



**Universidad Zaragoza**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA. ÁREA DE FÍSICA  
ATÓMICA, MOLECULAR Y NUCLEAR

TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

**Estudio de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  en aire**

---

*Andrés Herrero Alcaide*

Dirigido por:  
Susana Cebrián Guajardo  
Carmen Pérez Marín



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>3. Desarrollo y resultados: Determinación de la concentración de la actividad de <math>{}^7Be</math> en aire</b>	<b>3</b>
3.1. Equipos de medida . . . . .	5
3.2. Calibración en energía . . . . .	6
3.3. Calibración en eficiencia . . . . .	7
3.4. Concentración de la actividad de ${}^7Be$ . . . . .	9
<b>4. Desarrollo y resultados: Análisis de relaciones de la actividad de <math>{}^7Be</math> con distintos parámetros</b>	<b>12</b>
4.1. Correlación con parámetros geográficos . . . . .	14
4.1.1. Comprobación de la distribución normal en estaciones españolas . .	14
4.1.2. Dependencias con la latitud, longitud y altura . . . . .	15
4.2. Análisis de las variaciones estacionales . . . . .	17
4.2.1. Actividad media por estación del año en localizaciones españolas . .	18
4.2.2. Cuantificación de la variación entre verano e invierno . . . . .	20
4.3. Dependencia temporal con el ciclo solar . . . . .	22
4.3.1. Parámetros de correlación . . . . .	23
<b>5. Conclusiones</b>	<b>26</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>28</b>
<b>A. Distribución de las actividades de <math>{}^7Be</math> medidas de las estaciones españolas</b>	<b>30</b>
<b>B. Evolución temporal de la actividad media de <math>{}^7Be</math> por estación del año en localizaciones españolas</b>	<b>32</b>
<b>C. Código en Python</b>	<b>34</b>

# 1. Introducción

El Consejo de Seguridad Nacional (CSN) [1], que es el único organismo competente en España en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, tiene como objetivo proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, consiguiendo que las instalaciones nucleares y radiactivas sean operadas por los titulares de forma segura, y estableciendo las medidas de prevención y corrección frente a emergencias radiológicas, cualquiera que sea su origen. Cuenta con una Red de Vigilancia Radiológica Ambiental (REVIRA) cuyo objetivo es tener un detallado conocimiento sobre los niveles de la radiactividad del aire, agua, alimentos básicos como la leche y del suelo. REVIRA está formada por una Red de Estaciones de Muestreo (REM) y por una Red de Estaciones Automáticas (REA), distribuidas por distintos puntos del país [2]. La REM de Zaragoza está gestionada por el Laboratorio de Bajas Actividades (LABAC) [3] de la Universidad de Zaragoza.

El  ${}^7\text{Be}$  es un isótopo radiactivo natural de origen cosmológico de vida media corta ( $T_{1/2} = 53,3$  d), que se forma por la interacción de los rayos cósmicos con los constituyentes de la atmósfera a través de reacciones de espalación<sup>1</sup> con núcleos ligeros como el nitrógeno, el oxígeno o el carbono. En dicho proceso de espalación, los núcleos mencionados absorben protones y neutrones generando elementos como el  ${}^7\text{Be}$  [4].

El ciclo solar, la atmósfera y los campos magnéticos son las tres causas principales de la variación de la concentración de  ${}^7\text{Be}$ , siendo el ciclo solar la más significativa. La concentración de  ${}^7\text{Be}$  depende de las reacciones que desencadenan los rayos cósmicos, por lo que un aumento de éstos se traduce en un aumento de la concentración. La mayor intensidad de los rayos cósmicos está ligada con la actividad solar, más concretamente con una disminución de ella [4]. La atmósfera y los campos magnéticos tienen el efecto contrario que la disminución de la actividad solar, es decir, reducen la cantidad de rayos cósmicos que llegan a la superficie. Esta reducción presenta una dependencia latitudinal, siendo mayor en los polos y menor en el ecuador, y es la motivación principal para realizar un estudio de la concentración de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  en función de distintos parámetros geográficos.

---

<sup>1</sup>Proceso en el cual un núcleo emite neutrones al ser golpeado por una partícula altamente energética, lo cual resulta en una reducción de su peso atómico.

En estudios anteriores se han analizado diferentes dependencias del  ${}^7\text{Be}$  en algunas estaciones españolas, como es el caso de [5], en el que se analizan 4 estaciones diferentes o de [4], en el que se lleva a cabo un estudio en el norte de España. Existen también otros estudios en los que se analizan estaciones europeas, como [6] y [7]. Se ha tratado en este trabajo de comprobar y ampliar las relaciones y conclusiones establecidas en los estudios mencionados así como seguir avanzando con lo expuesto en [8].

## 2. Objetivos

En este trabajo se presenta, en una primera parte, la determinación de la concentración de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  con las muestras de aire recogidas por la Estación de Muestreo de Zaragoza durante varios meses de 2020 y 2021.

En la segunda parte del trabajo se realiza el estudio de la variación de concentración de actividad de  ${}^7\text{Be}$  en función de diversos parámetros geográficos, estacionales o relacionados con el ciclo solar, utilizando los datos históricos de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  ofrecidos por el CSN [2] y por el JRC (Joint Research Centre) Data Catalogue [9].

## 3. Desarrollo y resultados: Determinación de la concentración de la actividad de ${}^7\text{Be}$ en aire

En la primera parte del trabajo se ha cuantificado la actividad de  ${}^7\text{Be}$  en el aire de Zaragoza por espectroscopia gamma utilizando las medidas realizadas en el LABAC con un detector de germanio en los filtros expuestos en Zaragoza. Cada semana se expone un filtro que captura aerosoles, y con ellos, isótopos presentes en el aire como es el caso de  ${}^7\text{Be}$ , para su posterior medida. En esta sección se presenta en primer lugar, el equipo de medida utilizado en la Sección 3.1, después los procesos de calibración en energía y eficiencia del detector (Secciones 3.2 y 3.2) y finalmente se presentan los resultados en la determinación de la actividad (Sección 3.4).

Como se muestra en la Figura 1, el  ${}^7\text{Be}$  se desintegra por captura electrónica al  ${}^7\text{Li}$  en un 89.56 % de las veces al estado fundamental, y en el 10.44 % restante al estado excitado con una energía de 477,6 keV. Cuando un isótopo se desintegra a un núcleo en un

estado excitado, el núcleo hijo emite uno o varios fotones de energías definidas con cierta probabilidad para pasar a su estado fundamental. Este hecho es el fundamento de la espectroscopia gamma [10], ya que al medir esos fotones con un detector de radiación puede cuantificarse el número de desintegraciones producidas. Los sucesos correspondientes a la absorción de los fotones seguirán una distribución normal (campana de *Gauss*) para cada una de las energías. Es por esto por lo que se aprecia en los espectros de energía medida en un detector la aparición de muchos picos que se corresponden con diferentes isótopos. El área de estos picos es proporcional al número de fotones emitidos. El análisis de las emisiones y de los espectros en este trabajo se ha realizado con el programa ArsSpectra, un código desarrollado por la Universidad de Zaragoza.

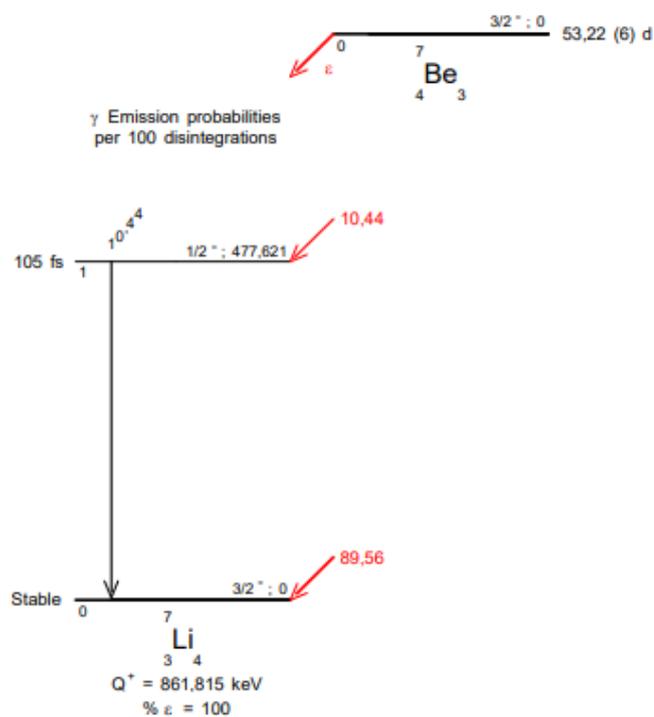


Figura 1: Esquema de desintegración de  $^{7}\text{Be}$  en el que se pueden apreciar las probabilidades de las transiciones al estado excitado y al estado fundamental del  $^{7}\text{Li}$  obtenido de [11].

### 3.1. Equipos de medida

Los detectores de germanio son capaces de detectar las emisiones  $\gamma$  y se basan en una polarización inversa PIN. La principal diferencia de esta unión con la PN es la introducción de un semiconductor intrínseco, que en el caso de los detectores en cuestión se trata de germanio. El funcionamiento de estos detectores se basa en aprovechar la ionización que produce la radiación en la materia. Al incidir la radiación en la zona del germanio, se produce una cesión de energía a los electrones de la banda de valencia por parte del germanio y, si ésta es suficiente, los electrones promocionarán a la banda de conducción. La consecuencia directa de este hecho es la aparición de pares electrón-hueco (en número proporcional a la energía depositada) en la zona de transición que son acelerados si se aplica un campo y captados por los electrodos por lo que se detecta un pulso de corriente que es proporcional a la energía de la radiación detectada. Una de las ventajas de los detectores de germanio para la espectroscopia gamma es su excelente resolución en energía, que les permite distinguir emisiones muy próximas [12].

En un detector de radiación las señales eléctricas generadas en la cadena electrónica que lo acompaña son proporcionales a la energía recogida, de manera que puede obtenerse la distribución de los eventos registrados en los denominados canales, según el tamaño de esas señales. De esta manera, para poder determinar qué energía posee cada una de las emisiones que aparecen en un espectro hay que realizar una calibración que relacione los canales con la energía a través de un ajuste lineal. La eficiencia de detección indica la probabilidad de detectar, a una energía dada, una cierta radiación, y es necesaria para poder deducir el número de fotones emitidos a partir de los sucesos detectados. La eficiencia de un detector tiene una dependencia con la energía, que puede modelarse por ejemplo con un polinomio; esta relación da la calibración en eficiencia de un detector. De modo que vamos a determinar el ajuste en energía y la eficiencia para los distintos isótopos en nuestro sistema de detección, un detector coaxial de germanio (GR3520 de Canberra) acompañado de un amplificador y un convertidor analógico-digital, situado dentro de un blindaje de 15 *cm* de plomo, operado en las instalaciones del LABAC en la Facultad de Ciencias, al que se hará referencia como G1.

## 3.2. Calibración en energía

Para la calibración en energía se realiza la medida de una fuente radiactiva de actividad certificada que emite rayos gamma de energía conocida y se asignan las posiciones de los picos con la energía, que consiste en un filtro preparado con isótopos de concentración conocida. Esta fuente contiene cuatro isótopos radiactivos:  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$  con quince emisiones comprendidas en el rango de  $81\text{ keV}$  y  $1408\text{ keV}$  como se puede ver en la Tabla 1. Tal y como se ha explicado antes, se puede asumir una relación lineal entre la energía y el canal donde aparece el pico de la correspondiente emisión, es decir:

$$E(\text{keV}) = \text{canal} \cdot m + n \quad (1)$$

Conviene realizar un primer ajuste con la medida de nuestra fuente de calibración, al que nos podemos referir como precalibración. Esto consiste en elegir dos emisiones de energía del espectro correspondientes a isótopos conocidos, fácilmente identificables porque existe una diferencia grande entre sus picos y los del resto, como es el caso de las de  $^{137}\text{Cs}$  y las del  $^{152}\text{Eu}$ , que poseen energías de  $661,6\text{ keV}$  y  $1407,9\text{ keV}$  respectivamente. Con estos dos pares de canal y energía se puede obtener por tanto la precalibración, llegando a la siguiente expresión:

$$E(\text{keV}) = \text{canal} \cdot 0,66866 - 0,35501 \quad (2)$$

Esta relación se puede introducir en el programa ArsSpectra y así obtener la energía que se corresponde con cada canal y por tanto averiguar a qué emisiones e isótopos de la fuente corresponden los demás picos. Con el programa tenemos la opción de realizar un ajuste gaussiano a cada uno de los picos que nos proporciona el canal central, el área, la anchura a media altura y sus incertidumbres, así como algunos datos estadísticos más como el test  $\chi^2$ . Así, se realiza un ajuste lineal, como se muestra en la Figura 2, en el que se incluyen todas las emisiones de la fuente utilizada, que sigue la ecuación:

$$E(\text{keV}) = \text{canal} \cdot (0,6668704 \pm 0,0000035) - (0,3743 \pm 0,0042) \quad (3)$$

El espectro de energía obtenido en la medida con la fuente con el detector G1 para obtener su calibración en energía se muestra en la Figura 3.

