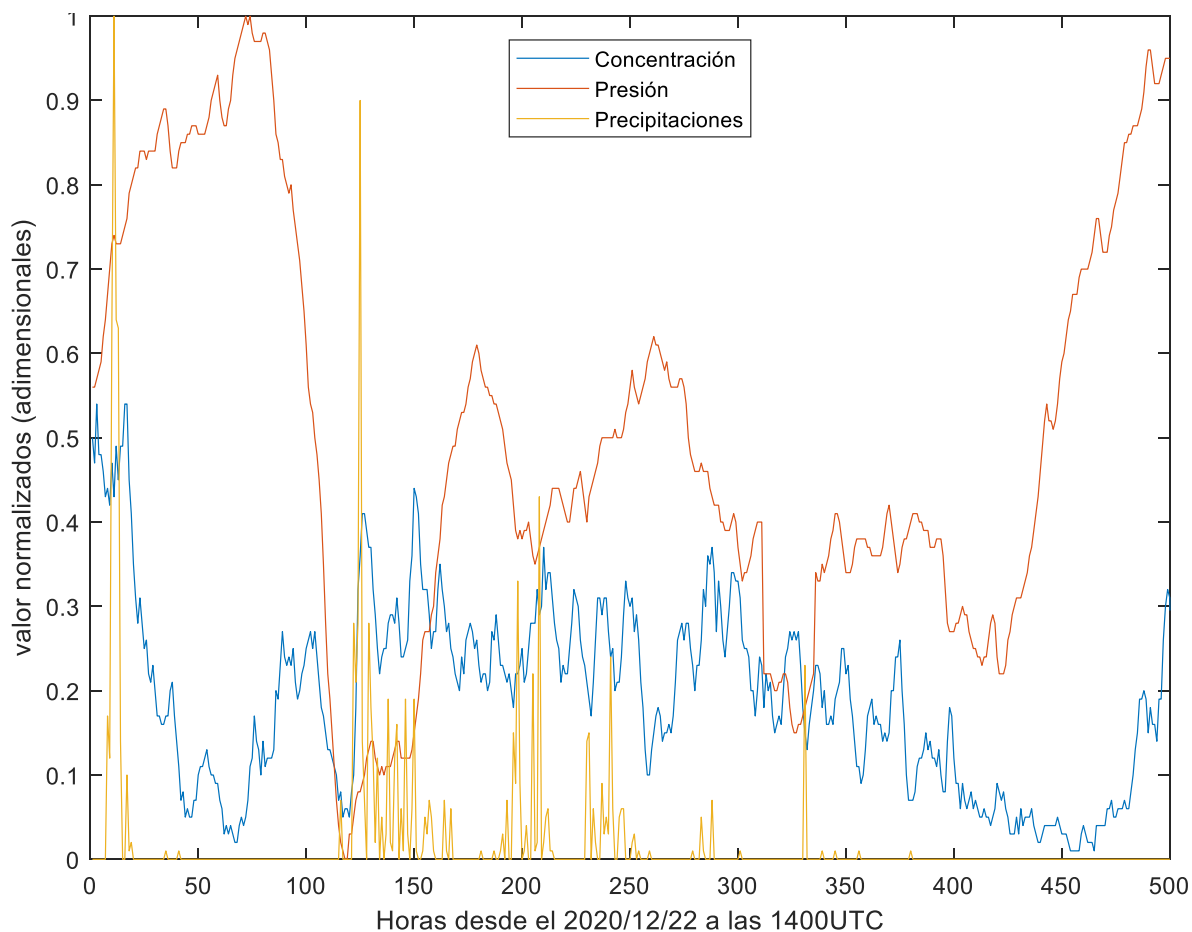


Figura 4-15 Gráfica normalizada de la densidad de desintegración frente a las precipitaciones y la presión en el Aula 21

En la Figura 4-15, se puede observar que en los registros del año pasado también coinciden los máximos de presión reducida con los mínimos en la concentración de radón. Y que en este caso también el máximo absoluto de presión se produce en el mismo período de tiempo que el mínimo de concentración. Esto puede llevar a pensar que la presión es una de las variables más influyentes en los niveles del radón, como ya se explicó en el estado del arte. Además, el gráfico de dispersión de la Figura 4-17 confirma que la correlación es negativa.

En la Figura 4-15, la variable de precipitaciones describe patrones parecidos a la señal de radón, tal y como se viene observando en los casos anteriores. Generalmente, los máximos relativos en las

² Cabe destacar que, por falta de datos registrados el año pasado, no se puede llevar a cabo análisis de temperatura y humedad

precipitaciones coinciden con máximos relativos de concentración, tal y como se confirma en el gráfico de dispersión de la Figura 4-17. Cabe destacar que esta habitación es la más expuesta por su proximidad al exterior. Por este motivo, podría experimentar mayores efectos derivados de las precipitaciones.

Es importante destacar que la habitación se encuentra situada en un túnel que da al mar. Por la forma de la estructura el viento tiende a encañonarse aumentando su velocidad. Debido a esto, puede que los efectos debido a la velocidad de viento pueden ser mayores que los realmente derivados de los registros de la estación meteorológica del puerto de Marín. En la Figura 4-16 se aprecia una ligera correlación negativa (confirmada por el gráfico de dispersión en la Figura 4-17), ya que los máximos relativos de concentración suelen coincidir con mínimos relativos de viento. Por otra parte, se observa que entre el máximo absoluto y los máximos relativos de viento que se dan en el intervalo entre las horas 100 y 250 tampoco se producen grandes diferencias de concentración, lo que puede hacer pensar que sea una variable con una influencia limitada. Como ya se ha explicado, el viento puede llegar a producir disminuciones en la concentración al soplar con gran intensidad. Puede ser que el comportamiento de la variable velocidad del viento en esta aula sea poco representativo, pero parece que, por lo general, no tiene un impacto determinante en la concentración.

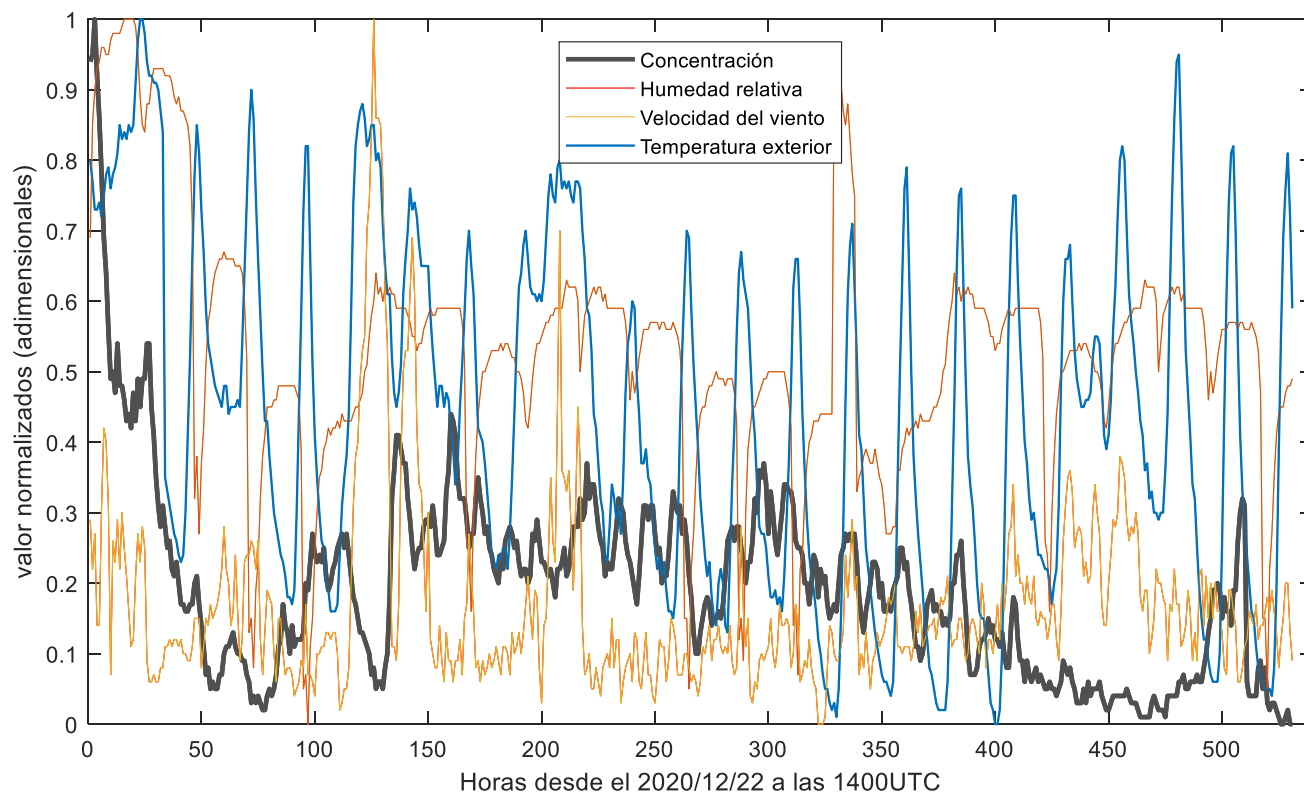


Figura 4-16 Concentración de radón frente a humedad relativa, velocidad del viento y temperatura exterior en el Aula 21 (diciembre-enero2020/ 2021)

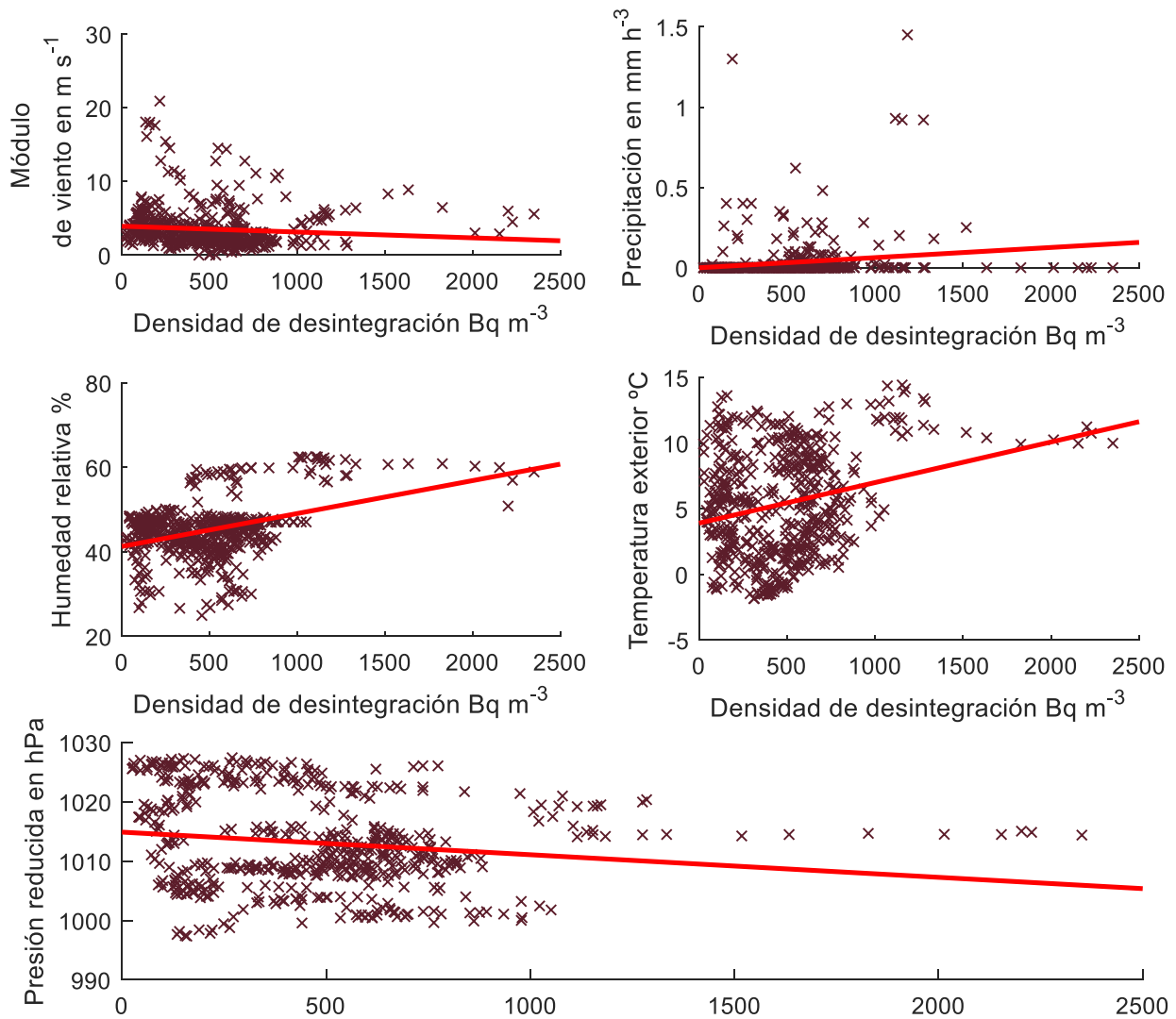


Figura 4-17 Gráficos de dispersión en el Aula 21 (diciembre de 2020 - enero de 2021)

4.2 Análisis del coeficiente de correlación de Spearman

A continuación, se presentará una matriz de impacto con los respectivos coeficientes de correlación de Spearman, entre las densidades de desintegración de radón de las habitaciones y cada una de las variables meteorológicas. El código de colores interpreta la calidad del valor de coeficiente obtenido. Se llevará a cabo una comprobación para ver si coinciden los valores numéricos con lo analizado anteriormente. Además, se presentará también el resultado del p-valor, que complementará la información del análisis de correlación, indicando la fiabilidad del coeficiente calculado para cada una de las variables.

