



universidad  
de león



**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES**

**EPISODIOS DE QUEMA DE BIOMASA E  
INTRUSIÓN DE SULFATOS QUE AFECTARON A  
LA PENÍNSULA IBÉRICA ENTRE 2005 Y 2020**

**EPISODES OF BIOMASS BURNING AND  
EUROPEAN SULPHATE INTRUSIONS AFFECTING  
IBERIAN PENINSULA BETWEEN 2005 AND 2020**

**Autor:** Arturo Martínez Arias

Tutoras: Ana I. Calvo y Estela A. Domingos

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Julio, 2022

# Índice

<b>1.Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2.Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>3.Material y métodos.....</b>	<b>4</b>
3.1 Zona de estudio.....	4
3.2 Bases de datos.....	5
3.2.1 Eventos de quema de biomasa y sulfatos europeos .....	5
3.2.2 Calidad del aire .....	5
3.2.3 Presiones – tipos de tiempo.....	6
3.3 Metodología.....	6
3.3.1 Tratamiento de datos.....	6
3.3.2 Herramientas adicionales para la identificación de eventos .....	7
3.3.3 Tipos de tiempo.....	7
<b>4. Resultados .....</b>	<b>8</b>
4.1 Evolución del número de eventos de quema de biomasa en la Península Ibérica.....	8
4.1.1 Anual.....	8
4.1.2 Por sectores .....	8
4.1.3 Estacional.....	11
4.1.4 Tipos de tiempo.....	12
4.2 Evolución del número de eventos de intrusiones de sulfatos europeos en la Península Ibérica .....	14
4.2.1 Anual.....	14
4.2.2 Por sectores .....	14
4.2.3 Estacional.....	16
4.2.3 Tipos de tiempo.....	16
4.3 Análisis de datos de un caso en León.....	18
4.3.1. Análisis de las superaciones de PM10 .....	18
4.3.2. Análisis del impacto de un incendio forestal .....	19
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>24</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>25</b>

## Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar los eventos de quema de biomasa e intrusión de sulfatos europeos que afectaron a diferentes sectores de la Península Ibérica desde 2005 hasta 2020. Los datos empleados han sido suministrados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Se han analizado las tendencias anuales y estacionales. Además, se han estudiado los tipos de tiempo para comprobar su potencial relación con los eventos de quema de biomasa e intrusión de sulfatos. Los resultados muestran que el sector Noroeste es el más afectado tanto por eventos de quema de biomasa como por intrusiones de sulfatos. Los eventos de quema de biomasa son más frecuentes en verano, mientras que las intrusiones de sulfato son más frecuentes en primavera. Adicionalmente, se identificaron episodios de incendios forestales que coincidieron con superaciones del valor límite diario de PM<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>, establecido por la Directiva 2008/50/CE) en la ciudad de León y se seleccionó un evento para evaluar su efecto en la calidad del aire de la ciudad. El uso de herramientas adicionales (modelo Hysplit y NAAPs) permitió identificar el origen de las masas de aire que llegaron a la ciudad de León en esos días.

Palabras clave: España, Intrusión de sulfatos europeos, León, PM<sub>10</sub>, Quema de biomasa.

## Abstract

The objective of this work is to study biomass burning events and intrusion of European sulphates that affected different sectors of mainland Spain from 2005 to 2020. Data for each sector were retrieved from the site of Ministry for Ecological Transition and Demographic Challenge. The annual and seasonal trends have been analysed. Moreover, the weather types have been studied to check their potential relation with the biomass burning events and intrusion of sulphates. The results showed that the northwest sector is the most affected by both biomass burning events and sulphate intrusions. Biomass burning events are more frequent in summer while sulphate intrusions are more frequent in spring. Additionally, wildfires episodes that coincided with exceedances of the PM<sub>10</sub> daily limit value (50 µg/m<sup>3</sup>, established by Directive 2008/50/EC) in the city of León were identified and an event was selected to evaluate its effect on the city air quality. Moreover, additional tools (model Hysplit and NAAPs) allowed to identify the origin of the air masses that reached the city of León on those days.

Key words: Biomass burning, Intrusion of European sulphate, León, PM<sub>10</sub>, Spain.

## 1.Introducción

La contaminación atmosférica es una de las prioridades mundiales relacionadas con la salud humana según la Organización Mundial de la Salud (OMS) debido a que causa un gran número de muertes prematuras a lo largo del año. Además, incrementa el riesgo de enfermedades tanto cardiovasculares como pulmonares (Organización Mundial de la Salud, 2022).

La ley 34/2015 de 15 de noviembre de calidad del aire y protección de la atmósfera define la contaminación atmosférica como “la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza” (España, 2017).