### 3.3. Calibración en eficiencia

La eficiencia determina la relación entre los fotones absorbidos a una determinada energía y los fotones emitidos por la fuente a esa misma energía.

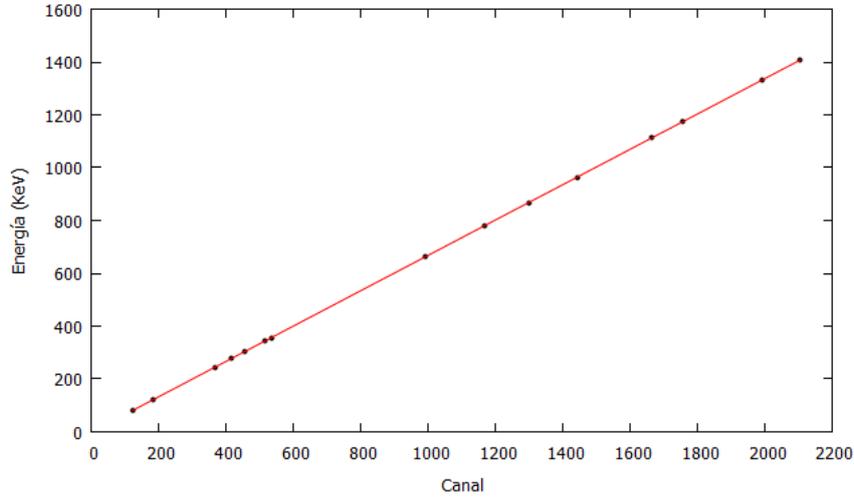


Figura 2: Calibración en energía del detector G1 utilizando el patrón de filtro en la que se aprecia el ajuste presentado en la Ecuación 3.

Para poder determinarla es necesario disponer de una fuente patrón (que es la misma que la usada en la calibración en energía) para la que se ha certificado la actividad de un isótopo o el ritmo de fotones emitidos a distintas energías; para la fuente utilizada en el trabajo se dispone de un certificado emitido por el CIEMAT el 1 de julio de 1995. De esta manera, la eficiencia viene determinada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{A/t_m}{\gamma_{ps}e^{-\lambda t}} \quad (4)$$

donde A es el área del pico de absorción,  $t_m$  es el tiempo de medida con la fuente patrón (en este caso 7200 s (2 h) para las calibraciones,  $\lambda$  es la constante de desintegración radiactiva que produce la emisión,  $\gamma_{ps}$  es el número de fotones emitidos por segundo y t es el tiempo que ha transcurrido desde la fecha en la que se establecieron los patrones hasta el día de la medida (20 de Julio de 2020), que es 25,07 años ( $7,90 \cdot 10^8$  s). Los resultados para las eficiencias en cada energía usando la Ecuación 4 se pueden ver en la Tabla 1.

Conocida la eficiencia para ciertas energías, se puede extrapolar a todas ellas a través

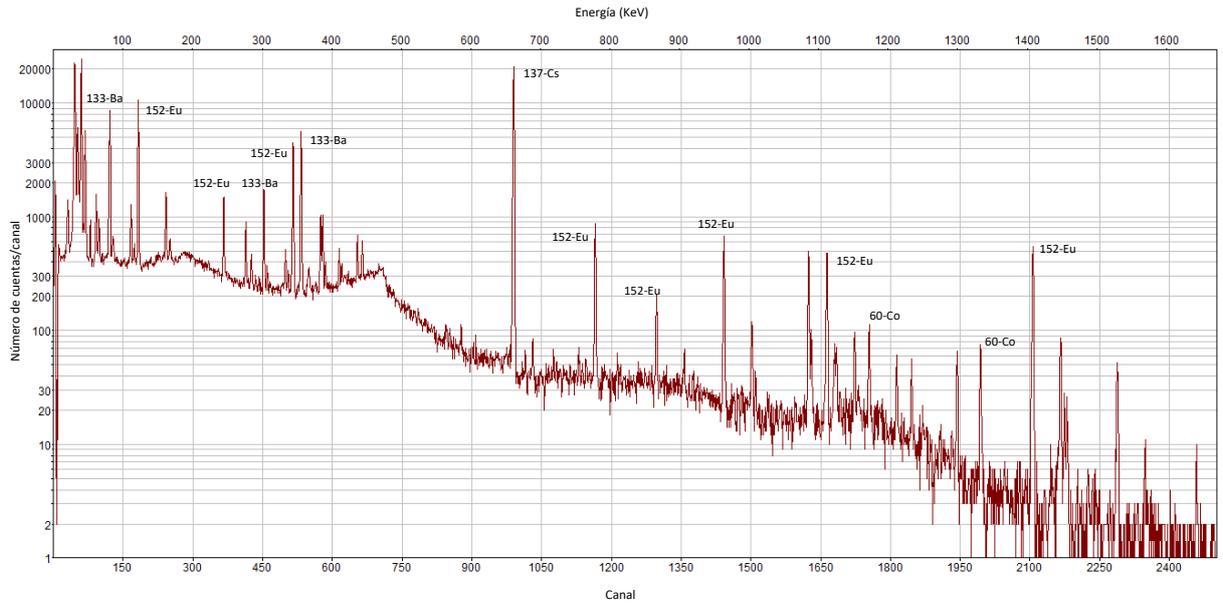


Figura 3: Espectro de energía obtenido en la medida con la fuente con el detector G1. Se pueden apreciar las emisiones de la fuente junto con el isótopo y la energía que les corresponden.

de un ajuste polinómico:

$$\varepsilon = aE^3 + bE^2 + cE + d \quad (5)$$

donde  $a, b, c$  y  $d$  son constantes a determinar a través del ajuste. Esta dependencia es típica de los detectores de germanio.

El error que se presenta en la eficiencia ha sido calculado mediante propagación de errores, haciendo uso de la expresión que permite estimar la incertidumbre en una magnitud  $f(x,y)$  a partir de las de dos variables independientes  $x$  e  $y$ :

$$\sigma_f^2 = \left( \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 \quad (6)$$

sobre la Ecuación 4, incluyendo las incertidumbres del área y del ritmo de fotones emitidos.

En la Figura 4 se representan los resultados obtenidos mostrados en la Tabla 1 para la

eficiencia en función de la energía en el detector G1. La ecuación que rige el ajuste que se muestra en la Figura 4 es:

$$\varepsilon_{G1} = -(1,94 \pm 0,45) \cdot 10^{-10} E^3 + (5,44 \pm 0,95) \cdot 10^{-7} E^2 - (4,90 \pm 0,62) \cdot 10^{-4} E + (0,16 \pm 0,01) \quad (7)$$

E(keV)	Isótopo	Centro	$\lambda$ ( $10^{-2}$ ) ( $y^{-1}$ )	$\gamma_{ps}$ ( $s^{-1}$ )	$\gamma_{ps}$ actuales ( $s^{-1}$ )	Área( $10^3$ ) (cuentas)	$\varepsilon$ ( $10^{-2}$ )
81	$^{133}Ba$	121,45	6,60	108 (5,3)	$20,64 \pm 1,09$	$19,33 \pm 0,23$	$13,01 \pm 0,04$
121,8	$^{152}Eu$	182,63	5,21	99 (6)	$26,80 \pm 1,61$	$22,93 \pm 0,24$	$11,88 \pm 0,16$
244,7	$^{152}Eu$	366,53	5,21	23,7 (7)	$6,42 \pm 0,45$	$2,95 \pm 0,10$	$6,40 \pm 0,21$
276,4	$^{133}Ba$	413,9	6,60	21,1 (6,8)	$4,03 \pm 0,27$	$1,46 \pm 0,13$	$5,02 \pm 0,06$
302,7	$^{133}Ba$	453,47	6,60	53,8 (4,8)	$10,28 \pm 0,49$	$3,74 \pm 0,11$	$5,06 \pm 0,06$
344,3	$^{152}Eu$	515,41	5,21	90,8 (3)	$24,58 \pm 0,74$	$10,59 \pm 0,17$	$5,98 \pm 0,16$
355,9	$^{133}Ba$	532,94	6,60	184 (5,1)	$49,81 \pm 1,79$	$11,84 \pm 0,18$	$4,68 \pm 0,09$
661,6	$^{137}Cs$	989,97	2,29	407 (1,9)	$228,92 \pm 4,35$	$52,21 \pm 0,33$	$3,16 \pm 0,85$
778,8	$^{152}Eu$	1165,31	5,21	44,5 (2,8)	$12,05 \pm 0,34$	$2,31 \pm 0,07$	$2,66 \pm 0,69$
867,4	$^{152}Eu$	1297,56	5,21	13,6 (4,3)	$3,68 \pm 0,16$	$0,49 \pm 0,04$	$1,88 \pm 0,16$
964	$^{152}Eu$	1442,13	5,21	52,4 (4,4)	$14,19 \pm 0,62$	$1,77 \pm 0,06$	$1,74 \pm 0,16$
1112	$^{152}Eu$	1663,44	5,21	49,8 (4,5)	$13,48 \pm 0,61$	$1,54 \pm 0,06$	$1,58 \pm 0,47$
1173,2	$^{60}Co$	1754,8	13,10	56,2 (2,6)	$2,08 \pm 0,05$	$0,26 \pm 0,03$	$1,77 \pm 0,23$
1332,5	$^{60}Co$	1993,26	13,10	56,2 (1,5)	$2,08 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,02$	$1,53 \pm 0,61$
1407,9	$^{152}Eu$	2106,08	5,21	78,6 (2,5)	$21,28 \pm 0,53$	$1,85 \pm 0,06$	$1,20 \pm 0,71$

Tabla 1: Resultados del análisis de la medida con la fuente patrón. Se muestran los valores de la energía correspondiente a cada isótopo, así como estos mismos y los valores de la constante radiactiva. Los valores del canal central y del área son los proporcionados por el programa ArsSpectra. Se muestra también el ritmo de fotones y su error porcentual (indicado entre paréntesis) que viene determinado por el certificado de la fuente y los fotones actuales, que vienen determinados por el denominador de la Ecuación 4 junto con sus incertidumbres. Por último se incluyen los valores para la eficiencia del detector G1.

### 3.4. Concentración de la actividad de $^7Be$

Antes de cuantificar la actividad de una muestra con un detector, es necesario llevar a cabo una medida de su fondo radioactivo. A pesar de que el detector cuenta con un blindaje de plomo para eliminar toda la radiación externa posible, no es capaz de suprimirla por completo. Es por esto que es necesario realizar esta medida para tenerla en cuenta a la hora de cuantificar la radiactividad del aire. Después de medir durante 60 horas, el espectro que

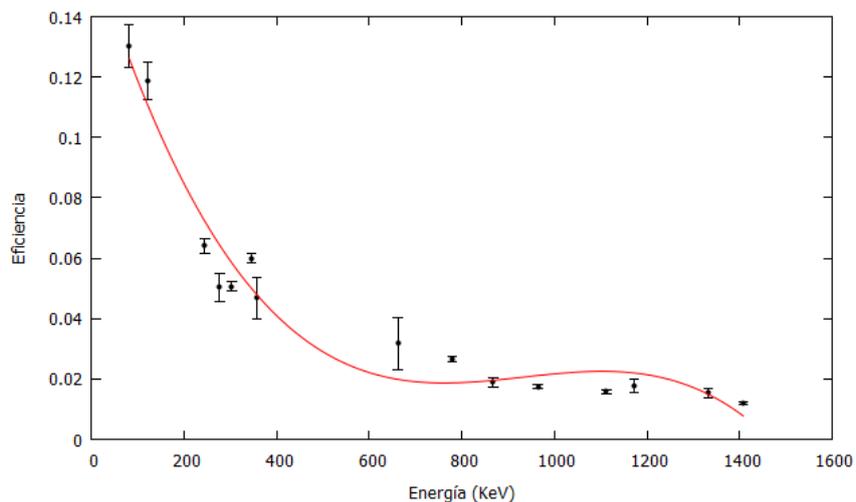


Figura 4: Valores de eficiencia deducidos de la medida con una fuente patrón y el ajuste deducido de acuerdo con la Ecuación 4.

se obtiene se resta al ya obtenido con las muestras, normalizando adecuadamente al tiempo de medida de la muestra, como se aprecia en la Figura 5. El gran pico visible en el fondo de energía  $511\text{ keV}$  se produce por la aniquilación de pares de partículas como electrones. El pico que aparece a una energía de  $46,5\text{ keV}$  corresponde con la emisión  $\gamma$  del  $^{210}\text{Pb}^2$ , se observa en los filtros y no el fondo.