Se han realizado dos cálculos del coeficiente de correlación de Spearman entre la densidad de desintegración y las diferentes variables meteorológicas. El primero de ellos se calcula a partir de los datos en crudo (datos sin suavizar), representados en la Figura 4-1. Por otra parte, y con el objetivo de discriminar datos atípicos, se ha realizado otro cálculo del citado coeficiente aplicando antes una media móvil a las señales de concentración. Cabe destacar, que no se ha incluido la variable de diferencia de temperatura debido a que las mediciones que registra la estación meteorológica del puerto de Marín no se corresponden con lo que verdaderamente experimentan las distintas habitaciones y, por ello, los resultados no son concluyentes.

4.2.1 Registro sin suavizar

En la Tabla 4-1 se presenta el coeficiente de correlación de Spearman y el p-valor de cada resultado (Tabla 4-2). Las tablas están estructuradas con las habitaciones en cada fila y las variables meteorológicas en las columnas. Los colores más verdes representan correlaciones positivas, mientras que los resultados en la escala de rojos representan correlaciones negativas.

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	0,164	0,385	-0,160	0,094	0,252
Despacho 114	0,104	0,101	-0,335	0,252	0,204
Multiusos	0,089	0,229	-0,228	0,127	0,173
Reuniones	0,282	0,377	-0,480	0,176	0,390

Tabla 4-1 Valor del coeficiente de correlación de Spearman (r_{XY}) para las series de datos crudos

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	1,97E-04	3,29E-20	2,06E-4	0,03E-01	4,62E-11
Despacho 114	3,16E-03	4,24E-03	2,50E-22	4,61E-13	6,45E-09
Multiusos	1,20E-02	6,26E-11	7,90E-11	3,46E-04	9,60E-07
Reuniones	6,83E-16	4,40E-28	6,68E-47	6,43E-07	3,88E-30

Tabla 4-2 P-valor del coeficiente de correlación de Spearman para las series de datos crudos

Si se observa la columna de las precipitaciones, se aprecia que todos los resultados representan una correlación positiva débil ($0,1 \leq |r_{XY}| < 0,3$ según la Tabla 3-4). Como ya se ha expuesto en el análisis anterior, los periodos con precipitaciones suelen coincidir con máximos relativos de concentración de radón, pues generan un gradiente de presiones que permiten flujos de gas hacia el interior de la habitación. Además, cabe destacar, que las precipitaciones pueden modificar la permeabilidad del terreno provocando que la exhalación se focalice en aquellas zonas más secas, como pueden ser los asentamientos de edificios.

A pesar de que la humedad relativa no presenta resultados elevados, sí se puede destacar la clara uniformidad de signo en las 4 habitaciones. Como se concluía tras observar los diagramas de dispersión, la humedad, dependiente en gran parte de las precipitaciones, es proporcional a la concentración de radón. Destacan el Aula 21 y la Sala de Reuniones con una correlación positiva moderada (según la Tabla 3-4 un coeficiente $0,3 \leq |r_{XY}| < 0,5$).

En cuanto al parámetro de temperatura exterior, se observan resultados similares a los de la variable de humedad relativa, es decir, una correlación positiva débil-moderada en las 4 habitaciones. Por tanto, cuando se registran datos más elevados de temperatura exterior también aumenta el nivel de radón. Esto se justifica debido a que se generan gradientes de presión que a su vez propician flujos entrantes de radón.

Respecto a la variable de presión, lo más destacable es la correlación negativa que presenta en las 4 habitaciones. En concreto, en la Sala de Reuniones se ha obtenido un coeficiente de -0,48 que es un resultado aceptable para asumir que si existe una correlación negativa. Esta tendencia uniforme en el parámetro de presión confirma que las concentraciones más bajas se dan en períodos de elevadas presiones.

Por su parte la variable velocidad del viento, presenta correlación débil ($0,1 \leq |r_{XY}| < 0,3$) o nula con la densidad de desintegración. Esto puede estar relacionado con la falta de coincidencia entre los datos de módulo de viento registrados por la estación meteorológica y los que verdaderamente experimentan las habitaciones.

Cabe destacar, como se puede ver en la Tabla 4-2, que los resultados del p-valor obtenido para cada variable son extremadamente bajos en la mayoría de casos. Esto permite afirmar que el valor de los coeficientes es fiable y se asume que no ha sido producto del azar.

4.2.2 Aplicando la media móvil

Con el objetivo de restar peso a los factores atípicos que pueden desmejorar el resultado y de manera similar a la normalización llevada a cabo para las señales de radón expuestas en la Figura 4-1, se ha realizado una media móvil para suavizar estos efectos. Los coeficientes de correlación de Spearman obtenidos tras realizar el saneamiento se presentan en la Tabla 4-3, mientras que el p-valor relacionado con cada resultado se presenta en la Tabla 4-4. En este caso se aprecia que los valores absolutos de los coeficientes son más extremos. Los que estaban próximos a 0 ahora lo están más y los que tenían un valor absoluto más grande ahora están más definidos.

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	0,338	0,385	-0,486	0,043	0,256
Despacho 114	0,179	0,099	-0,430	0,402	0,330
Multiusos	0,178	0,198	-0,251	0,256	0,364
Reuniones	0,601	0,557	-0,576	0,333	0,567

Tabla 4-3 Valor del coeficiente de correlación de Spearman (r_{XY}) tras aplicar la media móvil

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	3,10E-06	3,51E-20	3,74E-12	5,61E-01	4,14E-09
Despacho 114	4,54E-07	5,49E-03	1,97E-36	1,57E-31	3,10E-21
Multiusos	5,97E-07	2,82E-08	1,31E-12	2,78E-13	1,39E-25
Reuniones	4,31E-77	4,98E-64	1,51E-69	2,08E-21	7,95E-67

Tabla 4-4 P-valor del coeficiente de correlación de Spearman tras aplicar la media móvil

Respecto a la variable de precipitaciones, se observa que en la Sala de Reuniones existe un valor elevado de correlación que se corresponde según la Tabla 3-4, con una correlación positiva fuerte ($0,5 \leq |r_{XY}| < 1$). La tendencia es positiva por ser todos los resultados mayores que 0.

En la variable de humedad relativa también se encuentra una correlación positiva en todos sus registros. Destacan los valores de tres habitaciones que presentan un grado de correlación mayor. El Aula Multiusos presenta una correlación débil, mientras que en el Aula 21 se obtiene una correlación moderada. Por último, la influencia de la humedad relativa en Sala de Reuniones presenta una correlación fuerte, que puede deberse a la composición del terreno donde se asienta, ya que como se ha mencionado anteriormente, este ha sido ganado al mar.

En relación con la variable de presión, se observa que de nuevo todas las habitaciones, presentan correlaciones negativas entre moderada y fuerte. En concreto, la Sala de Reuniones vuelve a mostrar que su actividad de radón está influenciada considerablemente por las presiones, teniendo un coeficiente de correlación negativa fuerte de -0,576. Con esto se confirma que es la variable que presenta una mayor influencia en todos los espacios estudiados.

La variable de velocidad del viento presenta en el despacho 114 un grado de correlación moderado de 0,402. La Sala de Reuniones parece estar menos influenciada por esta variable, ya que presenta la menor dependencia de todas en esta habitación. Como ya se ha hecho anteriormente, puede que los datos de viento disten de la realidad y, por tanto, los resultados sean poco concluyentes.

Por último, respecto a la variable de temperatura exterior, se observa que, de nuevo, todas las habitaciones presentan una correlación positiva moderada (según la Tabla 3-4 un coeficiente $0,3 \leq |r_{XY}| < 0,5$) excepto la Sala de Reuniones que es fuerte. El Aula 21 es la habitación que presenta un grado de correlación más bajo con la citada variable. Esto podría justificarse debido a que el periodo de medida no es exactamente comparable con los otros y al tratarse de espacios temporales cortos podría afectar de mayor manera. Además, su ubicación puede influir pues, como se ha mencionado anteriormente, el túnel donde se encuentra, provoca un encañonamiento del viento que puede derivar en una bajada de la temperatura exterior. Por su parte, el aula de reuniones vuelve a mostrar un coeficiente de correlación

fuerte de 0,567 entre la densidad de desintegración y la temperatura exterior ($0,5 \leq |r_{xy}| < 1$ según la Tabla 3-4).

Con el p-valor se concluye que los resultados son aceptados por no ser producto del azar. En las series de datos normalizados es incluso más bajo que los correspondientes al registro, lo que quiere decir que existen menos valores que alteren el resultado final.

4.3 Análisis de la Transformada de Fourier

En este apartado se presentan los diagramas de frecuencias resultado de utilizar la transformada rápida de Fourier en algunas series de mediciones. El objetivo es determinar qué fenómenos cíclicos, de los expuestos en el estado del arte, se ven reflejados en las frecuencias de las señales que componen la resultante de concentración de radón [48, 49, 50, 53]. Las series analizadas son aquellas pertenecientes a las habitaciones que, con anterioridad, han mostrado la influencia de estos fenómenos. El despacho 114 y el aula 21 ya han presentado componentes frecuenciales [8]. Además, se realizará un análisis espectral de las habitaciones del edificio de investigación para comprobar si existen las mismas influencias. Se ha diseñado una función en Matlab donde se muestra el espectro de frecuencias de una señal a partir de sus datos horarios y su frecuencia de muestreo (Anexo II: Función de la Transformada de Fourier)

Despacho 114

Para esta habitación se ha tomado la serie más larga, que se corresponde con los datos registrados por la Raspberry. Como se puede observar en la Figura 4-18, la imagen presenta dos gráficas. En la parte superior se encuentra la señal de radón en función del tiempo. En la parte inferior se muestra el resultado de aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a la señal de muestreo.

Como resultado se obtiene el espectro de frecuencias que componen la señal de radón. Las mediciones de concentración fueron tomadas cada 10 minutos por lo que la frecuencia de muestreo utilizada fue de 1/600 (s).

Respecto a las frecuencias obtenidas tras aplicar la transformada de Fourier, se observa que, tal y como se expuso en la bibliografía del estado del arte, existen tres ciclos esperados que puedan afectar a la concentración. El primero de ellos es el ciclo lunar, que se da cada 28 días, en este caso la frecuencia de $3,95 \cdot 10^{-7}$ Hz se corresponde con 29,3 días [48].

En segundo lugar, se observa la influencia del ciclo diurno o solar, que se da cada 24 horas y en el despacho 114 se corresponde con una frecuencia de $1,187 \cdot 10^{-5}$ Hz que en el plano temporal se corresponde con 23,4 horas. La presión experimenta variaciones sistemáticas a lo largo de un día, lo que se conoce como marea barométrica, provocando estos efectos cíclicos [47]. Por su parte, la temperatura presenta una oscilación diaria armónica, registrando, en la misma época, valores parecidos en días sucesivos.