Los contaminantes atmosféricos se dividen en i) contaminantes primarios: aquellos emitidos directamente por la fuente de emisión y ii) contaminantes secundarios: se originan a partir de los contaminantes primarios a través de una serie de transformaciones químicas y físicas en la atmósfera (Gibson, 2015).

Los contaminantes atmosféricos que se miden en zonas urbanas provienen principalmente de dos tipos de fuentes: las móviles (el tráfico especialmente) y las fijas (industrias, sistemas de calefacción y cualquier otro tipo de instalación que pueda emitir contaminantes). Entre estos contaminantes se encuentran los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, el ozono, los compuestos orgánicos volátiles o los aerosoles. Estos últimos, también denominados material particulado atmosférico (PM), son partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (Gibson, 2015). Según su diámetro aerodinámico (diámetro de una partícula conceptual esférica de densidad  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  que presenta la misma velocidad de sedimentación que la partícula en cuestión) (DeCarlo *et al.*, 2004), las partículas se clasifican en  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_1$  o  $\text{PM}_{0,1}$  (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 10, 2,5, 1 y 0,1  $\mu\text{m}$ , respectivamente). Los efectos de las partículas atmosféricas sobre la salud están directamente asociados a su tamaño, una vez que este determina su deposición en el trato respiratorio humano. Mientras que  $\text{PM}_{2,5}$  es más peligroso al ser capaz de llegar a mayor profundidad en los pulmones, el  $\text{PM}_{10}$  es usado como indicador de las partículas que pueden atravesar la región torácica (Pope y Dockery, 2006).

Otro contaminante de interés es el sulfato, el cual puede provenir tanto de fuentes locales como regionales (generación de energía y/o transporte marítimo). En la Península Ibérica hay que atribuir una parte importante a la contaminación regional y al transporte de largo alcance desde el continente europeo y africano (Rodríguez *et al.*, 2002). En el caso de la contaminación

procedente del continente africano, puede llegar a incrementar hasta un 50% la concentración de SO<sub>2</sub> en las zonas cercanas a los puertos (Nunes *et al.*, 2020).

Una de las principales fuentes de sulfato antropogénico son las centrales térmicas. Por otro lado, las principales fuentes naturales de gases precursores de sulfatos son las emisiones biogénicas y volcánicas. Además, hay que tener en cuenta que hay compuestos orgánicos y microorganismos que emiten gases sulfurados que acaban convirtiéndose en SO<sub>2</sub> debido a reacciones fotoquímicas promovidas por la fuerte radiación solar durante la época de verano (Wang *et al.*, 2020; Pósfai y Molnár, 2000). También cabe mencionar que el sulfato antropogénico tiene como principal precursor gaseoso el SO<sub>2</sub>, que es emitido principalmente en los procesos de combustión de aquellos combustibles ricos en azufre, y también, aunque en menores cantidades, por la quema de biomasa, fundiciones y producción de papel (Andreae y Rosenfeld, 2008).

La quema de biomasa se considera una fuente importante de contaminantes atmosféricos. Puede tratarse de una actividad de origen natural, como los incendios forestales (Linares *et al.*, 2018) (siempre que no sean provocados), así como antropogénica, como la combustión de biomasa en sistemas de calefacción (Vicente y Alves, 2018) y la quema de residuos de poda o rastrojos para la eliminación de desechos agrícolas (Alves *et al.*, 2018). La combustión doméstica de biomasa para calefacción es una de las fuentes más importantes de PM a nivel mundial. Su emisión viene condicionada, por un lado, por el tipo y la calidad del combustible y, por otro lado, por los dispositivos que se emplean a la hora de la combustión, ya que las tecnologías más modernas emiten una menor cantidad de contaminantes que las más antiguas (Vicente y Alves, 2018).

Los incendios son una de las principales fuentes de emisión de partículas en las zonas rurales, llegando a producir un aumento muy significativo en la concentración de partículas con respecto a la existente durante los periodos sin contaminación (Alonso-Blanco *et al.*, 2014). Además, también contribuyen a que en esas zonas se superen las concentraciones medias diarias de PM<sub>10</sub> permitidos (50 µg/m<sup>3</sup>) según la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Así, Alonso-Blanco *et al.* (2014), en su estudio realizado a 26 km de la ciudad de León, en la zona de Carrizo de la Rivera, encontraron que la contaminación causada por incendios produce en zonas rurales un aumento en las concentraciones de PM<sub>10</sub> que llegaron a alcanzar los 90 µg/m<sup>3</sup>,