Los valores de la concentración de la actividad de  $^7\text{Be}$  se presentan de manera mensual, analizándose también los filtros semanalmente. Se pueden medir todos los filtros conjuntamente en el soporte correspondiente y analizarlos en una única medida (en este trabajo se han analizado los espectros mensuales). En las sucesivas medidas que se han realizado, se han analizado los filtros mensuales comprendidos entre julio del 2020 y marzo del 2021 y en todos ellos se observa siempre un pico alrededor de  $477,621\text{ keV}$ , que se corresponde con la energía de la emisión gamma de  $^7\text{Be}$ . Un ejemplo de espectro registrado para un filtro se puede ver en la Figura 5.

Para calcular la concentración de la actividad por  $m^3$  de un cierto isótopo se hace uso de la Ecuación 8:

$$\text{Actividad}/m^3 = \frac{A_{neta}}{\varepsilon P_{\gamma} t_m V} \quad (8)$$

---

<sup>2</sup>El  $^{210}\text{Pb}$  es un isótopo natural de la cadena del  $^{218}\text{U}$ , pero su actividad no es registrada por REVIRA.

donde  $A_{neta}$  es el área neta del pico que genera una cierta emisión gamma de energía E del isótopo restando la contribución del fondo,  $\varepsilon$  es la eficiencia a esa energía determinada,  $P_\gamma$  es la probabilidad de emisión del fotón en las desintegraciones del isótopo,  $t_m$  es el tiempo de medida del detector (86400 s) y  $V$  es el volumen aspirado por el sistema de captación durante la exposición del filtro, generalmente expresado en  $m^3$ .

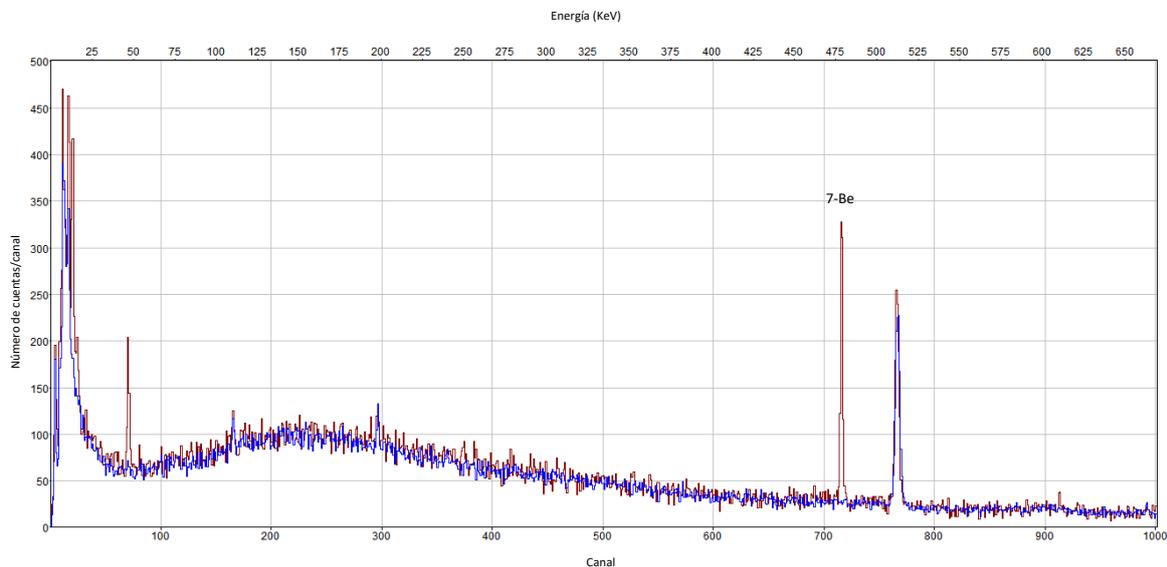


Figura 5: Espectro del detector G1 de fondo (en azul) y correspondiente a la medida del filtro expuesto en el mes de diciembre (en rojo). El espectro del fondo se ha multiplicado por una constante igual a 0,4 debido a la diferencia de tiempos de medida entre ambos espectros. Además, los dos espectros abarcan un rango de energías mayor, pero se ha limitado el rango para visualizar mejor la zona donde centramos el estudio.

La energía del  ${}^7Be$  es  $477,621 keV$  como se ha indicado previamente, por lo que la eficiencia de detección a esa energía con el detector G1 usado en las medidas de los filtros puede estimarse a partir de la calibración en eficiencia hallada, según se muestra en la Ecuación 7, obteniendo el valor de:

$$\varepsilon = 3,11 \cdot 10^{-2} \quad (9)$$

Con la eficiencia ya determinada, es sencillo obtener usando la Ecuación 8 los valores para cada mes de la actividad por  $m^3$ , recogidos en la Tabla 2. Para el cálculo de la incer-

tidumbre de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  se ha usado la Ecuación 6, propagando la incertidumbre del área.

Mes	Área (cuentas)	$V(m^3)$	$A(mBq/m^3)$
<b>JUL 2020</b>	$1644 \pm 65$	1427,771	$4,09 \pm 0,16$
<b>AGO 2020</b>	$1420 \pm 61$	1049,428	$4,81 \pm 0,21$
<b>SEPT 2020</b>	$1827 \pm 68$	1382,286	$4,70 \pm 0,18$
<b>OCT 2020</b>	$683 \pm 48$	1092,457	$2,22 \pm 0,15$
<b>NOV 2020</b>	$872 \pm 52$	1112,559	$2,79 \pm 0,17$
<b>DIC 2020</b>	$779 \pm 48$	1210,663	$2,29 \pm 0,14$
<b>ENE 2021</b>	$619 \pm 45$	1511,360	$1,46 \pm 0,11$
<b>FEB 2021</b>	$660 \pm 44$	1020,960	$2,30 \pm 0,15$
<b>MAR 2021</b>	$1389 \pm 60$	1202,065	$4,11 \pm 0,18$

Tabla 2: Resultados de la determinación mensual de la concentración de la actividad de  ${}^7\text{Be}$ . Se muestra el valor del área de cada pico, el volumen aspirado por la bomba durante la exposición del filtro y finalmente la actividad de  ${}^7\text{Be}$ .

## 4. Desarrollo y resultados: Análisis de relaciones de la actividad de ${}^7\text{Be}$ con distintos parámetros

En esta parte del trabajo se lleva a cabo la comparación de la actividad del  ${}^7\text{Be}$  con diversos parámetros: altura, altitud, longitud (Sección 4.1.2), variación estacional (Sección 4.2) y con el ciclo solar (Sección 4.3). La motivación que subyace detrás de este análisis se basa en ver si existe alguna dependencia que relacione directamente la actividad del  ${}^7\text{Be}$  con alguno de estos parámetros, para lo que se han estudiado los datos publicados por el CSN en [2] de doce estaciones españolas, (Badajoz, Ciudad Real, Ferrol, Granada, León, Málaga, Oviedo, Palma, Salamanca, Santander, Valencia y Zaragoza <sup>3</sup>), todas para las que hay datos de  ${}^7\text{Be}$  en aire, y los datos proporcionados por [9] de 282 estaciones europeas. El principal objetivo de esta parte del trabajo es aumentar a su vez el estudio del número

---

<sup>3</sup>No se ha incluido Madrid en el estudio ya que faltaban muchas medidas respecto a las demás localizaciones.

de estaciones que se habían analizado anteriormente en artículos como [5] o [6] así como seguir avanzando con lo expuesto en [8] para tratar de dar mayor solidez a las conclusiones extraídas. Por último se estudia también la dependencia de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  con el ciclo solar, para ver si existe alguna correlación con el mismo.

En la página web del CSN [2] se encuentran los datos semanales de la concentración de  ${}^7\text{Be}$  para cada estación española así como su incertidumbre, a  $2\sigma$ . Se trabaja con medidas sobre la misma actividad y las varianzas de estas medidas no son iguales, lo cual implica que no es estadísticamente válido tomar una media simple, ya que concede la misma importancia a todos los resultados. Por lo tanto la solución adecuada es calcular una media ponderada  $\bar{a}$  según [10]:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i a_i / (2\sigma_i)^2}{\sum_i (2\sigma_i)^2} \quad (10)$$

Y la incertidumbre del resultado combinado se calcula según la varianza agrupada:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{(2\sigma_i)^2}}} \quad (11)$$

De esta manera se puede calcular un valor de la actividad del  ${}^7\text{Be}$  para cada año y estación para el período comprendido entre 2006 y 2019 (período ofrecido por el CSN a través de su herramienta web, [2]) y, con ello, obtener una única media con su incertidumbre por estación para todo el rango de años indicado, como se muestra en la Tabla 3.

Los datos de las estaciones europeas recogidos pertenecen al rango de años comprendido entre 2007 y 2011 (no hay datos posteriores), por lo que para poder establecer comparaciones con los resultados obtenidos de las estaciones españolas se ha tenido que ajustar el rango de estas últimas a los mismos años. Al igual que en [2], en [9] se presentan datos de diferentes radioisótopos en diversas matrices muestradas, por lo que se ha realizado un programa en Python, que se muestra en el Apéndice C, para obtener únicamente los datos correspondientes a las medidas del  ${}^7\text{Be}$  en aire. Los datos recogidos de la página vienen presentados en cinco ficheros, uno por año, por lo que después de haber realizado la criba de los datos que no son pertinentes para este trabajo se ha realizado una media para obtener una única medida por estación. En este caso, debido a que los datos no presentaban

incertidumbre, no ha sido posible hacer una media pesada y se ha calculado una media simple y una desviación estándar según:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_i^n a_i \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (a_i - \bar{a})^2} \quad (13)$$

donde  $n$  es el número de datos disponibles para cada estación.

## 4.1. Correlación con parámetros geográficos

Primeramente se va a verificar que todas las medidas de las estaciones españolas estudiadas se ajustan a una distribución normal valorando el ajuste con el valor de  $R^2$ . La dependencia geográfica se va a estudiar en las doce estaciones mencionadas, así como en las estaciones europeas de las cuales se han obtenido datos de [9], con tres parámetros: la latitud, la longitud y la altura<sup>4</sup>. Para las estaciones españolas estos datos se han obtenido mediante la herramienta Google Earth [13], mientras que para las estaciones europeas los datos venían especificados junto con la actividad.

### 4.1.1. Comprobación de la distribución normal en estaciones españolas

Debido al abultado número de medidas del mismo parámetro con las que se trabaja, los resultados seguirán una distribución que, como se ha mencionado, es una distribución normal caracterizada por la media y la desviación estándar. Para llevar a cabo el ajuste es necesario contar con las frecuencias absolutas, por lo que una buena solución es representar en un histograma los valores de las actividades y realizar el ajuste sobre el propio histograma con el programa SciDavis. Los datos de los ajustes para cada una de las estaciones pueden verse en la Tabla 3. La Figura 6 muestra a modo de ejemplo dos de los histogramas obtenidos y los correspondientes ajustes. Las medias de las distribuciones gaussianas encajan con las medias ponderadas obtenidas en cada estación con todos los datos.

---

<sup>4</sup>En los datos europeos no había constancia de los datos de altura de las localizaciones, por lo que debido al elevado número de estaciones que se han tratado no se presenta el estudio en función de la altura.

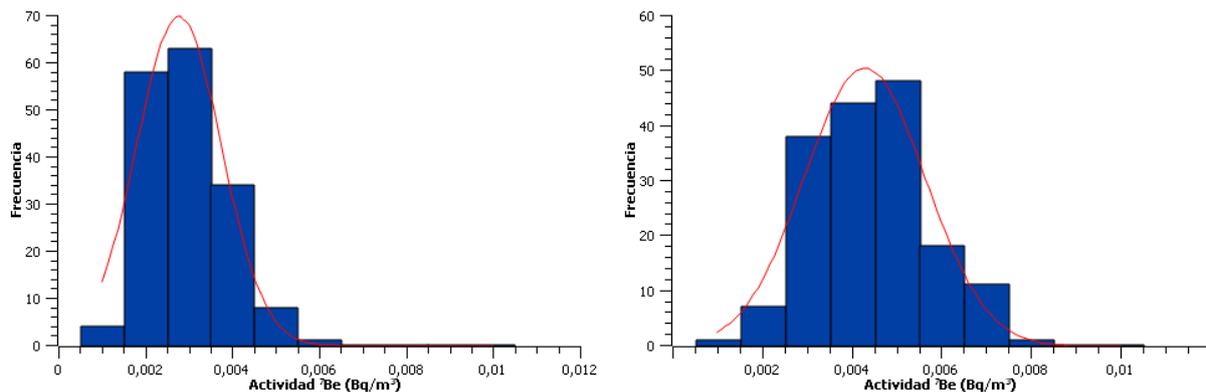


Figura 6: Distribución de las actividades de  ${}^7\text{Be}$  medidas en las localizaciones de Zaragoza (izquierda) y Santander (derecha), en las que se aprecia el ajuste a una distribución normal en rojo, cuyos parámetros vienen mostrados en la Tabla 3. Los histogramas para el resto de localizaciones se presentan en el Apéndice A.