El ciclo semidiurno, correspondiente a la frecuencia de 12 horas, se puede deber a los movimientos de mareas. Como ya se ha expuesto en el estado del arte, existen fuerzas gravitacionales que, a pesar de no afectar de la misma manera al radón y al agua, sí se ve una similitud de comportamiento. Los movimientos freáticos se repiten cada medio día y por eso tienen una correspondencia con las subidas y bajadas en la concentración de radón. Como se expuso en el estado del arte, las fuerzas gravitacionales que generan las conocidas mareas oceánicas influyen a todos los fluidos de manera distinta. El radón no es una excepción por lo que, cuando se genera esta fuerza de atracción, las concentraciones de radón tienden a aumentar y cuando cesan tienden a disminuir.

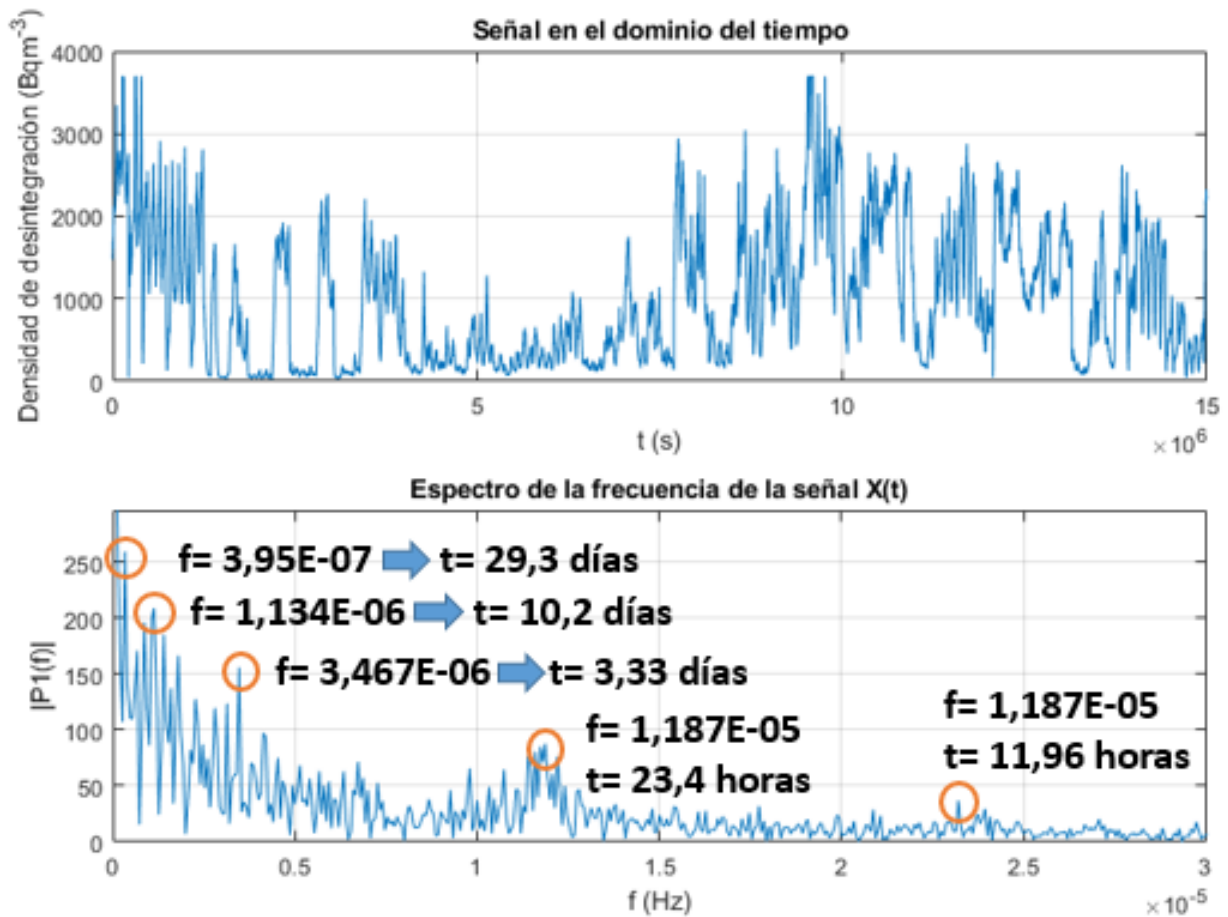


Figura 4-18 Señal de radón y espectro de frecuencias de la serie larga del despacho 114

Cabe destacar que, como resultado de nuestro análisis frecuencial, destacan otras frecuencias atribuidas a espacios temporales de 10,2 días y 3,33 días que se desconoce su posible origen.

Aula 21

A continuación, se presenta el espectro de frecuencias resultante de aplicar la transformada de Fourier a una señal de radón obtenida en el curso 2020-2021 por el AN Carlos Lázaro Benavides [8].

Como en el caso anterior, en la parte superior se pudo observar la señal de concentración en función del tiempo, mientras que la gráfica de la parte inferior se corresponde con la representación del espectro de frecuencias de la señal del Aula 21. El período de medición se corresponde con el mes de enero de 2021.

En este caso, tal y como se puede ver en la Figura 4-19, la señal está constituida por menos mediciones, ya que el intervalo de tiempo es inferior. Como consecuencia, los picos de frecuencia son más relevantes en esta serie. Los resultados obtenidos se corresponden con el ciclo semidiurno, que se da cada 12,4 horas, y que posiblemente tenga su origen en la altura de marea por su proximidad al mar. Cabe destacar que en este caso no se encuentra la frecuencia correspondiente al ciclo diurno. Por otra parte, el análisis espectral muestra otras dos frecuencias relevantes. La primera se corresponde con el espacio temporal de 2,2 días y la segunda, bastante resaltada en el gráfico, con 2 horas.

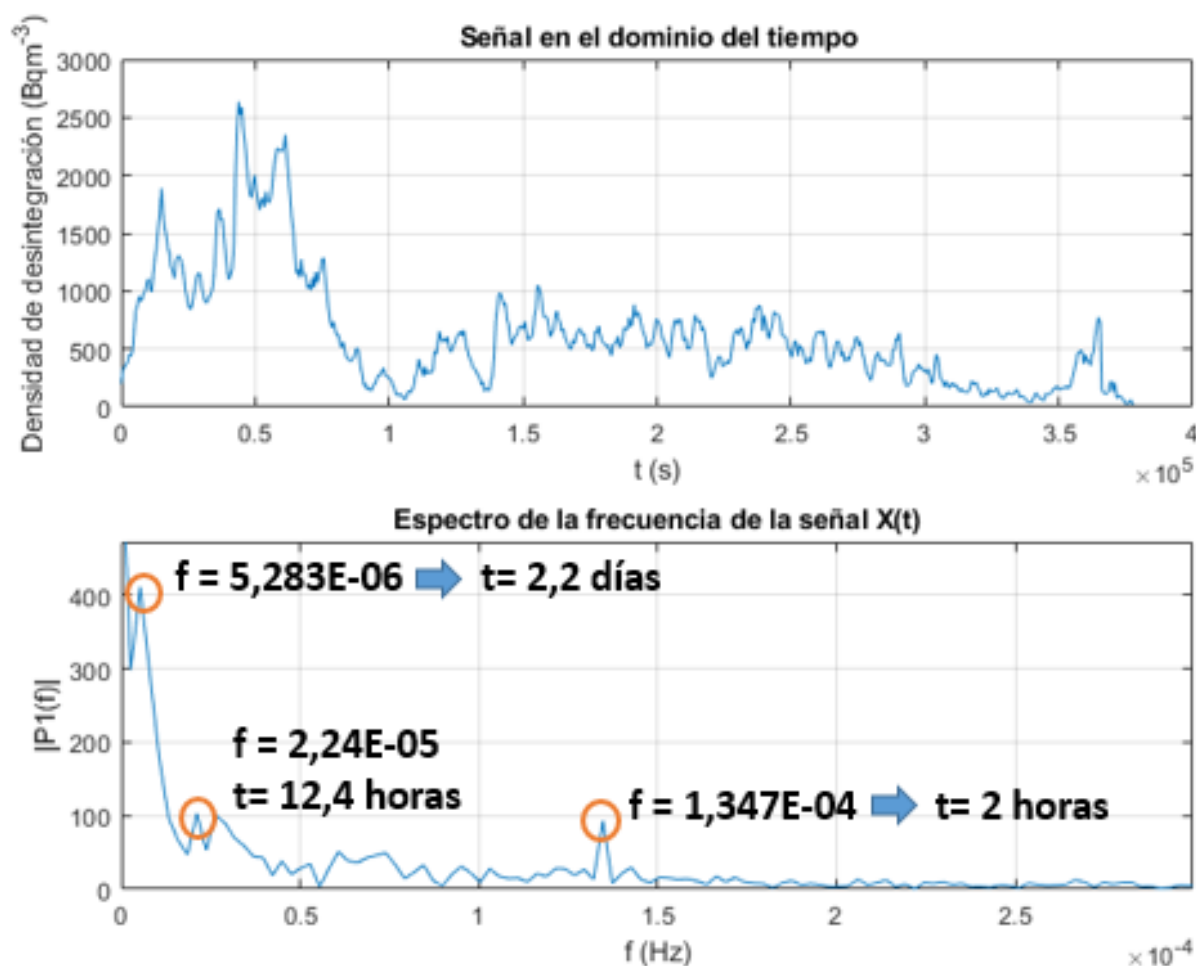


Figura 4-19 Señal de radón y espectro de frecuencias del Aula 21 (enero 2021)

Sala de Reuniones

El edificio de la sala de reuniones presenta las frecuencias correspondientes con el ciclo diurno, que en este caso, es de 23,8 horas y del ciclo semidiurno que se corresponde con 10,28 horas. Además se muestra un pico de frecuencia de $6,97 \cdot 10^{-5}$ Hz que se corresponde con 4 horas en el plano temporal.

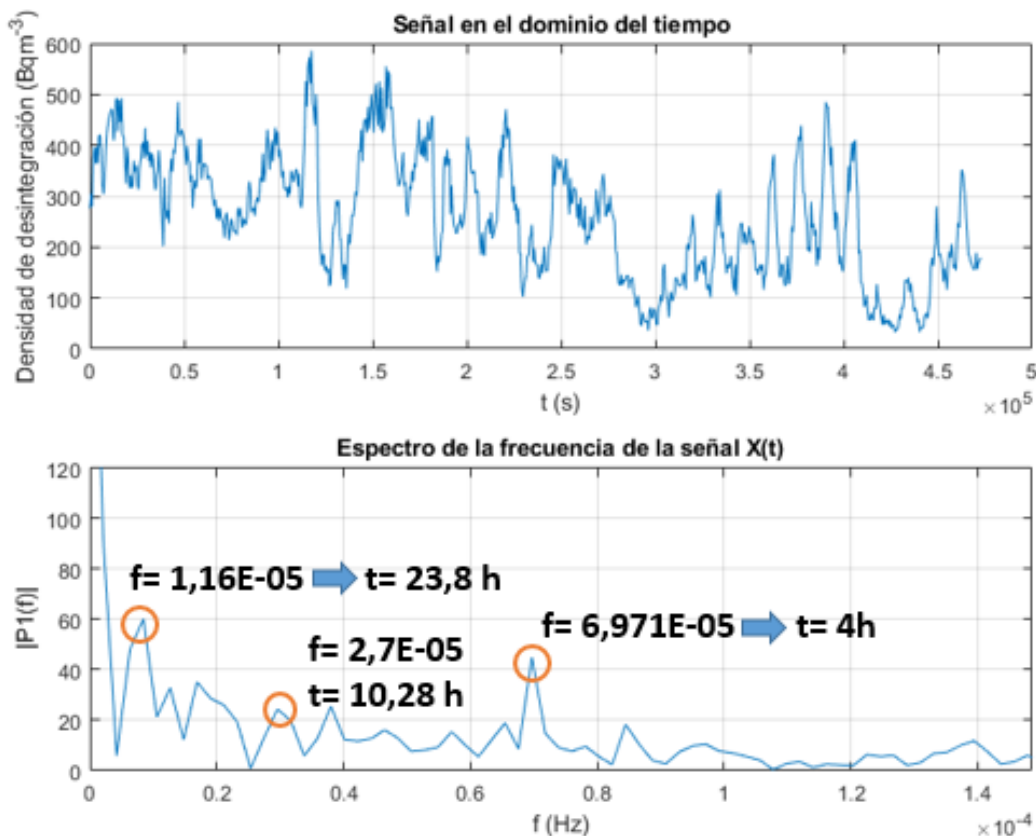


Figura 4-20 Señal de radón y espectro de frecuencias de la Sala de Reuniones

Aula Multiusos

Por último, con el análisis del Aula Multiusos, se confirma la influencia sobre la concentración de radón de los ciclos diurno, que en este caso se corresponde con 23,8 horas, y semidiurno, 12,74 horas. También se ve la influencia de un ciclo de 4 horas, tal y como se observaba en la Sala de Reuniones.