#### 4.1.2. Dependencias con la latitud, longitud y altura

Como se ha adelantado previamente se va a estudiar la posible variación de la actividad del  ${}^7\text{Be}$  con la latitud, la longitud y la altura. En el caso de las estaciones españolas existe algún precedente en el que se ha encontrado un gradiente norte-sur (con mayor actividad a menor latitud) en cuatro estaciones analizadas en el período 2001-2010 [5], pero sin significancia estadística. En [6] se realiza un estudio en 6 localizaciones europeas con datos de 1972 a 2003 encontrando también una dependencia inversa de la actividad con la latitud; los datos que se presentan en este trabajo en las Figuras 8 y 9 se corresponden con un total de 282 localizaciones europeas y 12 españolas.

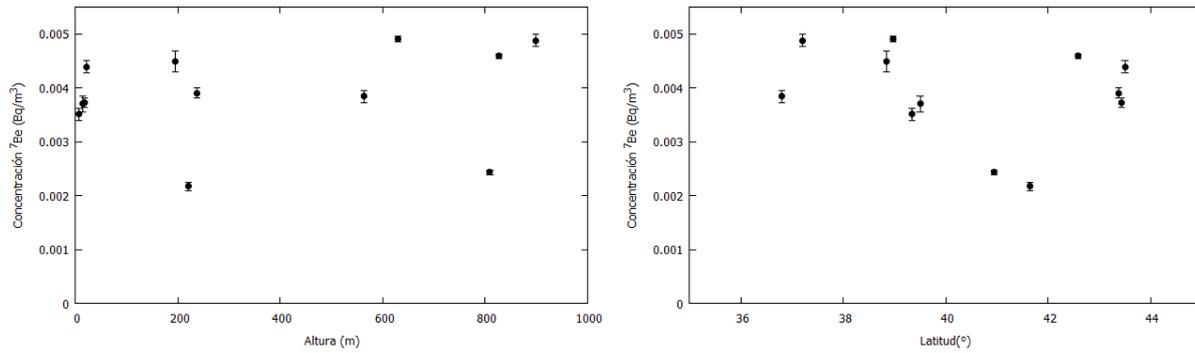
Si se representa la concentración de  ${}^7\text{Be}$  frente a la altura, la latitud y la longitud para las estaciones españolas, como se ilustra respectivamente en las Figuras 7a, 7b, 7c, no se aprecia ninguna dependencia lineal clara ni ningún indicio de gradiente. Para las gráficas europeas se llega a la misma conclusión, ya que es imposible extraer ninguna dependencia clara de la concentración con la latitud (Figuras 8a y 8b, 8c) ni con la longitud (Figuras 9a, 9b y 9c). Efectivamente si se realiza un ajuste lineal para cada una de las gráficas de la Figura 7 obtenemos  $R^2 = 0,0426$ ,  $R^2 = 0,0495$  y  $R^2 = 0,1677$  respectivamente. Coincide que el me-

	Lat (°)	Long (°)	Alt (m)	A ( $mBq/m^3$ )	$\mu$	$\sigma$	$R^2$
<b>Zaragoza</b>	41,65	0,87	221	$2,17 \pm 0,76$	$2,77 \pm 0,08$	$0,97 \pm 0,09$	0,97
<b>Ferrol</b>	43,50	8,17	21	$4,39 \pm 1,15$	$4,98 \pm 0,08$	$2,89 \pm 0,24$	0,98
<b>Oviedo</b>	43,38	5,83	237	$3,90 \pm 0,95$	$4,54 \pm 0,02$	$1,84 \pm 0,06$	0,99
<b>Santander</b>	43,44	3,97	17	$3,72 \pm 0,89$	$4,29 \pm 0,12$	$2,70 \pm 0,32$	0,95
<b>León</b>	42,58	5,57	827	$4,59 \pm 0,43$	$5,57 \pm 0,13$	$3,68 \pm 0,52$	0,96
<b>Salamanca</b>	40,95	5,67	809	$2,43 \pm 0,42$	$3,36 \pm 0,19$	$2,90 \pm 0,48$	0,91
<b>Valencia</b>	39,34	0,32	6	$3,51 \pm 1,13$	$4,23 \pm 0,05$	$2,00 \pm 0,13$	0,98
<b>Ciudad Real</b>	38,97	3,92	630	$4,91 \pm 0,46$	$5,47 \pm 0,48$	$4,94 \pm 1,74$	0,89
<b>Málaga</b>	36,80	4,37	563	$3,84 \pm 1,16$	$4,72 \pm 0,05$	$1,93 \pm 0,12$	0,98
<b>Granada</b>	37,20	3,57	899	$4,88 \pm 1,20$	$5,70 \pm 0,13$	$2,94 \pm 0,39$	0,95
<b>Badajoz</b>	38,84	6,98	194	$4,49 \pm 1,89$	$5,12 \pm 0,17$	$3,13 \pm 0,52$	0,93
<b>Palma</b>	39,50	2,91	14	$3,70 \pm 1,49$	$4,09 \pm 0,11$	$2,78 \pm 0,31$	0,96

Tabla 3: Valores geográficos de latitud, longitud y altura para las estaciones españolas estudiadas junto con la actividad media, expresada en  $mBq/m^3$ , en el rango de años comprendido entre 2006 y 2019 y su incertidumbre. Se presenta también la media, la desviación estándar y el valor de  $R^2$  del ajuste realizado con SciDavis.

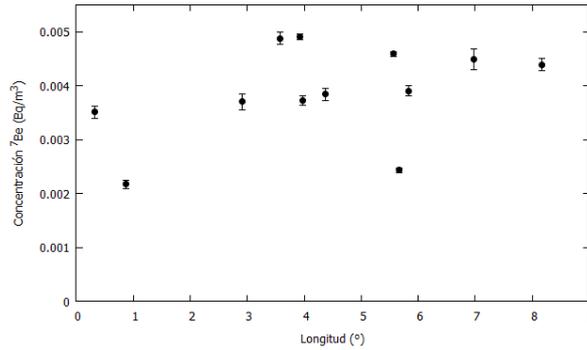
El mejor ajuste para los tres parámetros se da con un polinomio de grado 6, obteniendo un valor de  $R^2 = 0,3881$  para la altura,  $R^2 = 0,8426$  para la latitud y  $R^2 = 0,5746$  para la longitud.

En [5] se encuentra que la concentración de la actividad del  $^7Be$  es mayor para ciudades con una latitud menor, y va decreciendo conforme la latitud aumenta, así como que en ciudades con una climatología más seca (menos volumen de lluvia registrado) la concentración aumenta. En este trabajo, como se aprecia en la Figura 7b, vemos que se cumple que la actividad sí parece tener una tendencia decreciente al aumentar la latitud excepto en las localizaciones con valores superiores a  $42^\circ$ , por lo que globalmente no se confirma la tendencia. Las barras de error de muchas de las medidas que se muestran en las Figuras 8 y 9 presentan valores elevados debido a que los datos con los que se ha trabajado, proporcionados por [9], no contaban con incertidumbre asociada, por lo que al usar la Ecuación 13 para hallar la incertidumbre los valores obtenidos son altos. En la Figura 8d, se puede apreciar un máximo de concentración a una latitud de  $45,2^\circ$ , que se aproxima al valor encontrado en [6] (Figura 8 del artículo) de  $38,7^\circ$ . Para poder entender bien esta diferencia que existe entre ambos resultados convendría analizar el mismo rango temporal, ya que es distinto para cada uno.



(a) Variación con la altura.

(b) Variación con la latitud.



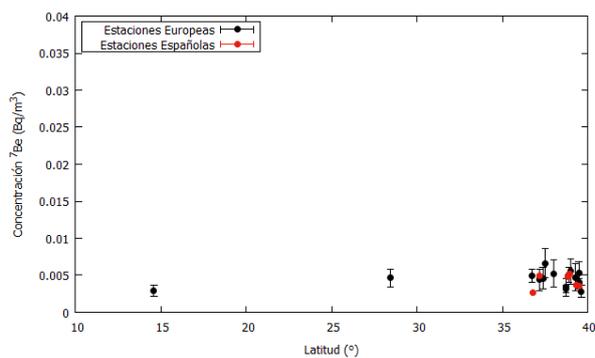
(c) Variación con la longitud.

Figura 7: Representación de los valores medios de actividad de  ${}^7\text{Be}$  en función de los parámetros geográficos de altura, latitud y longitud para las estaciones españolas en el rango de años comprendido entre 2006 y 2019.

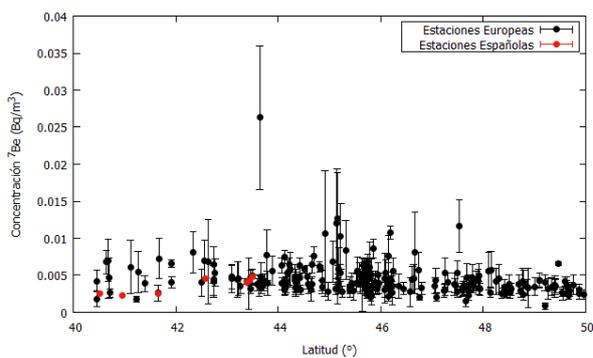
Para la longitud se puede apreciar de la Figura 9 que podría haber un máximo en torno a  $10^\circ$ , aunque en este caso no se cuenta con trabajos previos para poder comparar el valor obtenido.

## 4.2. Análisis de las variaciones estacionales

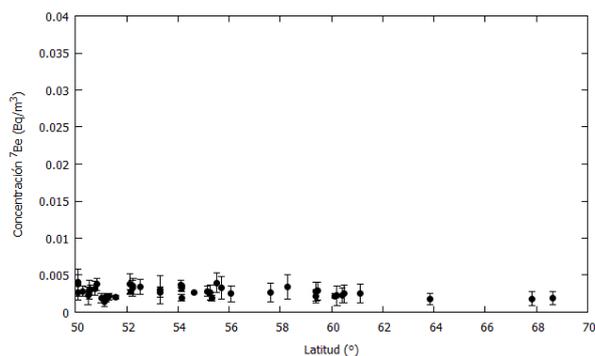
Existe una diferencia entre las concentraciones de  ${}^7\text{Be}$  medidas en las distintas épocas del año, que es lo que se va a analizar en este apartado, centrándose en la diferencia entre verano e invierno y en la evolución temporal de cada estación teniendo en cuenta todas las épocas del año. Para ello es necesario calcular la media pesada y su incertidumbre, como se indica en las Ecuaciones 10 y 11, de cada una de las estaciones del año, con lo que



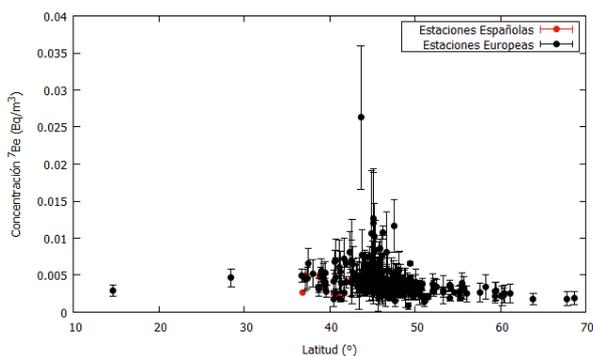
(a) Rango 0° - 40°.



(b) Rango 40° - 50°.



(c) Rango mayor que 50°.



(d) Rango completo.

Figura 8: Representación en función de la latitud para las estaciones europeas y españolas estudiadas del valor medio de la concentración de actividad del  ${}^7Be$  de los datos recogidos entre 2007 y 2011.

se puede obtener un único valor por estación en cada localización. Lo esperado es que la actividad en verano sea superior a la de invierno, debido a que en verano se produce un calentamiento de la superficie de la Tierra, hecho que conduce al calentamiento del aire en contacto con la superficie y a que se produzca un transporte convectivo llevando el aire de la superficie hacia arriba y se den niveles superiores enriquecidos en  ${}^7Be$  hacia abajo [7].

#### 4.2.1. Actividad media por estación del año en localizaciones españolas

Se ha estudiado la actividad de  ${}^7Be$  viendo cuál es la variación de la misma en todas las épocas del año. La Tabla 4 presenta para cada localización la actividad media de  ${}^7Be$  en cada estación del año evaluada en el conjunto de años desde 2006 a 2019 así como

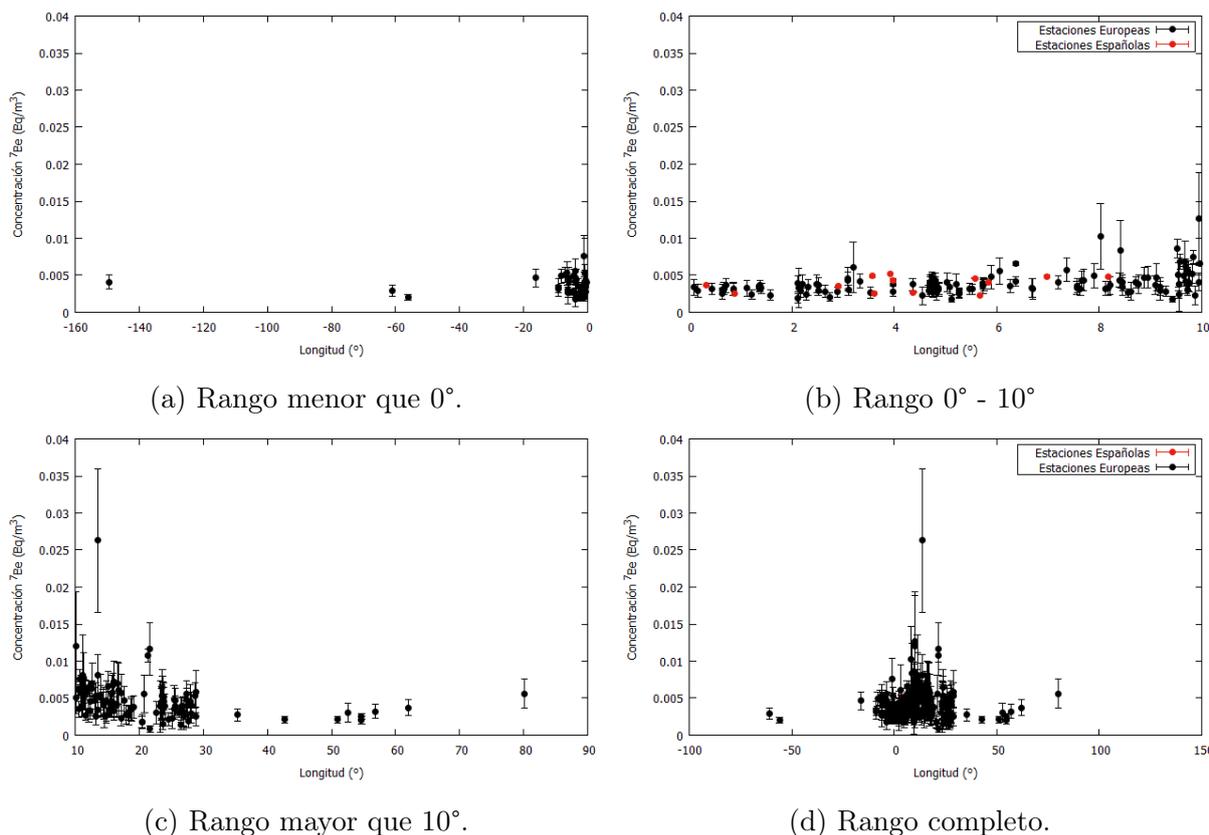


Figura 9: Representación en función de la longitud para las estaciones europeas y españolas estudiadas del valor medio de la concentración de actividad de  ${}^7Be$  de los datos recogidos entre 2007 y 2011.

el promedio. En la Figura 10a se representan estas actividades medias en función de la latitud de cada localización. Se puede ver que para todas las localizaciones los valores promedio para primavera y otoño se encuentran entre los valores de verano e invierno, que corresponden al máximo y mínimo de actividad, siguiendo las tendencias esperadas; también puede observarse que para cada estación del año la dependencia con la latitud sigue el mismo patrón que el mostrado en la Figura 7b.

La figura 10b muestra la actividad promedio de  ${}^7Be$  en cada estación del año para Zaragoza en función del tiempo; las figuras equivalentes para el resto de localizaciones españolas se muestran en el anexo B. Se observa que la diferencia entre los valores de verano e invierno es bastante distinta entre las localizaciones. Igualmente, es diferente la evolución temporal (bastante plana por ejemplo en Zaragoza, pero no en otros casos); en

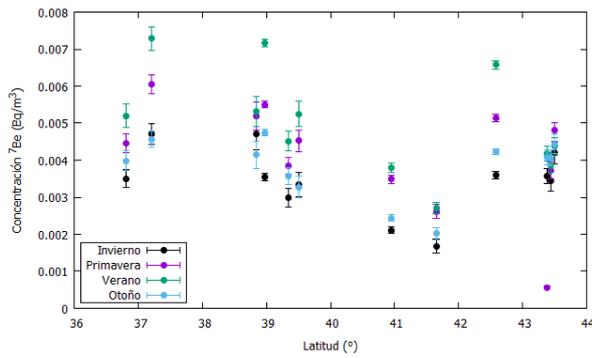
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Diferencias
<b>Zaragoza</b>	1,68 ± 0,19	2,61 ± 0,19	2,71 ± 0,16	2,02 ± 0,17	1,03 ± 0,25
<b>Ferrol</b>	4,20 ± 0,31	4,81 ± 0,21	4,37 ± 0,24	4,44 ± 0,27	0,17 ± 0,39
<b>Oviedo</b>	3,56 ± 0,20	5,69 ± 0,27	4,18 ± 0,19	4,08 ± 0,19	0,62 ± 0,28
<b>Santander</b>	3,44 ± 0,27	3,73 ± 0,22	3,84 ± 0,16	4,06 ± 2,10	0,40 ± 0,31
<b>León</b>	3,59 ± 0,09	5,14 ± 0,09	6,57 ± 0,11	4,48 ± 0,08	2,98 ± 0,14
<b>Salamanca</b>	2,11 ± 0,08	3,49 ± 0,11	3,79 ± 0,12	2,60 ± 0,08	1,68 ± 0,15
<b>Valencia</b>	2,99 ± 0,25	3,85 ± 0,23	4,51 ± 0,27	3,57 ± 0,23	1,51 ± 0,37
<b>C. Real</b>	3,54 ± 0,09	5,50 ± 0,09	7,17 ± 0,10	4,74 ± 0,09	3,63 ± 0,14
<b>Málaga</b>	3,50 ± 0,24	4,46 ± 0,26	5,20 ± 0,32	3,98 ± 0,27	1,71 ± 0,40
<b>Granada</b>	4,72 ± 0,28	6,05 ± 0,26	7,28 ± 0,32	4,56 ± 0,21	2,56 ± 0,44
<b>Badajoz</b>	4,00 ± 0,44	5,20 ± 0,37	5,32 ± 0,40	4,14 ± 0,37	1,32 ± 0,19
<b>Palma</b>	3,33 ± 0,33	4,52 ± 0,30	5,25 ± 0,35	3,27 ± 0,30	1,93 ± 0,50
<b>Promedios</b>	3,27 ± 0,23	4,16 ± 0,20	5,02 ± 0,23	3,83 ± 0,21	1,64 ± 0,30

Tabla 4: Actividad media de  ${}^7Be$  en  $mBq/m^3$  por estación del año en cada localización junto con sus incertidumbres y las diferencias entre verano e invierno. Se han promediado todas las medias de cada año (calculadas según las Ecuaciones 10 y 11) para presentar una única media para el rango de años entre 2006 y 2019 y el promedio.

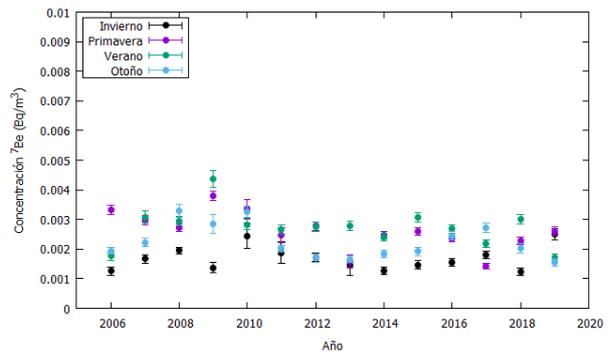
cualquier caso, en general se mantiene la tendencia de mayor actividad en verano que en invierno. Para analizar mejor posibles dependencias, se ha considerado la diferencia entre actividades medias de verano e invierno.

#### 4.2.2. Cuantificación de la variación entre verano e invierno

Se ha cuantificado la variación de la actividad de  ${}^7Be$  entre verano e invierno obteniendo la diferencia entre los correspondientes promedios (mostrada en la Tabla 4) y se han analizado posibles dependencias sobre esta diferencia. En la Figura 11, que muestra la diferencia entre verano e invierno para cada localización y año, se puede apreciar que para algunos años y algunas localizaciones la actividad de  ${}^7Be$  medida en invierno era mayor que la de verano; sin embargo, en la Figura 10b al hacer un promedio de todos los años por estación vemos que la actividad promedio es siempre mayor en los meses de primavera y verano que en otoño e invierno, conclusión a la que también se llega en [4] y [5]. Así, como muestra la Tabla 4, las diferencias entre actividad media de verano e invierno son siempre positivas en todas las localizaciones.



(a) Estaciones en función de la latitud.



(b) Estaciones para Zaragoza.

Figura 10: Actividad media de  ${}^7\text{Be}$  para cada estación del año: para todas las localizaciones españolas en función de la latitud considerando el período 2006-2019 (izquierda) y para Zaragoza la evolución temporal (derecha).

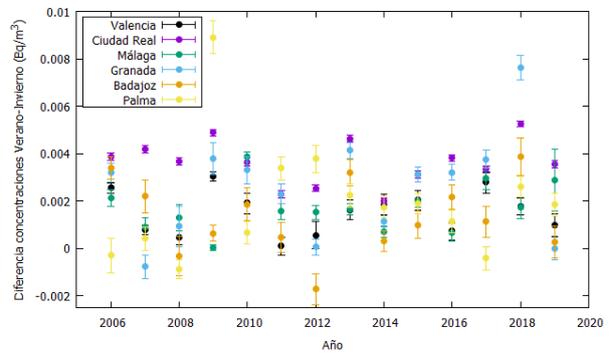
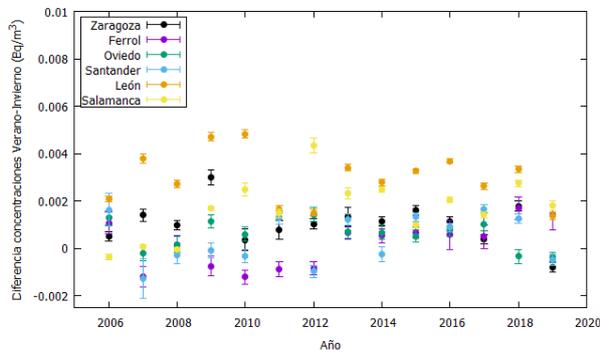


Figura 11: Diferencias entre las actividades promedio de  ${}^7\text{Be}$  de verano e invierno calculadas para cada localización y para cada año. Se presenta dividida en dos para facilitar su visualización.

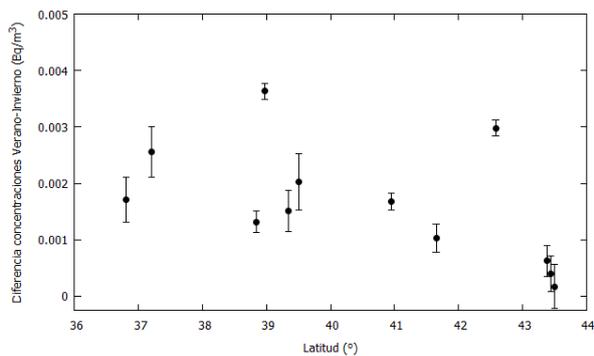
Se observa que las diferencias más elevadas son las de Ciudad Real, León y Granada (con diferencias mayores de  $2,5 \text{ mBq/m}^3$ ) y, las menores, las obtenidas para las estaciones de Santander, Ferrol, Badajoz y Oviedo (con diferencias del orden de  $0,6 \text{ mBq/m}^3$  o menores). En Palma se observa la tendencia más oscilante, ya que presenta diferencias elevadas en años como 2009 o 2012 y algunas bajas como las de los años 2006 o 2017. Por el contrario, la tendencia más regular se puede apreciar en la estación de Ciudad Real, con diferencias verano-invierno siempre positivas y comprendidas entre  $5,25$  y  $2,00 \text{ mBq/m}^3$ .

No obstante, se puede decir que el rango de variaciones es amplio tanto entre los distintos años como entre las diferentes localizaciones.