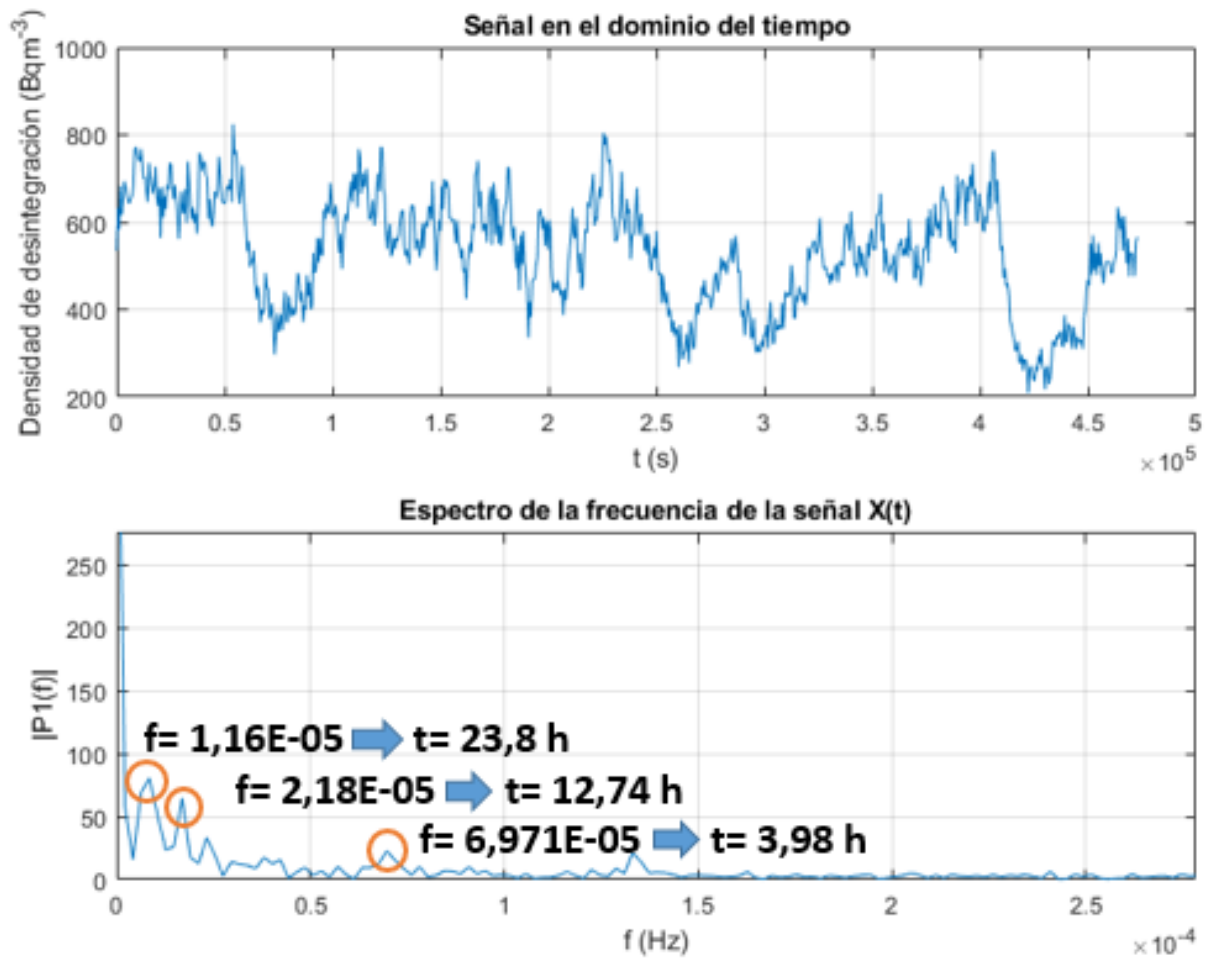


Figura 4-21 Señal de concentración y espectro de frecuencias del Aula Multiusos

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se expondrán las conclusiones extraídas a lo largo del trabajo, así como posibles líneas futuras que se pueden derivar de este estudio.

5.1 Conclusiones

El presente TFG se ha estructurado por capítulos, de los cuales se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, se ha presentado la amenaza potencial que suponen las altas concentraciones de radón, siendo el segundo causante de cáncer de pulmón. Por otra parte, se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte a través de diversos estudios científicos acerca de los factores que influyen en los niveles de concentración de radón. A pesar de que la bibliografía no es del todo concluyente, pues hay autores que afirman efectos contrarios sobre la misma variable geofísica, se puede concluir que existe una gran influencia de los factores geológicos y constructivos, en concreto el tipo de suelo silíceo.

Con el objetivo de comprender mejor cual es el comportamiento de la concentración de radón en función de diferentes variables geofísicas se llevó a cabo una medición en distintos puntos de la ENM. A partir del citado registro y de su correspondiente análisis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Tal y como se venía registrando en años anteriores, las concentraciones de radón en la Escuela Naval Militar son significativamente altas, ya que más del 75% de las mediciones registradas superan los 300 Bq m^{-3} que la legislación establece como límite. Se han llegado a registrar concentraciones de 4992 Bq m^{-3} en el despacho 114.
- Se observan comportamientos de la señal de radón que no se pueden explicar a partir de las variables meteorológicas registradas por la estación del Puerto de Marín. Es decir, debido a la posición de las habitaciones existen fenómenos meteorológicos que se acentúan o se suavizan afectando de manera distinta a lo que la medición general indica.
- En el despacho 114 las concentraciones son más elevadas que en cualquier otra habitación a causa de algún factor externo a la influencia geofísica, pudiendo ser geológico o constructivo.
- La ventilación afecta de manera definitoria en la concentración tal y como se puede apreciar en el mínimo absoluto de la señal de radón del despacho 114.
- Tanto la concentración como el resto de variables meteorológicas no se distribuyen según la normal, por lo que el método de correlación ha de ser no paramétrico, por ejemplo, Spearman.

- La variable más influyente es la presión atmosférica. Presenta una correlación negativa en todas las habitaciones presentando los coeficientes de correlación con los valores absolutos más altos. Además, se observa que las concentraciones bajas coinciden siempre con valores elevados de presión.
- La variable de temperatura exterior presenta una correlación positiva moderada en todas las habitaciones. Se observa que cuando se dan temperaturas por encima de los 20 °C las concentraciones son elevadas.
- En la Sala de Reuniones la variable de precipitaciones, la humedad relativa y la temperatura exterior presentan coeficientes de correlación fuertes.
- La variable precipitaciones, así como la variable humedad, presentan un coeficiente de correlación positivo en todas las habitaciones, siendo algunos de carácter fuerte.
- Existe un desfase en el tiempo entre el momento en el que se da el fenómeno meteorológico y la reacción en la variación de concentración pudiendo afectar al valor del coeficiente de Spearman.
- Los resultados de correlación son muy fiables debido al bajo valor que presenta el p-valor del coeficiente de correlación de Spearman.
- Se ha demostrado con una serie larga de datos registrados en el despacho 114 (desde agosto de 2021 hasta enero de 2022) la influencia del ciclo lunar de 28 días.
- En todas las habitaciones, excepto en el Aula 21, las señales de radón se ven influenciadas por el ciclo diurno de temperatura y presión.
- Todas las habitaciones muestran la influencia del ciclo semidiurno, que se corresponde con gran probabilidad con el ciclo de mareas.
- Se han hallado otras frecuencias, como la de 4 h en las habitaciones del edificio de investigación, sin aparente relación con fenómenos cíclicos conocidos pero que parecen consistentes.

5.2 Líneas futuras

Otra conclusión que se extrae del presente estudio es la infinidad de posibilidades que ofrece el análisis de radón. Es por ello que se proponen una serie de líneas futuras derivadas de este estudio, con el objetivo de aumentar el conocimiento sobre el comportamiento de este gas.

- Realizar un análisis de la variación de concentración de radón en la planta baja del edificio del CUD con un registro meteorológico propio incluyendo diferencias de humedad relativa, presión y temperatura.
- Realizar un estudio geológico de diferentes puntos de la ENM como pueden ser el edificio de investigación y la planta baja del edificio del CUD, con el objetivo de cuantificar la influencia del tipo de suelo en la concentración.
- Establecer períodos de medición semi-permanentes en diferentes puntos de la ENM para poder analizar su dependencia de las distintas variables meteorológicas, así como su capacidad radiactiva en el tiempo.

- Analizar la posible influencia de las concentraciones de radón en frascos testigo de pólvora en el pañol del condestable de la ENM, dada su localización y proximidad al mar.
- Estudio de viabilidad de posibles medidas de mitigación en la ENM, así como un presupuesto anual estimado para mantener las concentraciones de radón por debajo de los máximos permitidos.
- Hacer el seguimiento de concentración de radón a partir de datos meteorológicos ya confirmados y corregidos.
- Análisis de la concentración de radón utilizando métodos no paramétricos como el Singular Spectrum Analysis

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Foro Nuclear, «Foro Nuclear,» [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-proteccion-radiologica-y-radiacion/que-es-la-radiactividad/>. [Último acceso: 8 Marzo 2022].
- [2] M. F. L'Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis*, Academic Press, 2012.
- [3] A. S. Eve, Rutherford, Londres: Cambridge University Press, 2013.
- [4] P. G. Cook y A. L. Herczeg, *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, Springer, Boston, MA.
- [5] P. Román y G. Pinto, «National Geographic,» [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/tabla-periodica-forma-ordenar-elementos-quimicos_15988. [Último acceso: 4 Enero 2022].
- [6] F. Weigel, «Radon,» *Chemiker Zeitung*, 1978.
- [7] Wikipedia, «Wikipedia,» 14 October 2011. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_Chain_Thorium.svg. [Último acceso: 8 Enero 2022].
- [8] C. L. Benavides, «Evaluación de factores determinantes en la concentracion de radon en espacios interiores,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, 2021.
- [9] P. K. Hopke, T. B. Borak, J. Doull, J. E. Cleaver y K. F. Eckerman, «Health risks due to radon in drinking water,» American Chemical Society, Washington DC, 2000.
- [10] F. K. T. Stanley, J. L. Irvine, W. R. Jacques y D. G. Innes, «Radon exposure is rising steadily within the modern North American residential environment, and is increasingly uniform across seasons,» *Nature*, 2019.
- [11] National Cancer Institute, «National Cancer Institute,» [En línea]. Available: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/radon/hoja-informativa-radon#:~:text=El%20rad%C3%B3n%20representa%20un%20riesgo,se%20relacionan%20con%20el%20rad%C3%B3n..> [Último acceso: 17 Enero 2022].

- [12] Organización Mundial de la Salud, «OMS,» 2 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>. [Último acceso: 18 Enero 2022].
- [13] E. González, «El Confidencial,» 11 Enero 2022. [En línea]. Available: https://www.elconfidencial.com/medioambiente/clima/2022-01-11/gas-radon-efectos-en-el-medioambiente_3044792/. [Último acceso: 18 Enero 2022].
- [14] C. R. d. Meana, *Norma 90/143/Euratom*, Bruselas: Comisión Europea, 1990.
- [15] Ministerio de la Presidencia del Reino de España, *Real Decreto 783/2001*, Madrid, 2001.
- [16] OMS, *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública.*, 2005.
- [17] Consejo de Seguridad Nuclear, *Instrucción IS-33 sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.*, Madrid, 2011.
- [18] Consejo de la Unión Europea, «Directiva 2013/59/EURATOM,» 5 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.boe.es>. [Último acceso: 28 Enero 2022].
- [19] Servicios técnicos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Código Técnico de la Edificación,» Abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [20] Á. G. Denia, «Medición de la concentración de radón en el Centro Universitario de la Defensa y propuesta de medidas de mitigación,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, 2020.
- [21] G. M. Yébenes, «Análisis preliminar de presencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, 2019.
- [22] A. J. Katz y A. H. Thompson, «Quantitative prediction of permeability in porous rock,» *Physical Review*, vol. 34, nº 11, p. 8179, 1986.
- [23] L. Font Guiteras, «Radon generation entry and accumulation indoors,» Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, 1997.
- [24] A. Fernández Villar, «El mapa español de radón: análisis de factores indicativos del riesgo de exposición al radón,» Universidad de Cantabria, Santander, 2017.
- [25] F. J. Pettjohn, *Sedimentary Rocks*, Nueva York: Harper&Row, 1975.
- [26] G. Faure, *Origin of Igneous Rocks: The Isotopic Evidence*, Springer, 2013.
- [27] K. Bucher y M. Frey, *Petrogenesis of metamorphic rocks*, Boston: Springer, 2002.
- [28] Consejo de Seguridad Nuclear, «Mapa de potencial de radón en España,» [En línea]. Available: <https://www.arcgis.com/apps/SimpleViewer/index.html?appid=a3a435cfb6114e21ad03a5ac2961d8a8>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [29] N. P. Petropoulos, S. E. Simopoulos y M. J. Anagnostakis, «Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results,» *Science of The Total Environment*, vol. 272, nº 3, pp. 109-118, 2001.
- [30] B. Frutos Vázquez y M. Olaya Adán, *Protección frente a la inmisión de radón en edificios*, Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear, 2010.