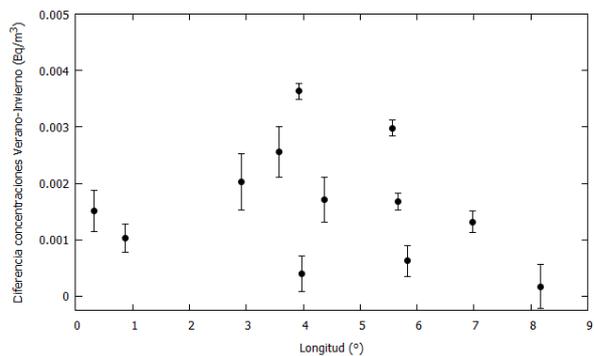
Al igual que se ha hecho anteriormente con la actividad promedio de  ${}^7\text{Be}$  en 2006-2019 en la Figura 7, podemos estudiar esta variación de actividades entre verano e invierno respecto a la latitud, a la longitud y a la altura de las localizaciones para tratar de identificar posibles tendencias, como se muestra en la Figura 12. Nuevamente no se aprecia ninguna tendencia clara con estos tres parámetros, aunque parece que en las localizaciones con altitud mayor de 500 m las diferencias entre verano e invierno son mayores que en las de menor altitud. Si se consideran las medidas de Zaragoza de 2020/2021 presentadas en la Tabla 2, se observa que siguen también la tendencia esperada, con un valor máximo en agosto de 2020 y mínimo en enero de 2021; aunque la variación estacional parece mayor que el promedio evaluado para Zaragoza en el conjunto del rango temporal considerado.

### 4.3. Dependencia temporal con el ciclo solar

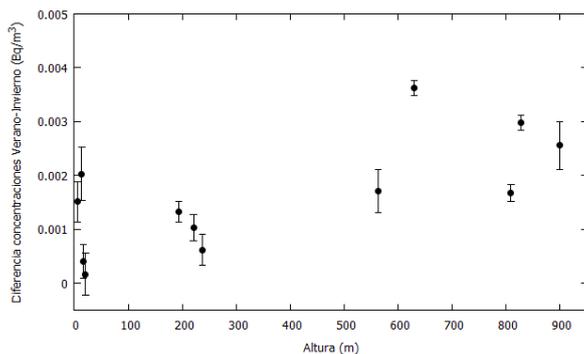
En este apartado se estudia la incidencia que tiene el ciclo solar, que es el parámetro que más influye en la variación temporal de la concentración de  ${}^7\text{Be}$ . El Sol está compuesto por una enorme nube de gas cargado que al moverse genera un campo magnético muy potente, el cual pasa por un ciclo que es a lo que se conoce como ciclo solar. La duración de este ciclo solar es de aproximadamente once años, que es el tiempo que les cuesta a los polos norte y sur del Sol cambiar de localización. Esta parte del trabajo en analizar la posible dependencia de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  con la variación del ciclo solar teniendo en consideración el número de manchas solares, que son áreas oscuras que aparecen en la superficie del sol debido a una temperatura más baja localizada en esas zonas en comparación a otros puntos de la superficie del sol y están originadas por una mayor intensidad del campo magnético. Estos campos magnéticos son tan fuertes que evitan que parte del calor del centro del sol alcance la superficie, razón por la cual las zonas de las manchas son más frías y, a medida que van cambiando, también lo hacen las manchas solares. La relación que existe entre la concentración del  ${}^7\text{Be}$  y el número de manchas solares se ha descrito inversamente proporcional, es decir, a mayor actividad solar menor es la concentración, como se muestra en [4] y [5]. En la Figura 13 se comparan el número de manchas solares entre 2006 y 2019 obtenido de [14] y las concentraciones para ese mismo rango de años de 12 estaciones.



(a) Diferencias respecto a la latitud.



(b) Diferencias respecto a la longitud.



(c) Diferencias respecto a la altura.

Figura 12: Representación de la diferencia de los valores medios de actividad de  ${}^7\text{Be}$  entre verano e invierno en función de los parámetros geográficos de altura, latitud y longitud para las estaciones españolas en el rango de años comprendido entre 2006 y 2019.

#### 4.3.1. Parámetros de correlación

Para cuantificar la correlación lineal que existe entre dos variables  $x$  e  $y$ , que en este caso se corresponden con la concentración de  ${}^7\text{Be}$  y las manchas solares, se usa el test-*Pearson*, con el que se obtiene un valor entre  $-1$  y  $+1$ , donde  $+1$  significa una correlación lineal positiva total,  $0$  que no existe una correlación lineal y  $-1$  una correlación lineal negativa total. Por lo tanto, siendo que existe una relación inversamente proporcional entre las dos magnitudes que estamos estudiando, se espera que los resultados del test sean negativos y, cuanto más se aproximen los valores a  $-1$  más fuerte será la anticorrelación. El coeficiente

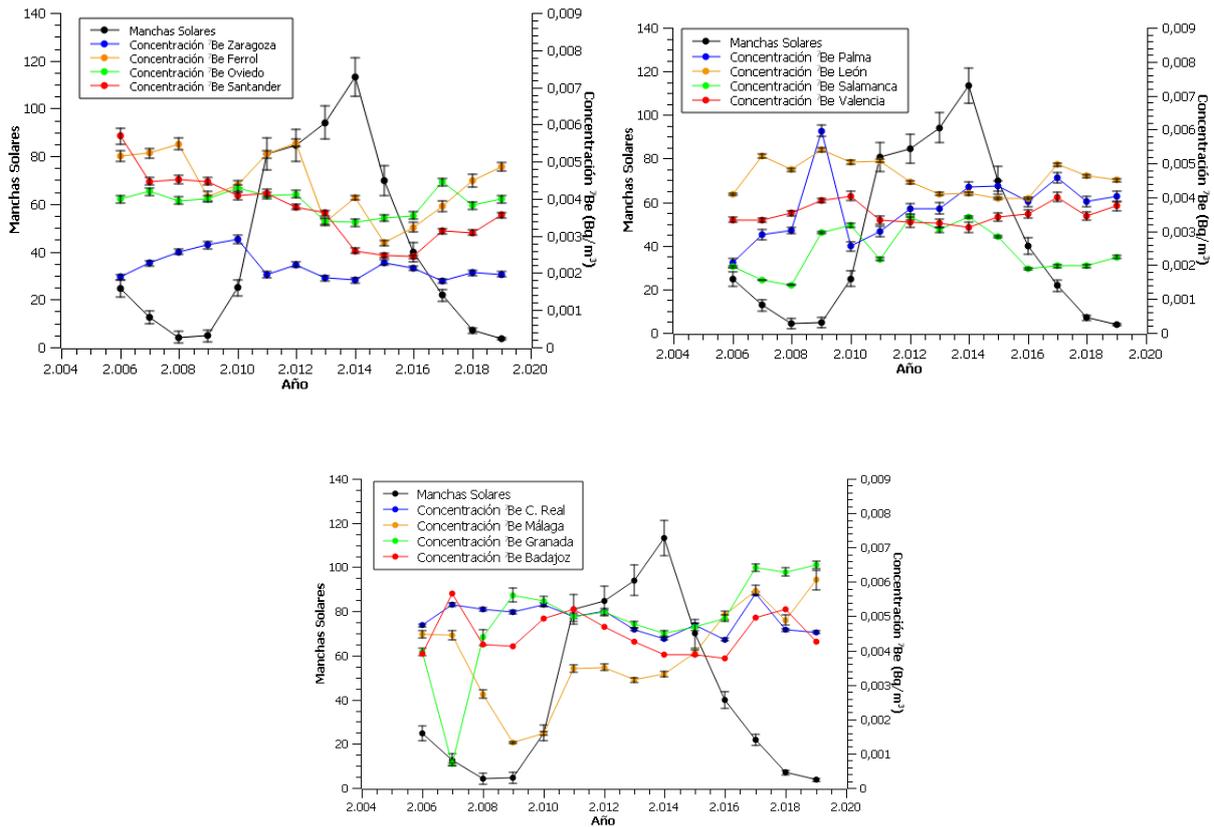


Figura 13: Comparación entre el número de manchas solares y la concentración de  ${}^7\text{Be}$  entre los años 2006 y 2019 para las 12 estaciones españolas consideradas. Se presenta dividida en tres gráficas para que resulte más clara su visualización.

de correlación de *Pearson* se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

El programa Excel tiene incorporada en una de sus funciones esta relación lo que simplifica considerablemente el cálculo. Se han calculado dos coeficientes de relación, como se muestra en la Tabla 5, para cada una de las estaciones, uno para el rango completo de años 2006-2019 y otro para la duración del último ciclo solar completo, que comprende desde 2008 a 2018.

Existe diferencia entre los coeficientes calculados para los dos rangos de años aunque

	Zaragoza	Ferrol	Oviedo	Santander	Palma	León
<b>2006-2019</b>	-0,40	-0,27	-0,55	-0,38	0,01	-0,50
<b>2008-2018</b>	-0,55	-0,13	-0,51	-0,35	-0,13	-0,59
	Salamanca	Valencia	Ciudad Real	Málaga	Granada	Badajoz
<b>2006-2019</b>	0,64	-0,65	-0,35	-0,17	-0,06	-0,22
<b>2008-2018</b>	0,59	-0,76	-0,45	0,04	-0,55	-0,23

Tabla 5: Coeficientes de correlación de *Pearson* entre la concentración de  $^7Be$  y el número de manchas solares en cada estación para el rango completo de datos con el que se ha trabajado y para el último ciclo solar completo.

en algunas estaciones la diferencia es casi inexistente, como en Oviedo. Si nos centramos en los coeficientes calculados para el rango de años de 2008-2018, se observa que algunas de las estaciones situadas al Este presentan unos resultados más acordes con lo esperado como Valencia, Zaragoza o Granada, aunque hay algunas excepciones como Palma, que no presenta correlación. Este es el caso también para otras estaciones como Ferrol o Málaga. De igual manera se ve que las ciudades situadas en latitudes más altas (ver la Tabla 3) presentan unos coeficientes que se aproximan más a la correlación negativa que se espera (a excepción de Salamanca), como se puede ver también en la Figura 14. Por lo general se puede afirmar que existe la anticorrelación esperada, como se concluye en [4] y en [5]. Podemos realizar un análisis similar para una pequeña muestra de localizaciones europeas y ver si se cumple lo esperado. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para el correspondiente coeficiente de correlación.

	GRAZ	RETZ	PRAHA	NARVA-JOESUU	BURGAS	ALLINGE
<b>Latitud (°)</b>	47,07	48,76	50,08	59,41	42,53	55,25
<b>2007-2011</b>	-0,29	0,39	0,49	-0,46	-0,65	-0,0019

Tabla 6: Coeficientes de correlación de *Pearson* para 6 localizaciones europeas junto con su latitud.

Vemos que en Graz, Narva-Joesuu y Burgas se mantiene la tendencia que se espera ya que se obtiene una correlación negativa. En Allinge se obtiene una correlación nula y en Praga y Retz se obtienen valores positivos, en contra de lo que se espera. Estos valores pueden no tener un gran significado, ya que no abarcan un ciclo solar completo.

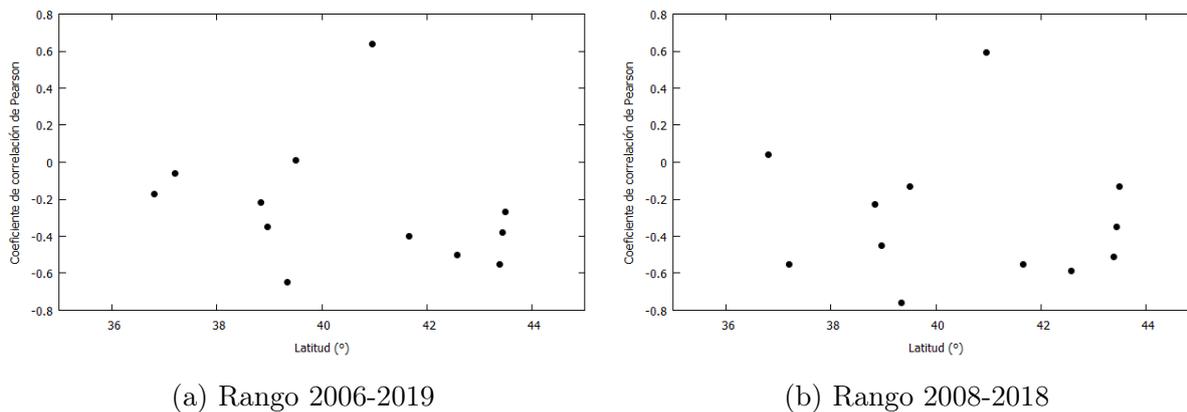


Figura 14: Coeficientes de correlación de *Pearson* entre la actividad de  ${}^7\text{Be}$  y el número de manchas solares en función de la latitud de las distintas localizaciones evaluados en dos períodos temporales.

## 5. Conclusiones

En el estudio de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  en aire, se ha llevado a cabo en primer lugar la determinación de los valores de dicha actividad en Zaragoza, con resultados para 9 meses comprendidos entre los años 2020 y 2021; estos resultados se presentan en la Tabla 2. Las medidas semanales que se realizan en el LABAC son las que han permitido llevar este estudio a cabo, para el que se ha realizado también la calibración previa, tanto en energía como en eficiencia, de un detector de germanio.

Además, con datos históricos de la actividad de  ${}^7\text{Be}$ , se han analizado posibles relaciones con diversos parámetros geográficos o relacionados con el ciclo solar, así como posibles variaciones estacionales. En el trabajo se han incluido todos los datos ofrecidos por el CSN para España (en tiempo y localizaciones, 12) así como un gran número de estaciones europeas (282), para las que no hay datos públicos desde 2011. Con los datos proporcionados por el CSN y por el JRC, correspondientes a los períodos de 2006-2019 y 2007-2011 respectivamente, se ha realizado un estudio de la actividad de  ${}^7\text{Be}$  del número de estaciones españolas y estaciones europeas ya mencionado en función de la latitud y la longitud. Para las estaciones españolas, debido a su menor número y a la mayor accesibilidad de los datos proporcionados por el CSN, se ha realizado también un estudio en función de la altura. No se ha encontrado una dependencia clara con ninguno de estos tres parámetros; en concre-

to, no se ha observado en la actividad de  ${}^7\text{Be}$  de las estaciones españolas la dependencia inversa con la latitud propuesta en [5] considerando solamente datos de 4 estaciones. Para el conjunto de estaciones, sí se ha encontrado un resultado parecido al de [6], donde se identificó un valor máximo de actividad de  ${}^7\text{Be}$  en torno a una latitud de  $38,7^\circ$ ; en este trabajo el máximo se sitúa en  $45,2^\circ$ . La diferencia puede deberse al distinto rango temporal considerado en cada estudio.

Asimismo, se ha llevado a cabo un estudio de la variación estacional de la actividad de  ${}^7\text{Be}$ , donde se ha comprobado que para el rango de años comprendido entre 2006 y 2019 en todas las localizaciones españolas se verifica que la actividad media de  ${}^7\text{Be}$  en verano es mayor que en invierno, tal y como se había apuntado en trabajos previos [4], [5] o [8]. Se ha cuantificado esta diferencia obteniendo un rango de variación desde  $0,17$  hasta  $3,63 \text{ mBq/m}^3$ , sin llegar a identificarse ningún patrón claro en esa variación ni en el tiempo ni con la con la latitud, longitud, aunque parece que la diferencia entre verano e invierno es mayor en las localizaciones situadas a mayor altitud. En la Tabla 4 se muestran los valores estacionales promedio para el conjunto de localizaciones españolas, con una diferencia entre verano e invierno de  $1,63 \pm 0,30 \text{ mBq/m}^3$ .

Por último, se ha realizado una comparación de la actividad anual de  ${}^7\text{Be}$  con el número de manchas solares en todas las localizaciones españolas consideradas y en 6 estaciones europeas. Prácticamente en todas las estaciones españolas, en las que se ha analizado un rango temporal que abarca un ciclo solar completo, se ha obtenido una correlación negativa a través del coeficiente de *Pearson*, confirmando la tendencia esperada e identificada en trabajos previos [4], [5], [8] y [6].

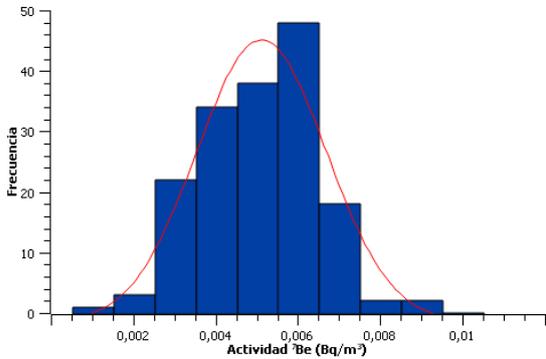
El trabajo realizado podría extenderse a análisis simultáneos de varias variables, como latitud y longitud, y tener en consideración parámetros meteorológicos, como las precipitaciones. En particular, para las estaciones europeas, podría analizarse un rango temporal mayor de datos, y considerar la relación con la altura. Las dependencias estacionales podrían estudiarse en función de parámetros meteorológicos, para ver si tienen algún tipo de incidencia sobre los valores de la actividad del  ${}^7\text{Be}$  en cada estación del año. En cuanto al estudio con las manchas solares se podría considerar en al menos un ciclo solar el conjunto de estaciones europeas para ver si se sigue la tendencia esperada de la anticorrelación.

## Bibliografía

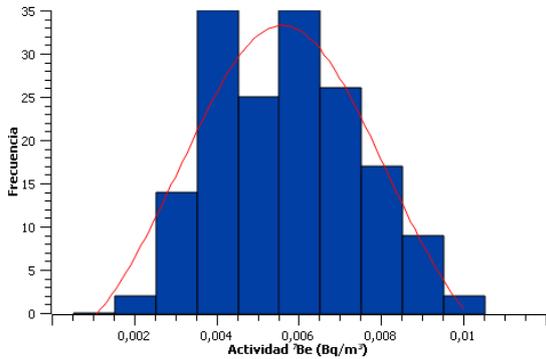
- [1] CSN. Página oficial del Consejo de Seguridad Nacional. <https://www.csn.es>. Último acceso: 11 May 2021.
- [2] KEEPER-WEB. Acceso público a los datos de vigilancia radiológica ambiental en España. <https://www.csn.es/kprgisweb2/>. Último acceso: 3 May 2021.
- [3] LABAC. Página oficial del Laboratorio de Bajas Actividades de la Universidad de Zaragoza. <https://gifna.unizar.es/labac/>. Último acceso: 11 May 2021.
- [4] N. Alegría, M.Herranz, R.Idoeta, and F.Legarda. *Study of  $^7\text{Be}$  activity concentration in the air of northern Spain. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286:347–351, 2010.
- [5] M.A. Hernández Ceballos, E.Brattich, R.L. Lozano, and G. Cinelli.  *$^7\text{Be}$  behaviour and meteorological conditions associated with  $^7\text{Be}$  peak events in Spain. Journal of Environmental Radioactivity*, 166:17–26, 2016.
- [6] A. Kulan, A. Aldahan, G. Possnert, and I. Vintersved. *Distribution of  $^7\text{Be}$  in surface air of Europe. Atmospheric Environment*, 40:3855–3868, 2006.
- [7] S.Bianchi, W.Plastino, E.Brattich, V.Djurdjevic, A.Longo, M.A. Hernández-Ceballos, D.Sarvan, and J.Ajtić. *Analysis of trends, periodicities, and correlations in the beryllium-7 time series in Northern Europe. Applied Radiation and Isotopes*, 148:160–167, 2019.
- [8] S. Abad Jiménez. *Estudio de la radiactividad ambiental en aire*. Trabajo de Fin de Grado de la Universidad de Zaragoza en el curso 2019-2020.
- [9] Joint Research Centre Data Catalogue. Datos para el estudio de la concentración del  $^7\text{Be}$  en Europa. <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/de42f259-fafe-4329-9798-9d8fabb98de5>. Último acceso: 23 April 2021.
- [10] Gordon R. Gilmore. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. Nuclear Training Services Ltd. Warrington, UK, 2008.

- [11] Laboratoire National Henri Becquerel. Table de radionucléides. [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Be-7\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Be-7_tables.pdf). Último acceso: 9 May 2021.
- [12] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*, chapter 12. Wiley, 4<sup>th</sup> edition, 2010.
- [13] Google Earth. Datos del número de manchas solares. <https://www.google.com/intl/es/earth/>. Último acceso: 22 May 2021.
- [14] Space Weather Prediction Center. Datos del número de manchas solares. <https://www.swpc.noaa.gov/>. Último acceso: 7 May 2021.

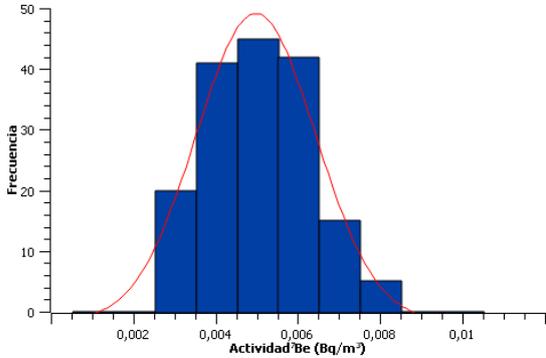
A. Distribución de las actividades de  ${}^7\text{Be}$  medidas de las estaciones españolas



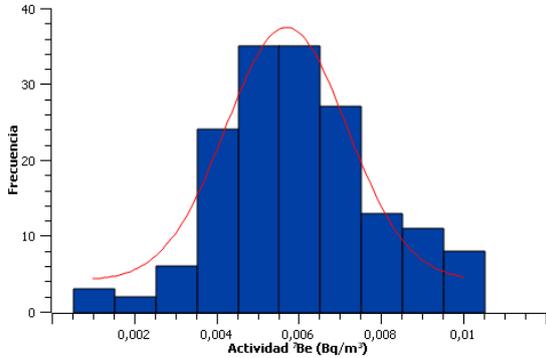
(a) Badajoz



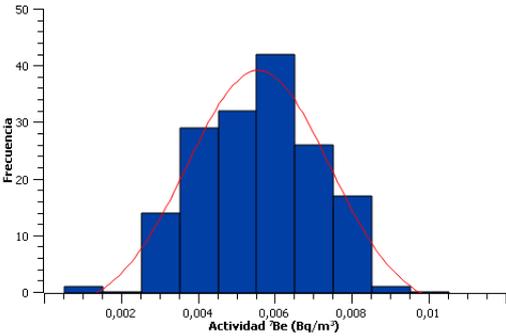
(b) Ciudad Real



(c) Ferrol

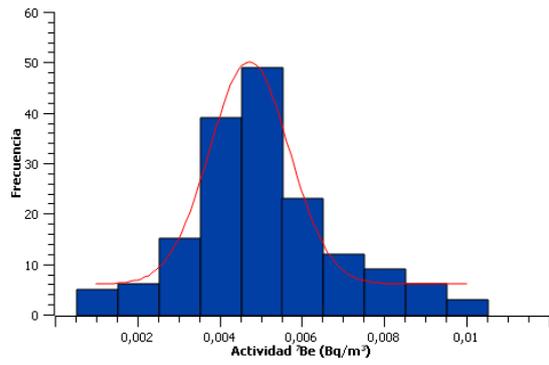


(d) Granada

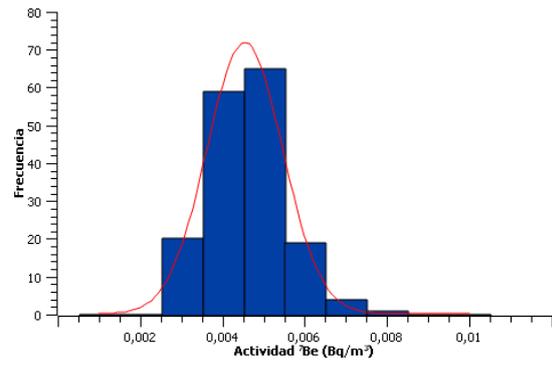


(e) León

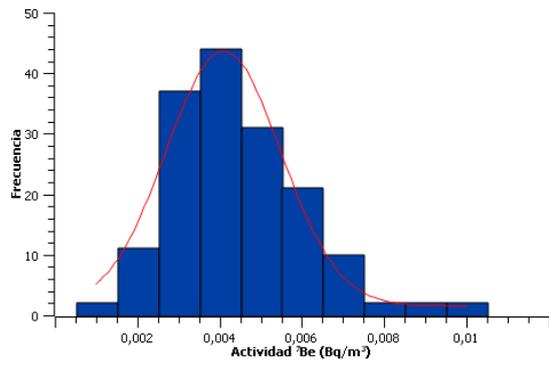
Figura 15: Información equivalente a la Figura 6.