- [31] Geomnía Natural Resources, «Geomnía.es,» 23 Julio 2021. [En línea]. Available: geomnía-radon.es. [Último acceso: 13 Febrero 2022].
- [32] N. J. Aquilina, «The Influence of Meteorological Parameters on Indoor and Outdoor Radon Concentrations: A Preliminary Case Study,» Department of Geosciences of the University of Malta, Msida, 2019.
- [33] I. Smetanova, K. Holy y M. Mullerova, «The effect of meteorological parameters on radon concentration in borehole air and water,» Akademiai Kiadó, Budapest, 2009.
- [34] Y. Li, C. Fan y M. Xiang, «Short-term variations of indoor and outdoor radon concentrations in a typical semi-arid city of Northwest China,» Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Xí'an, 2018.
- [35] B. Frutos Vázquez, «Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2009.
- [36] D. Xie, M. Liao y K. J. Kearfott, «Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building – A case study,» Elsevier, 2015.
- [37] B. Frutos Vázquez, M. Olaya Adán y L. S. Quindós Poncela, «Experimental study of effectiveness of four radon mitigation solutions, based on underground depressurization, tested in prototype housing built in a high radon area in Spain,» Elsevier, Madrid, 2011.
- [38] C. Papastefanou, «Measuring radon in soil gas and groundwaters: A review,» *Annals of geophysical*, vol. 50, nº 4, p. 10, 2007.
- [39] J.-L. Pinault y J.-C. Baubron, «Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature data: A new approach for radon concentration modeling,» *Jornal of Geophysical Research*, vol. 101, p. 3171, 1996.
- [40] T. Reddy, K. Gadsby y A. Cavallo, «Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses,» *Environment International*, vol. 22, nº 1, p. 1073, 1996.
- [41] S. Narendra, V. De, D. Antoniadis y A. Chandrakasan, «Scaling of stack effect and its application for leakage reduction,» Cambridge, 2001.
- [42] R. Cothorn, Radon, Radium and Uranium in Drinking Water, Lewis Pub, 1990.
- [43] L. Sesana, E. Caprioli y G. M. Marcazzan, «Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere,» *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 65, nº 2, p. 147, 2003.
- [44] W. Nazaroff, H. Feustel y A. V. Nero, «Radon transport into a detached one-story house with a basement,» Elsevier, 1985.
- [45] R. S. Eaton y A. G. Scott, «Understanding Radon Transport into House,» Oxford Journals, Londres, 1984.
- [46] A. L. Robinson, «Radon Entry into Buildings: Effects of atmospheric pressure fluctuations and building structural factors,» Energy and Enviroment Division, Berkeley, 1996.

- [47] Y. W. Tsang y T. N. Narasimhan, «Effects of periodic atmospheric pressure variation on radon entry into buildings,» *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 97, nº 6, pp. 9161-9170, 1992.
- [48] F. Aumento, «Radon tides on an active volcanic island: Terceira, Azores,» *Geofísica Internacional*, vol. 41, nº 4, pp. 499-505, 2002.
- [49] R. G. Crockett, A. R. Denman, P. S. Phillips y G. K. Gillmore, «Consideration Of Tidal Influences In Determining Measurement Periods When Monitoring Built-Environment Radon Levels,» de *European IRPA congress on radiation protection*, Paris, 2006.
- [50] J. García-Tobar, «Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el nivel de radón a corto plazo en un laboratorio subterráneo,» *Revista Electrónica Nova Scientia*, vol. 6, nº 12, pp. 78-107, 2014.
- [51] G. Steinitz, O. Piatibratova y P. Kotlarsky, «Possible effect of solar tides on radon signals,» *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 102, nº 8, pp. 749-765, 2011.
- [52] C. J. Groves-Kirkby, A. R. Denman y R. G. Crockett, «Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK,» *Science of The Total Environment*, vol. 367, nº 1, pp. 191-202, 2006.
- [53] M. Domenico Barberio, F. Gori, M. Barbieri y A. Billi, «Diurnal and Semidiurnal Cyclicity of Radon (^{222}Rn) in Ground Water, Giardino Spring, Central Apennines,» *Water*, vol. 10, p. 1276, 2018.
- [54] C. Camacho Martín, «Gestión de la presencia de radón en lugares de trabajo: determinación de concentraciones y evaluación de riesgos en la EM,» Centro Universitario de la Defensa de Marín, Marín, 2021.
- [55] Bertin Instruments, «Bertin Instruments,» [En línea]. Available: <https://www.bertin-instruments.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alpha/>.
- [56] Radonova, «<https://radonova.es/>,» [En línea]. Available: <https://radonova.es/producto/radoneye-rd200/>. [Último acceso: 31 Enero 2022].
- [57] Meteogalicia, «<https://www.meteogalicia.gal/>,» Meteogalicia, [En línea]. Available: https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacions/estacions.action?request_locale=gl#. [Último acceso: 6 Marzo 2022].
- [58] J. A. Rodrigo, «Ciencia Datos,» Junio 2016. [En línea]. Available: https://www.cienciadedatos.net/documentos/24_correlacion_y_regresion_lineal. [Último acceso: 17 Febrero 2022].
- [59] J. Benesty, J. Chen, Y. Huang y I. Cohen, «Pearson Correlation,» de *Noise Reduction in Speech Processing*, Berlin, Springer, 2009.
- [60] J. D. Hernández Lalinde, F. Espinosa Castro, J. E. Rodríguez, J. G. Chacón Rangel y C. A. Toloza Sierra, «Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson,» Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, Caracas, 2018.
- [61] L. D. Goodwin y N. L. Leech, «Understanding Correlation: Factors that affect the size of r ,» *The Journal of Experimental Education*, vol. 74, nº 3, pp. 249-266, 2010.

- [62] R. M. Martínez Ortega, L. C. Tuya Pendás, M. Martínez Ortega y A. Pérez Abreu, «El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman,» *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, vol. 8, nº 2, p. 53, 2009.
- [63] L. F. Restrepo y J. González L., «De Pearson a Spearman,» *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, vol. 20, nº 2, pp. 2256-2958, 2007.
- [64] R. N. Bracewell, *The Fourier Transform and Mis Applications*, Nueva York: Academia, 1986.
- [65] H. J. Nussbaumer, *The fast Fourier Transform*, Berlín: Springer, 1981.

ANEXO I: EJEMPLO HOJA DE CÁLCULO EXCEL

A continuación, se esquematiza el proceso de tratamiento de datos previo a la elaboración de gráficas y posterior análisis.

En primer lugar, se descargan los datos meteorológicos diezminutales en formato .csv de la página del servidor de Meteogalicia. En concreto, en este estudio utilizamos el registro de la estación del puerto de Marín.

La segunda parte corresponde al filtrado de las variables mediante la herramienta de tablas dinámicas de Excel. En la figura se puede observar el aspecto de cómo sería tras aplicar la media horaria para un día:

Etiquetas de fila	Suma de Chuvia	Promedio de Humedad relativa	Promedio de Presión reducida	Promedio de Temperatura media	Promedio de Velocidade do vento
01-dic					
0	0,20	94,00	1027,06	10,18	4,26
1	0,00	94,00	1026,25	10,14	4,43
2	0,20	94,00	1025,66	10,42	7,23
3	0,20	94,00	1025,24	10,40	6,28
4	0,00	94,00	1024,50	10,50	7,70
5	0,00	94,00	1024,22	10,73	11,02
6	0,20	94,00	1024,05	10,75	13,88
7	0,80	93,50	1023,67	10,89	8,27
8	1,60	92,67	1023,84	10,66	7,36
9	0,40	89,17	1024,24	10,41	4,87
10	0,00	84,83	1024,24	10,30	4,18
11	0,60	86,67	1024,33	10,06	5,10
12	0,00	84,17	1023,84	10,25	5,48
13	0,00	78,67	1023,13	10,48	5,72
14	0,40	80,50	1022,76	10,11	4,78
15	0,20	85,67	1022,80	8,95	4,58
16	0,20	86,00	1022,76	8,63	4,30
17	0,00	87,83	1022,74	8,23	3,27
18	0,00	86,50	1022,65	8,27	3,07
19	0,00	85,50	1022,29	8,19	3,30
20	2,00	89,50	1022,08	8,27	3,08
21	1,00	88,83	1021,73	8,06	4,82
22	1,60	88,67	1020,97	8,23	4,25
23	1,00	88,50	1020,55	8,41	5,50
02-dic					
0	2,6	86,66666667	1020,513333	7,66	7,733333333
1	1,6	89,33333333	1020,225	7,01	8
2	0,2	87,16666667	1020,328333	6,803333333	5,666666667
3	0	88,66666667	1020,503333	7,336666667	5,466666667

Seleccionar campos para agregar al informe:

Buscar

- ☒ Instante lectura
- ☐ Brillo do Ceo Nocturno
- ☒ Chuvia
 - ☐ Desviación típica da dirección do vento a 2m
 - ☐ Desviación típica da velocidade do vento a 2m
 - ☐ Dirección do refacho a 2m
- ☒ Dirección do vento a 2m
 - ☐ Horas humidade foliar
 - ☐ Humidade do solo
- ☒ Humidade relativa media a 1.5m
- ☐ Presión
- ☒ Presión reducida
 - ☐ Refacho a 2m
 - ☐ Temperatura de orballo a 1.5m
 - ☐ Temperatura do solo a -0.1m
 - ☐ Temperatura media a 0.1m
- ☒ Temperatura media a 1.5m
- ☒ Velocidade do vento a 2m
- ☒ Días

Una vez eliminadas las variables que no se corresponden con el estudio y teniendo los datos expresados por horas se procede a enfrentarlos con la concentración de radón de cada habitación.

Fecha/Hora	Concentración	Precipitaciones	Promedio de Humedad relativa media a 1.5m	Promedio de Presión	Promedio de Velocidad del viento a 10m	Promedio de Temperatura media a 1.5m
22-12-2111:35	771	0,00	73,00	1013,22	16,12	16,33
22-12-2112:35	704	0,00	72,67	1012,55	11,65	16,73
22-12-2113:35	714	0,00	67,83	1011,89	15,37	17,46
22-12-2114:35	1087	0,00	67,00	1011,46	11,45	17,51
22-12-2115:35	231	0,00	69,00	1011,16	11,52	17,38
22-12-2116:35	671	0,00	70,00	1011,12	12,15	17,29
22-12-2117:35	1078	0,00	71,00	1010,99	12,77	17,12
22-12-2118:35	1449	0,00	71,67	1010,95	13,18	17,12
22-12-2119:35	1694	0,00	72,33	1010,50	16,73	17,02
22-12-2120:35	1852	0,00	70,50	1010,35	18,62	17,39
22-12-2121:35	2363	0,00	73,83	1010,01	23,77	17,24
22-12-2122:35	2386	0,60	88,17	1010,09	21,32	16,24
22-12-2123:35	2396	0,20	100,00	1010,23	20,78	15,66
23-12-210:35	2345	1,00	100,00	1009,96	16,65	15,35
23-12-211:35	2264	0,00	100,00	1009,28	19,37	15,98
23-12-212:35	2390	9,40	100,00	1009,63	15,73	15,64
23-12-213:35	2322	8,90	100,00	1010,34	16,60	14,97
23-12-214:35	2392	0,40	100,00	1010,46	7,93	14,02
23-12-215:35	2298	0,00	100,00	1010,62	10,53	14,68
23-12-216:35	2593	0,00	100,00	1010,85	2,90	13,93
23-12-217:35	2628	0,20	100,00	1011,23	5,72	14,28
23-12-218:35	2646	0,00	100,00	1011,49	9,87	14,85
23-12-219:35	2575	0,00	100,00	1011,82	12,17	14,99
23-12-2110:35	2605	0,00	97,00	1012,09	10,48	15,73
23-12-2111:35	2525	0,00	92,67	1012,07	9,15	16,48
23-12-2112:35	2466	0,00	96,00	1011,20	9,73	16,58
23-12-2113:35	2226	0,00	78,00	1010,13	11,80	17,17
23-12-2114:35	2044	0,00	74,67	1009,70	10,75	17,02

Antes de graficar nos servimos de Notepad++ para pasar las columnas a un archivo .txt donde cambiamos las comas por puntos, para que Matlab pueda leerlo.