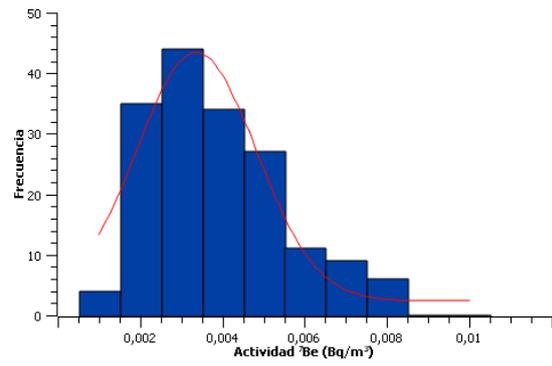
(a) Málaga



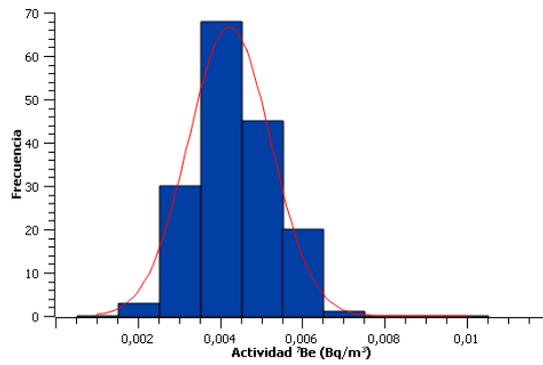
(b) Oviedo



(c) Palma



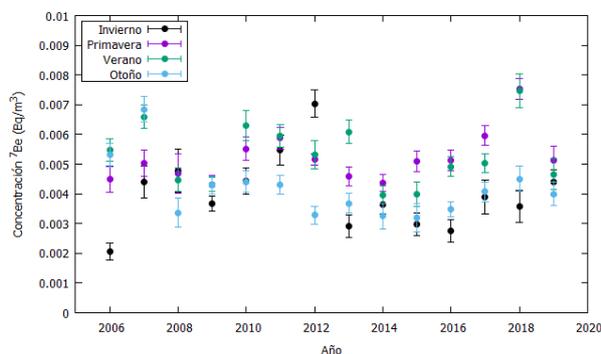
(d) Salamanca



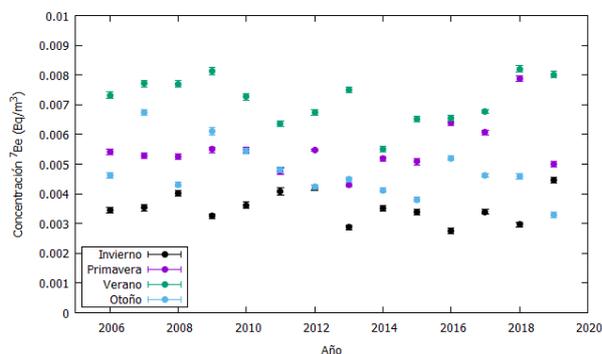
(e) Valencia

Figura 16: Información equivalente a la Figura 6.

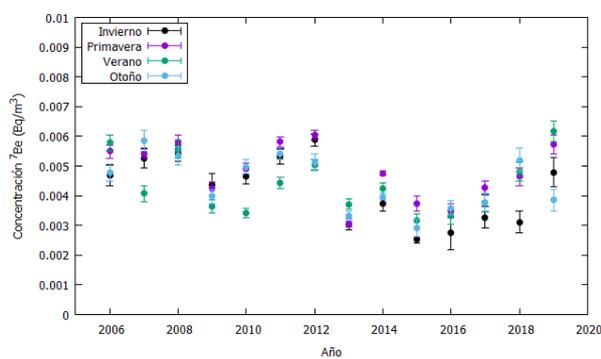
## B. Evolución temporal de la actividad media de ${}^7\text{Be}$ por estación del año en localizaciones españolas



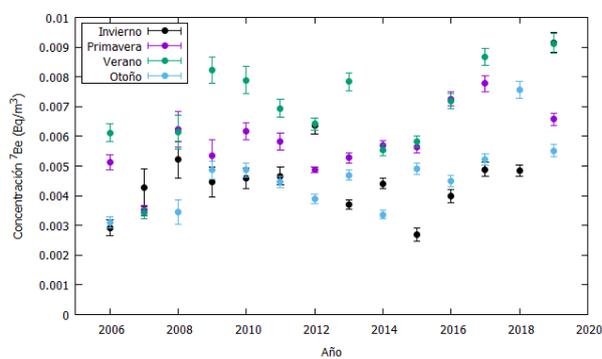
(a) Badajoz



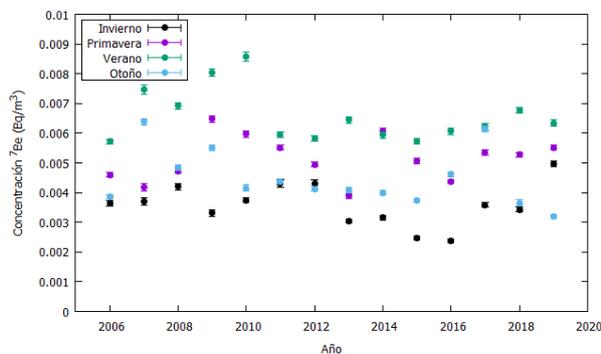
(b) Ciudad Real



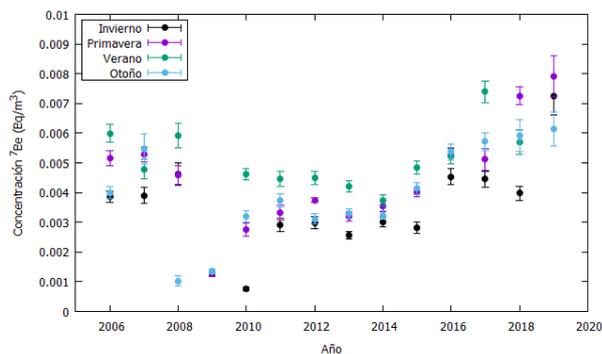
(c) Ferrol



(d) Granada

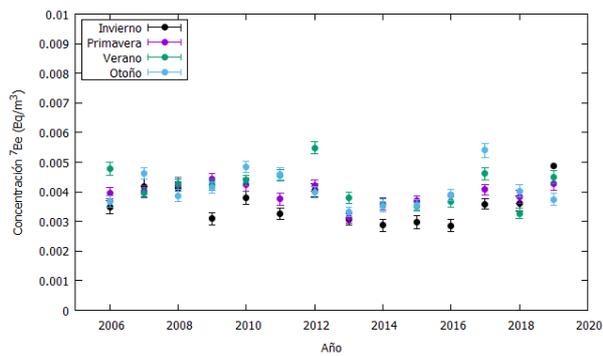


(e) León

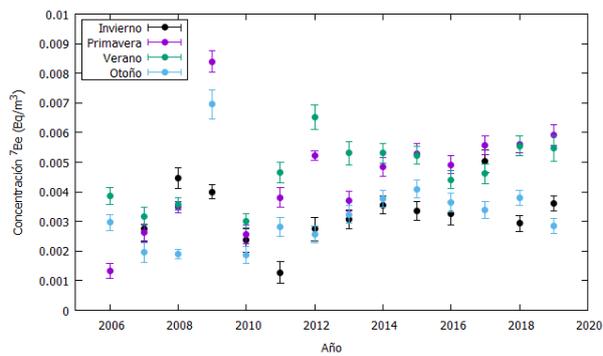


(f) Málaga

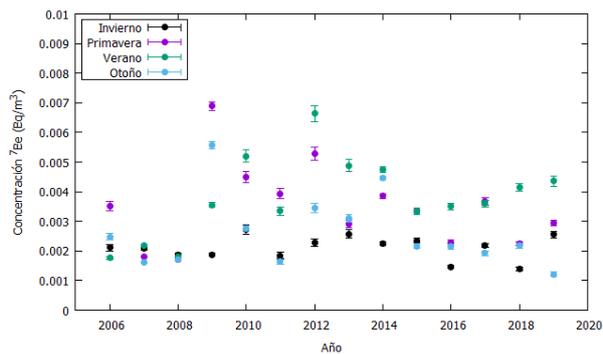
Figura 17: Información equivalente a la Figura 10b.



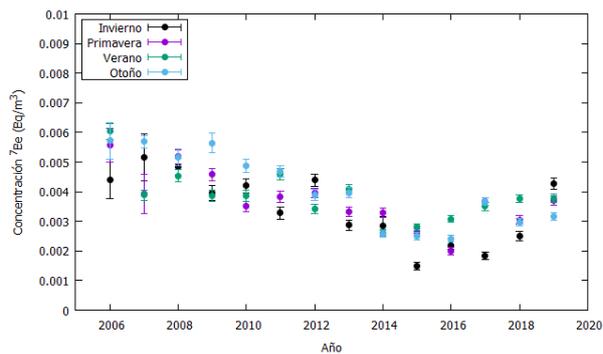
(a) Oviedo



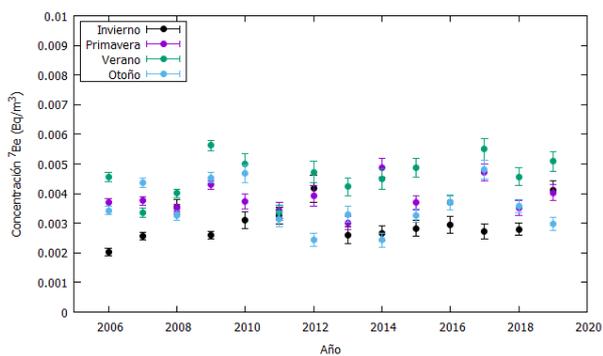
(b) Palma



(c) Salamanca



(d) Santander



(e) Valencia

Figura 18: Información equivalente a la Figura 10b.

## C. Código en Python

Este primer código tiene como finalidad extraer de los archivos proporcionados por [9] los datos de actividad de  ${}^7\text{Be}$  de las estaciones disponibles y hallar la media de las mismas con su incertidumbre. El resultado es un fichero en el que se presenta una única media con su incertidumbre así como el nombre, la latitud y longitud de la localización.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from google.colab import files
vectorsuma = []
vectordesv = []

uploaded = files.upload()

df = pd.read_csv('archivo.csv')
print(df)

matrix = np.asarray(df)
print(matrix)

f = open('nombreFichero.txt', 'w')
for i in range(len(matrix)):
    if 'OUTDOOR AIR' in matrix[i][4] and matrix[i][10] == 'BE-7':
        f.write(str(matrix[i][0]) + ',
        \t'+ str(matrix[i][1]) + ', \t'+
        str(matrix[i][2]) + ', \t'+ str(matrix[i][3]) + ',
        \t'+ str(matrix[i][11]) + '\n')
f.close()

input = np.loadtxt("nombreFichero.txt", dtype='str', delimiter=',')
print(input)
```

```

g = open('nombreFicheroFinal.txt', 'w')
for i in range(len(input)-1):
    vectorsuma.append(float(input[i][4]))
    if input[i][0] != input[i+1][0]:
        media = np.mean(vectorsuma)
        desvest = np.std(vectorsuma)
        vectorsuma = []
        g.write(str(input[i][0]) + ' ' + '\t Lat: ' + str(input[i][2]) +
        '\t Lon: ' + str(input[i][3]) + '\t Media = ' + str(media) +
        '\t Desv = ' + str(desvest) + '\n')

```

Este segundo código tiene como objetivo juntar los ficheros finales del código anterior en un único fichero para poder obtener la media y la incertidumbre de cada localización que presenta datos de actividad de  ${}^7\text{Be}$  en el rango completo de 2007 a 2011.

```

import numpy as np
import pandas as pd
from google.colab import files
import glob

df_2007 = pd.read_csv('2007.csv', header=None)
df_2008 = pd.read_csv('2008.csv', header=None)
df_2009 = pd.read_csv('2009.csv', header=None)
df_2010 = pd.read_csv('2010.csv', header=None)
df_2011 = pd.read_csv('2011.csv', header=None)

matrix07 = np.asarray(df_2007)
matrix08 = np.asarray(df_2008)
matrix09 = np.asarray(df_2009)
matrix10 = np.asarray(df_2010)
matrix11 = np.asarray(df_2011)

matrix_final = np.concatenate((matrix07, matrix08, matrix09,
matrix10, matrix11), axis = 0)

```

```

print(matrix_final)

vectorsuma = []
vectorsumadesv = []
vectorSabio = []
f = open('n.txt', 'w')
for i in range(len(matrix_final)-1):
    if matrix_final[i][0] not in vectorSabio:
        vectorSabio.append(matrix_final[i][0])
        vectorsuma = []
        vectorsumadesv = []
        for j in range(len(matrix_final)-1):
            if matrix_final[i][0] == matrix_final[j][0]:
                vectorsuma.append(float(matrix_final[j][3]))
                vectorsumadesv.append(float(matrix_final[j][4]))
        media = np.mean(vectorsuma)
        mediasdesv = np.mean(vectorsumadesv)
        f.write(str(matrix_final[i][0]) + '\t\t'
+ str(matrix_final[i][1]) +
'\t' + str(matrix_final[i][2]) + '\t' + str(media) +
'\t' + str(mediasdesv) + '\n')

```