Por último, se carga la dirección del archivo de texto para plotearlo con Matlab.

2203	0	1015.06	5.98	50.84	11.24
2228	0	1014.85	4.52	56.95	10.75
2351	0	1014.39	5.58	58.91	9.99
2154	0	1014.49	2.9	59.97	9.98
2014	0	1014.52	3.02	60.27	10.25
1828	0	1014.68	6.47	60.87	9.92
1634	0	1014.48	8.87	60.87	10.40
1518	0.25	1014.25	8.3	60.67	10.81
1334	0.18	1014.49	6.43	60.79	11.04
1154	0.92	1014.47	1.4	61.39	10.54
1184	1.45	1014.17	5.5	61.66	10.88
1115	0.93	1014.09	4.8	61.86	10.96
1275	0.92	1014.43	6.1	61.86	11.36
1138	0.2	1014.92	4.7	61.96	11.94
1153	0	1015.2	6.2	62.26	11.74
1105	0	1015.92	5.3	62.55	11.80
1021	0.14	1016.73	4.3	62.45	11.69
1055	0.02	1017.52	3.3	62.45	11.98
1008	0.03	1018.33	2.3	62.45	11.82

Figura 0-1 Ejemplo de documento de texto para ser procesado

ANEXO II: FUNCIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

```
function transformadaFourier(signal,frecMuest)

%[outputArg1,outputArg2] = transformadaFourier(signal,frecMuest)

%   Calcula la transformada de fourier de una señal discreta dada por sus
%   valores en el vector signal, lo representa en un plot y entresaca los
%   valores máximos haciendo un histograma.

% Longitud del vector señal.

n=length(signal);

% generación del vector de tiempos

T=1/frecMuest;

t=(0:n-1)*T;

% Representación de la señal en el dominio del tiempo

subplot(2,1,1);

plot(t,signal)

grid on

title('Señal en el dominio del tiempo')

xlabel('t (s)')

ylabel('Densidad de desintegración (Bqm^-^3)')

% Transformada de la señal (generación de los valores de la función en el
% dominio de la frecuencia)

Y=fft(signal);

% Valores en el espectro de frecuencias

P2=abs(Y/n);
```

```
P1=P2(1:n/2+1);

P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);

% Vector de frecuencias

f=frecMuest*(0:(n/2))/n;

subplot(2,1,2);

plot(f,P1)

title('Espectro de la frecuencia de la señal X(t)')

grid on

xlabel('f (Hz)')

ylabel('|P1(f)|')

end
```

Published with MATLAB® R2017b

ANEXO III: IMÁGENES DE LAS HABITACIONES DEL EDIFICIO DE INVESTIGACIÓN DEL CUD

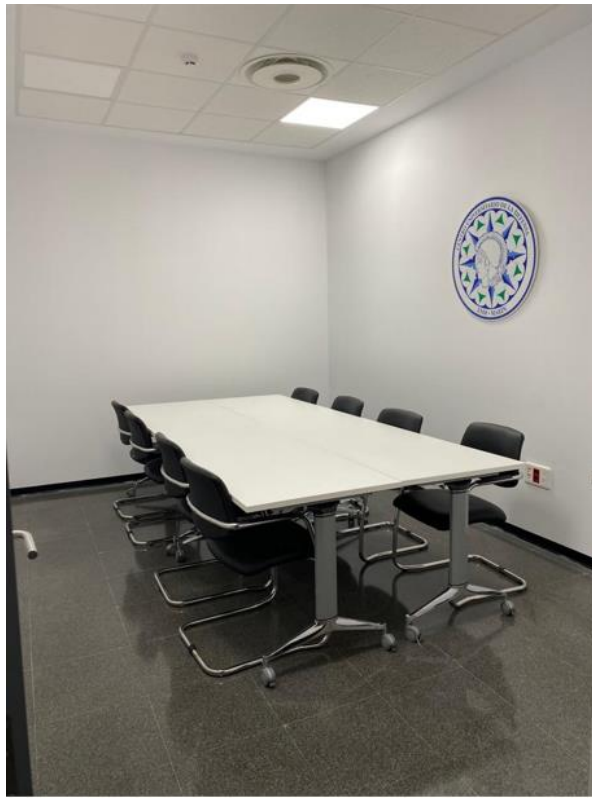


Figura 0-1 Vista general de la Sala de Reuniones



Figura 0-2 Imágenes del Aula Multiusos

ANEXO IV: GRÁFICAS DE LA CONCENTRACIÓN FRENTE A VARIABLES METEOROLÓGICAS SIN NORMALIZAR

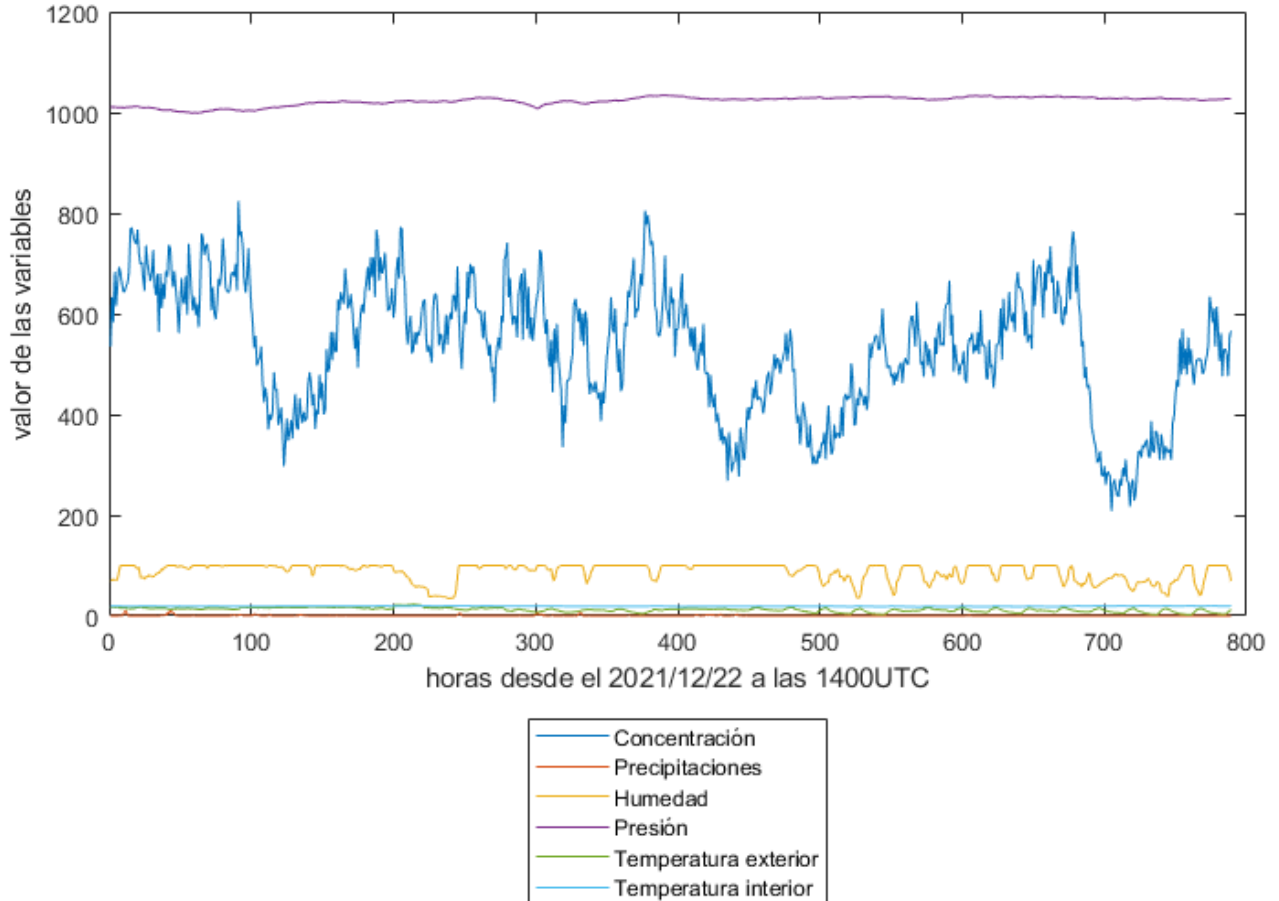


Figura 0-1 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Aula Multiusos

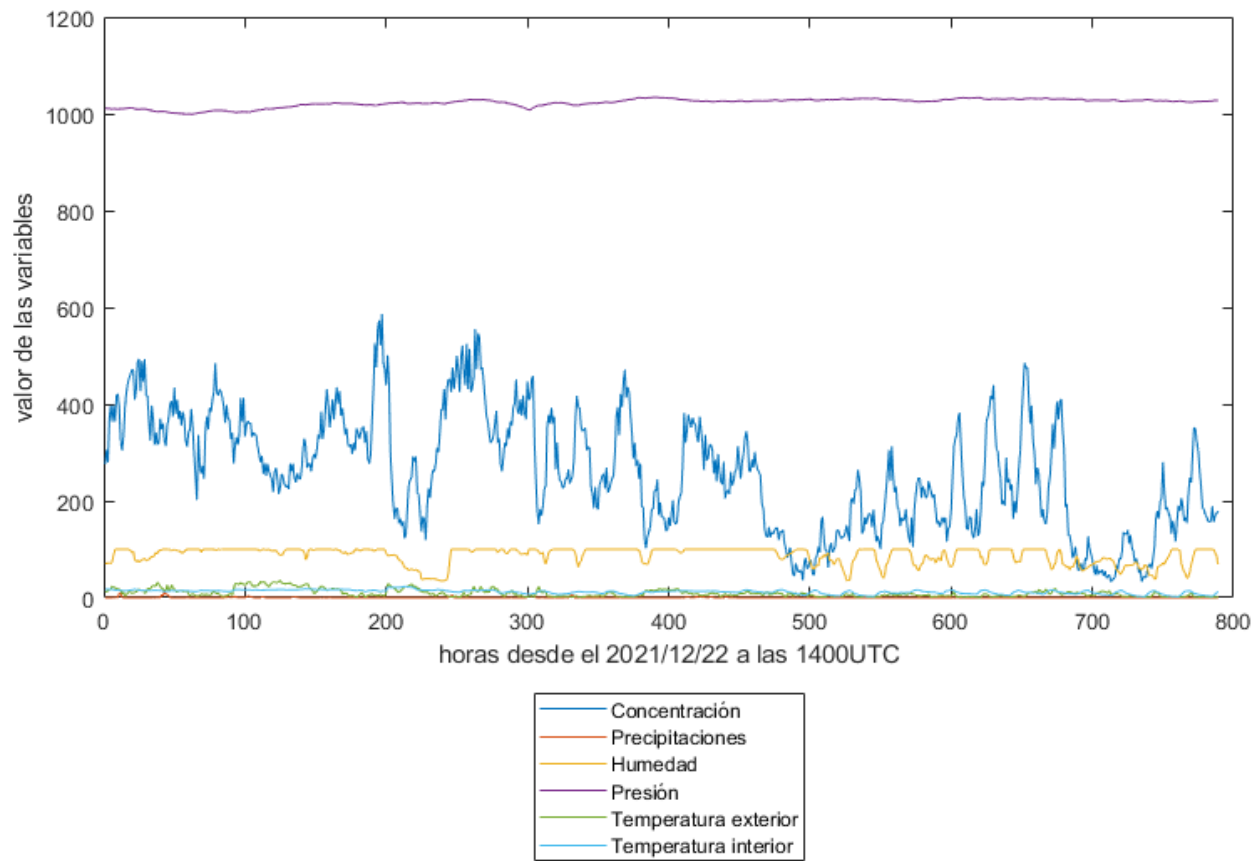


Figura 0-2 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en la Sala de Reuniones

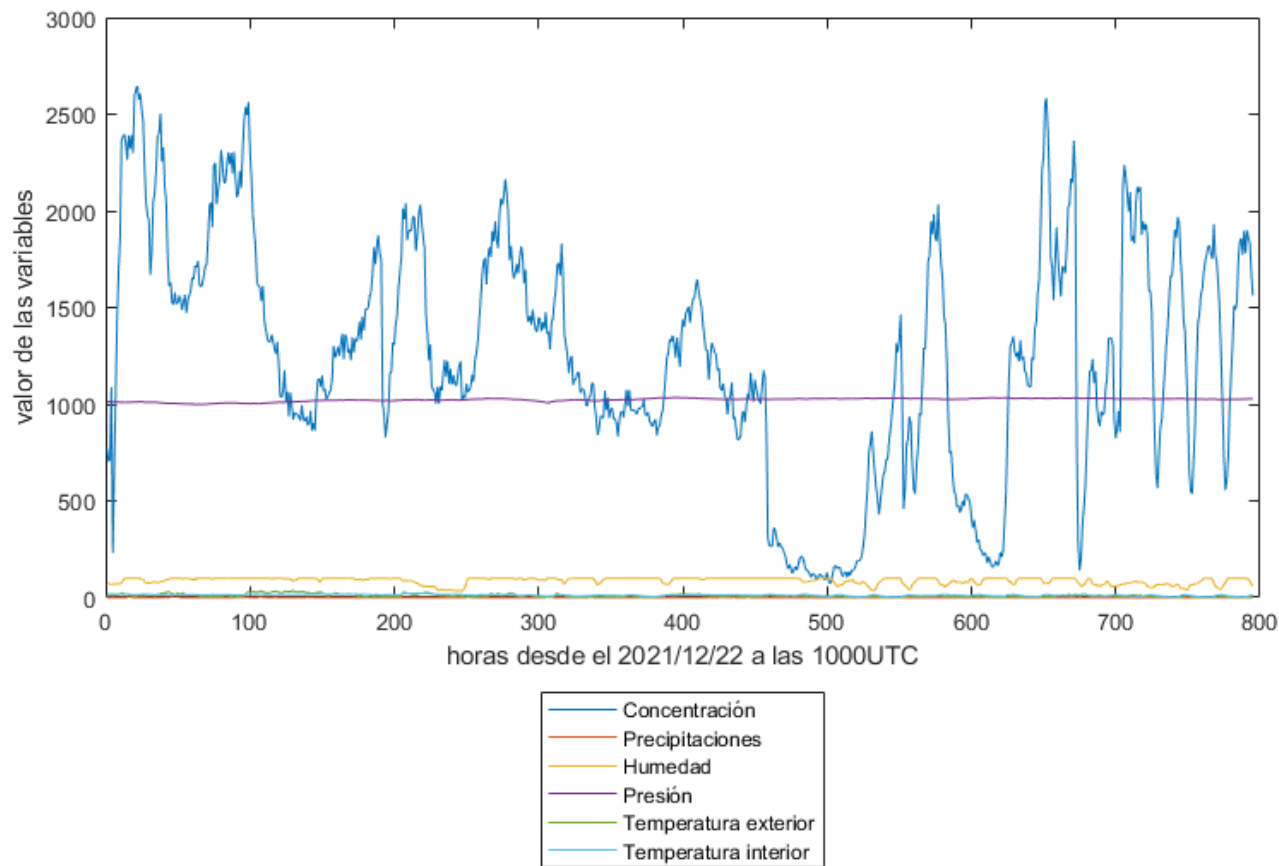


Figura 0-3 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Despacho 114

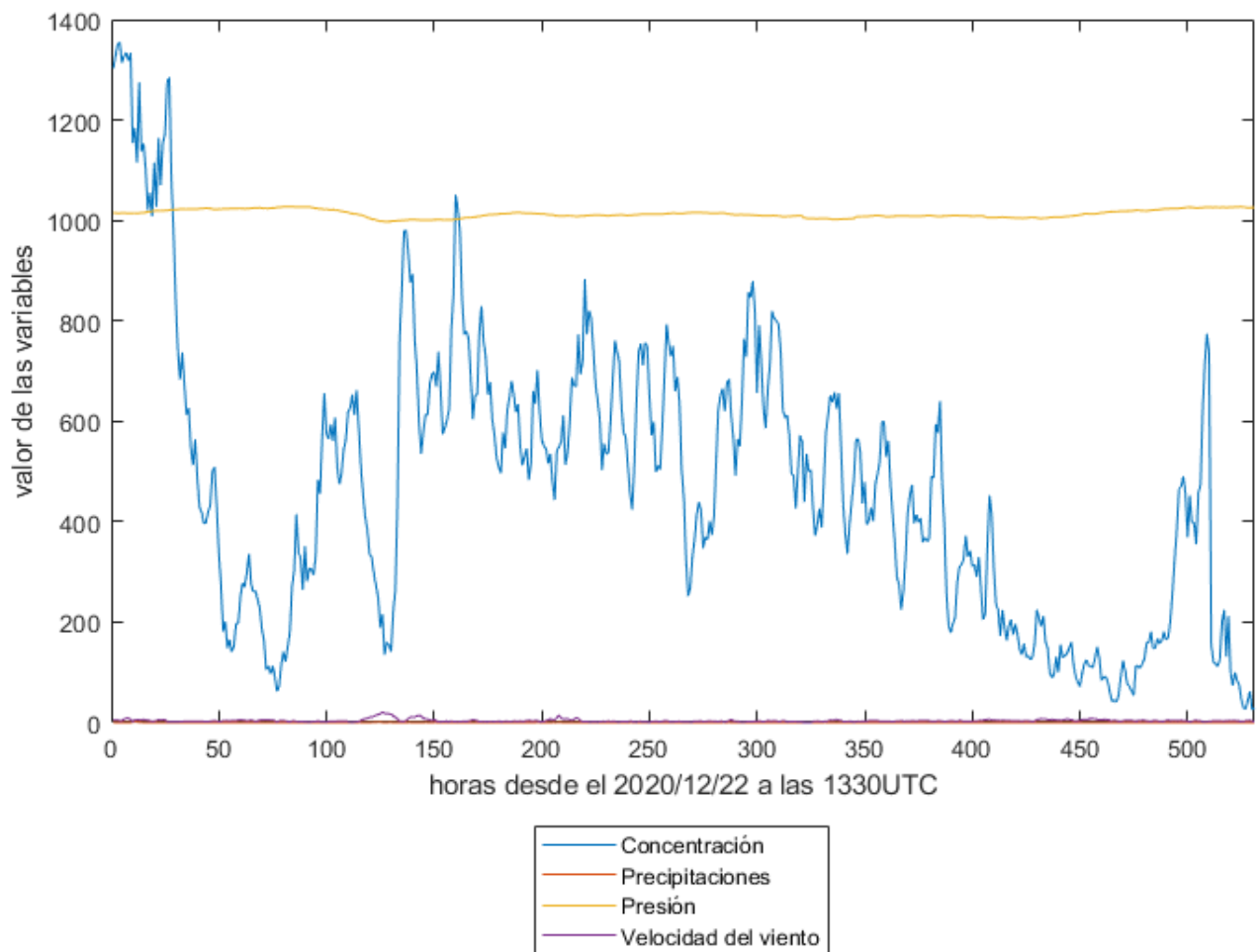


Figura 0-4 Gráfica de la densidad de desintegración frente a variables meteorológicas en el Aula 21 (Enero de 2021)

ANEXO V: JUSTIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

En el presente Anexo se tratará de justificar de manera breve la elección de la metodología de correlación empleada.

Como se expone en la teoría, el método de correlación de Pearson es de carácter paramétrico, es decir, está pensado para variables que se distribuyan según la normal. Por este motivo, en las tablas que se presentan a continuación se puede ver la comparación entre los resultados del coeficiente de correlación de Pearson y Spearman, así como su p-valor.

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	0,160	0,380	-0,160	-0,090	0,250
Despacho 114	0,098	0,107	-0,420	0,242	-0,198
Multiusos	0,115	0,255	-0,317	0,190	0,129
Reuniones	0,157	0,370	-0,450	0,170	0,380

Tabla 0-1 Coeficiente de correlación de Pearson

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	1,48E-04	3,30E-20	2,05E-04	2,98E-02	4,60E-09
Despacho 114	5,80E-03	2,60E-03	2,52E-35	5,11E-12	1,74E-08
Multiusos	1,20E-03	3,25E-13	8,42E-20	3,73E-08	2,84E-04
Reuniones	9,54E-06	5,62E-27	6,51E-42	1,45E-06	3,43E-28

Tabla 0-2 P-valor correspondiente al coeficiente de correlación de Pearson

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	0,164	0,385	-0,160	0,094	0,252
Despacho 114	0,104	0,101	-0,335	0,252	0,204
Multiusos	0,089	0,229	-0,228	0,127	0,173
Reuniones	0,282	0,377	-0,480	0,176	0,390

Tabla 0-3 Coeficiente de correlación de Spearman

	Precipitaciones	Humedad rel.	Presión	V. Viento	Temperatura ext
Aula 21	1,97E-04	3,29E-20	2,06E-4	0,03E-01	4,62E-11
Despacho 114	3,16E-03	4,24E-03	2,50E-22	4,61E-13	6,45E-09
Multiusos	1,20E-02	6,26E-11	7,90E-11	3,46E-04	9,60E-07
Reuniones	6,83E-16	4,40E-28	6,68E-47	6,43E-07	3,88E-30

Tabla 0-4 P-valor correspondiente al coeficiente de correlación de Spearman

A continuación, se exponen la distribución de los datos de concentración respecto a la distribución normal en cada habitación.

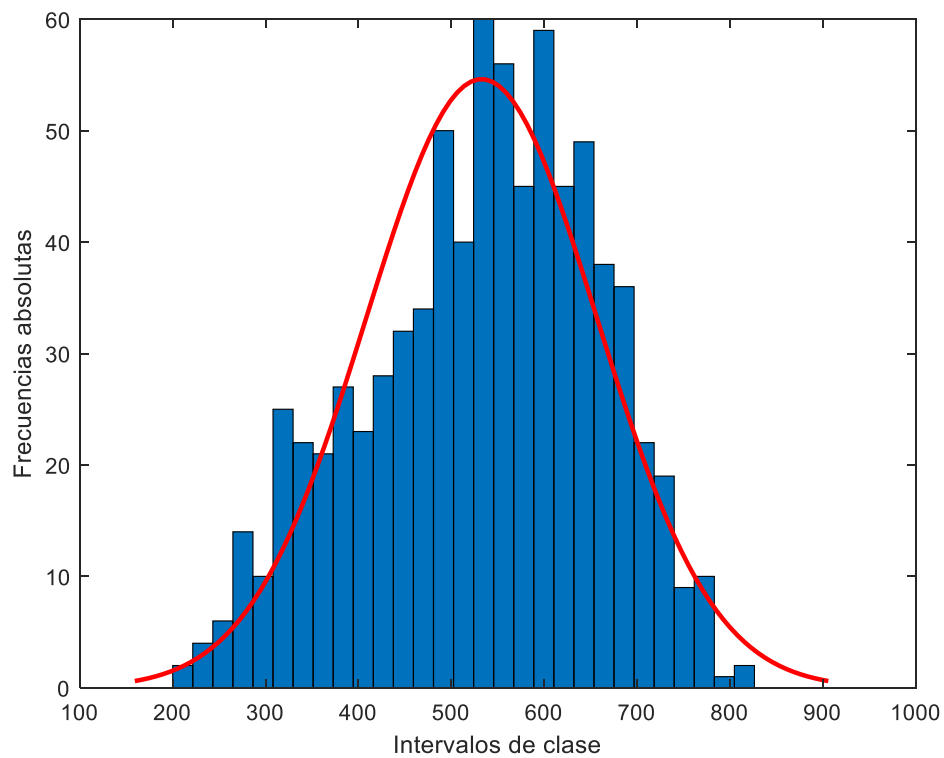


Figura 0-1 Histograma frente a distribución normal en el Aula Multiusos

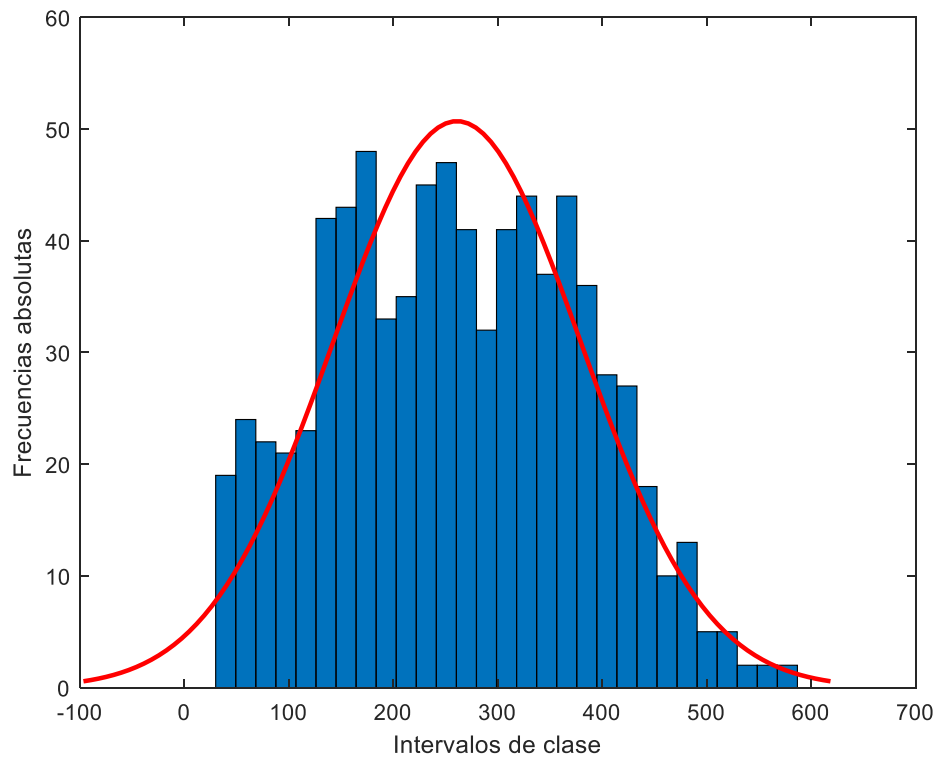


Figura 0-2 Histograma frente a distribución normal en la Sala de Reuniones

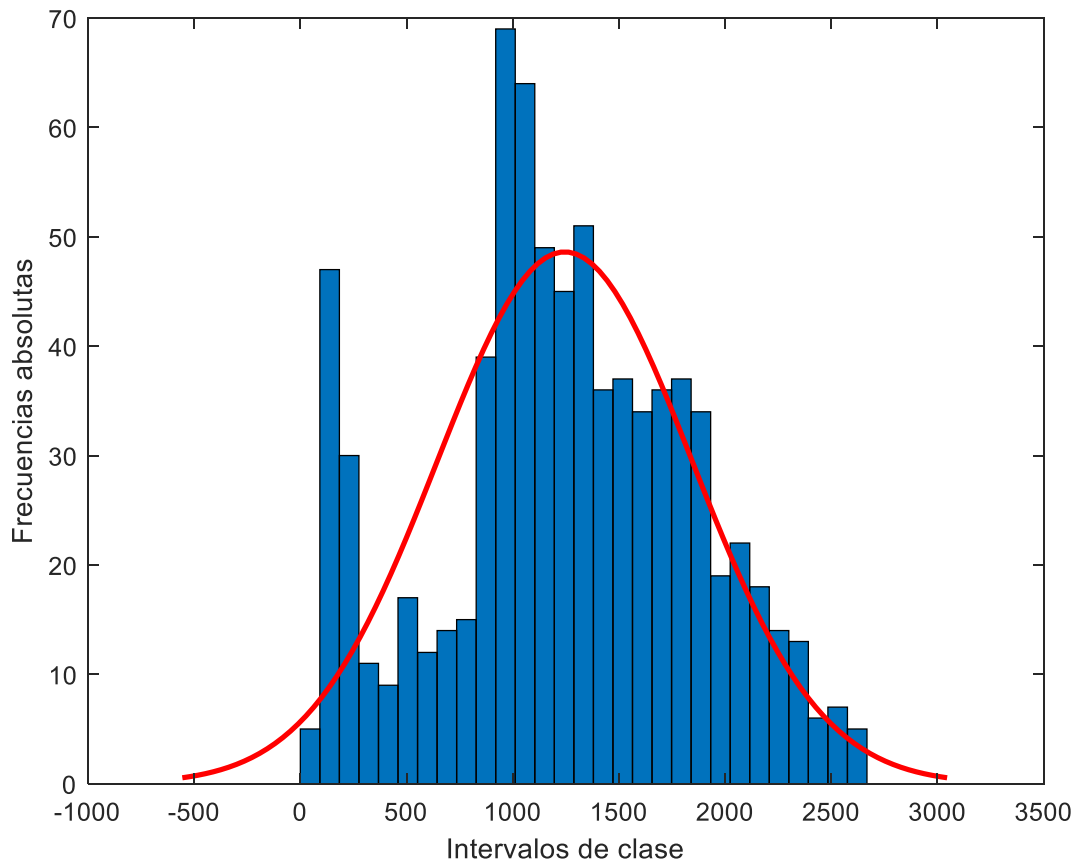


Figura 0-3 Histograma frente a distribución normal en el Despacho 114

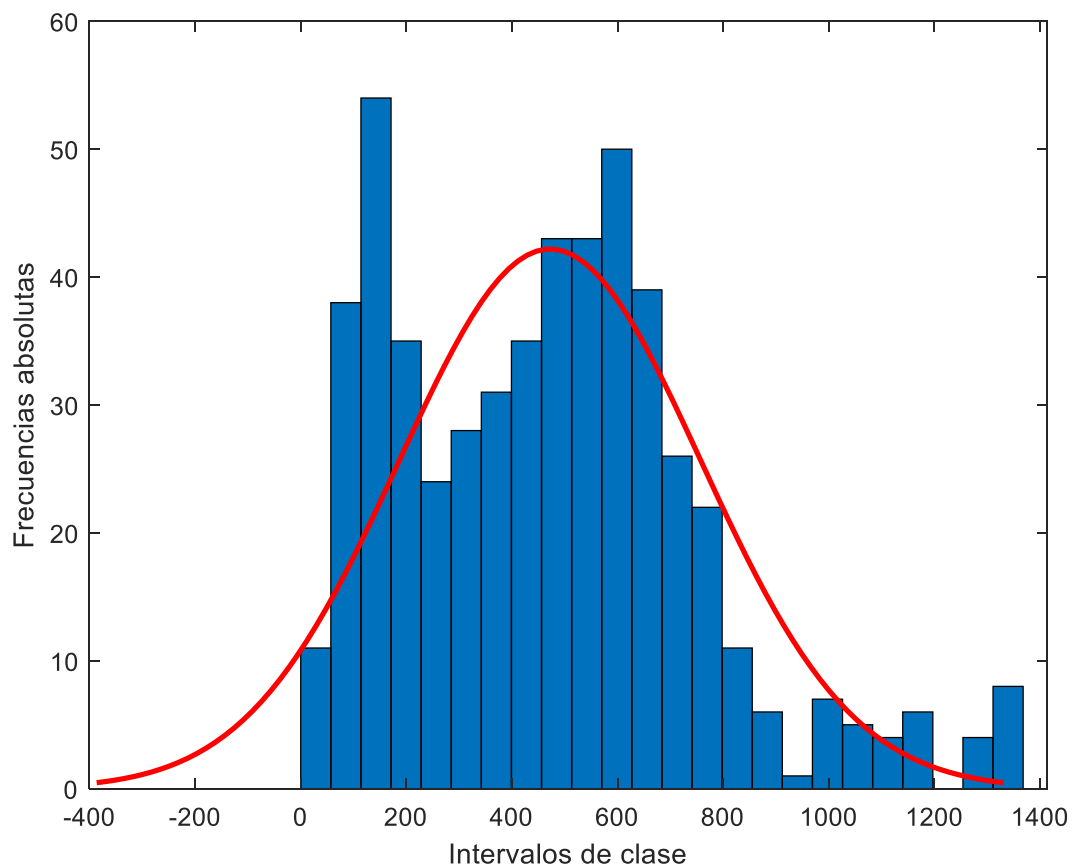


Figura 0-4 Histograma frente a la distribución normal en el Aula 21 (diciembre 2020 – enero 2021)

Si se presentan los histogramas de las distintas variables meteorológicas frente a la distribución normal se obtienen las siguientes gráficas:

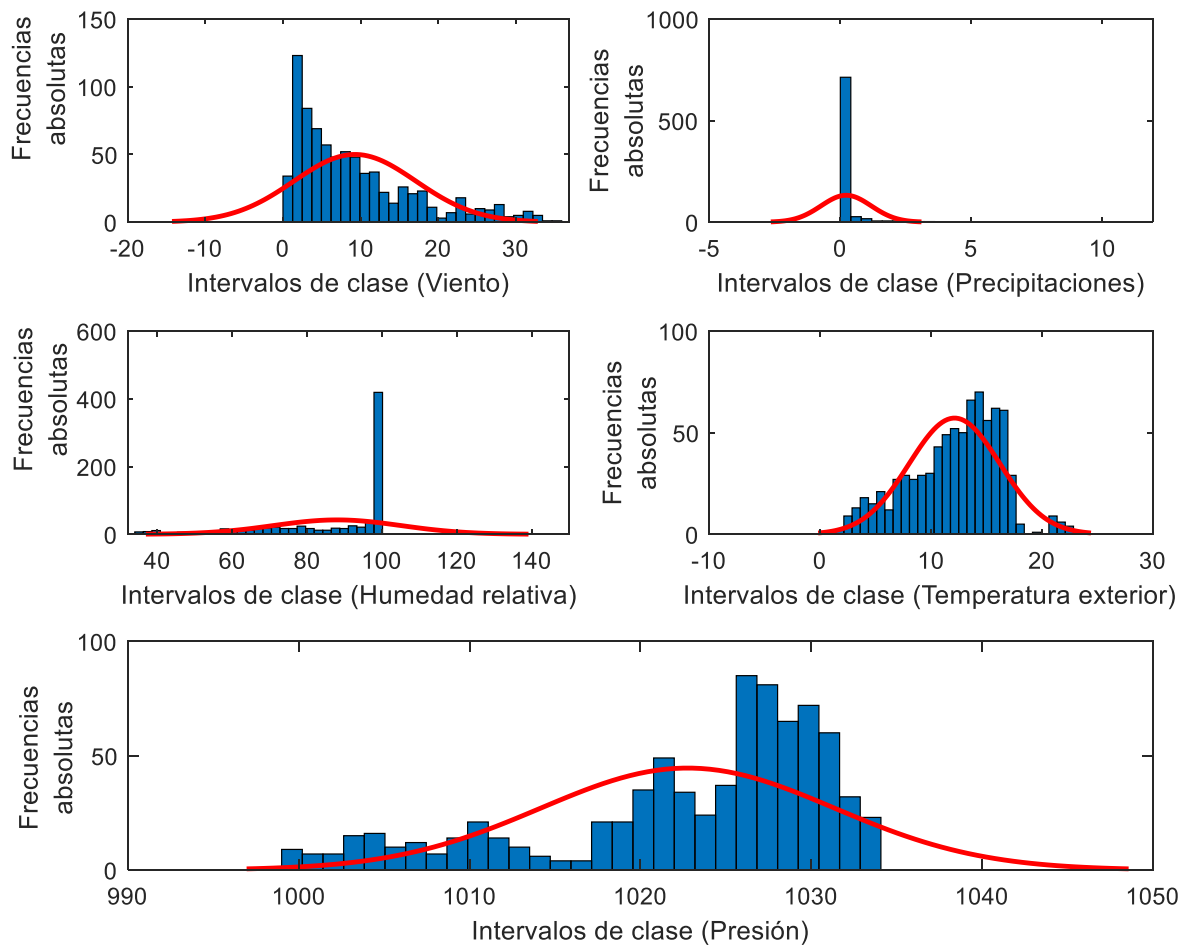


Figura 0-5 Histogramas de las distintas variables meteorológicas frente a distribución normal

Con todo lo expuesto se puede concluir que al no estar todas las variables que intervienen en el análisis de correlación distribuidas según la normal, la metodología a utilizar ha de ser de carácter no paramétrico. Por tanto, en este estudio para llevar a cabo el análisis de correlación se utilizará el coeficiente de Spearman.