una concentración 4,5 veces superior a la registrada en ausencia de incendios, que no suele alcanzar los  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Si nos centramos en los incendios ocurridos en la Península Ibérica entre 2006 y 2015, la mayoría se repartieron entre tres comunidades autónomas: Galicia, Asturias y Castilla y León. Del total de la superficie forestal de cada una de las citadas comunidades autónomas, se quemaron el 29%, 14% y 13%, respectivamente. Dentro de este decenio, destaca en la provincia de León el incendio de Castrocontrigo, que arrasó un total de 11.592 Ha de superficie forestal, de las que 10.096 eran superficie arbolada (Vélez, 1990; López y López, 2019). Durante este incendio se emitieron importantes concentraciones de contaminantes a la atmósfera que alcanzaron la ciudad de León, localizada a unos 70 km del foco del incendio (Alonso-Blanco *et al.*, 2018).

Entre 2012 y 2021 en la provincia de León se registraron un total de 4.126 incendios (un 26,50% de los incendios totales de la comunidad autónoma) que arrasaron un total de 73.661 Ha, lo que supone un 43,12% del total de superficie quemada en toda la comunidad autónoma de Castilla y León. De estos datos se deriva que los incendios en la provincia de León son de mayor extensión que en las otras provincias (Junta de Castilla y León, 2022).

El presente trabajo se centra en analizar la influencia de la quema de biomasa y de los sulfatos europeos en diferentes sectores de la Península Ibérica desde 2005 hasta 2020. Además, se analizan los tipos de tiempo bajo los que tienen lugar estas situaciones y se presenta un estudio más pormenorizado en la ciudad de León.

## 2. Objetivos

Los principales objetivos de este estudio son:

1. Estudiar la tendencia anual del número de eventos de quema de biomasa y de intrusiones de sulfatos europeos registradas en los diferentes sectores de la Península Ibérica establecidos por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, desde 2005 hasta 2020.
2. Analizar los tipos de tiempo bajo los que tuvieron lugar los eventos de incendios forestales y de intrusión de sulfatos europeos en dichos sectores territoriales.
3. Identificar los episodios de incendios forestales que coincidieron con superaciones del valor límite diario de  $\text{PM}_{10}$  ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , establecido por Directiva 2008/50/CE) en la ciudad de León.

4. Analizar un incendio forestal que afectó a la ciudad de León y estudiar el impacto que tuvo en la calidad del aire.

### 3. Material y métodos

#### 3.1 Zona de estudio

El presente estudio se ha llevado a cabo en España. En concreto, se considerará la distribución territorial por sectores establecida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España (Querol *et al.*, 2013) (Figura 1): Canarias; Islas Madeira; Suroeste (SW): Andalucía Occidental, Sur de Extremadura, Algarve (Portugal); Sureste (SE): Andalucía Oriental, Murcia; Levante: Comunidad Valenciana hasta el Delta del Ebro; Oeste (W): Zona Central de Portugal; Centro: Resto de Extremadura, Castilla-La Mancha, Comunidad de Madrid, Castilla y León (excepto el norte y noroeste); Noroeste (NW): Galicia, Asturias, noroeste de Castilla y León, norte de Portugal; Norte (N): Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja y norte de Castilla y León; Noreste (NE): Aragón, Cataluña; Baleares.

De todos los sectores nos hemos quedado únicamente con aquellos que se encuentran en la Península Ibérica, que comprende los sectores, Norte (N), Noroeste (NW), Noreste (NE), Centro (C), Levante, Sureste (SE) y Suroeste (SW), quedando excluido el sector Oeste (W), puesto que no se dispone de los datos necesarios para llevar a cabo el análisis.



Figura 1: Sectores en los que se divide la Península Ibérica según los criterios establecidos por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Querol *et al.*, 2013).

Además, se pretende profundizar en el sector Norte, puesto que engloba la ciudad de León, en la que se ha realizado un estudio específico sobre la influencia de un incendio forestal en la calidad del aire de la ciudad.

La ciudad de León (España) se encuentra en el noroeste de la Península Ibérica (42° 36' 50" N, 5° 33' 38" W, 846 m asl). El clima de esta región es de tipo mediterráneo con características continentales, con una temperatura media anual de 10,9 °C. Los eventos de lluvia acurren de manera regular durante todo el año siendo el mínimo en verano (80 mm) y el máximo en otoño (190 mm). Los inviernos son fríos con heladas frecuentes (74 heladas de media al año) (Castro *et al.*, 2010).

León se caracteriza por la ausencia de grandes industrias, lo que hace que el tráfico sea considerado como la principal fuente de emisión de partículas (Castro *et al.*, 2010; Oduber *et al.*, 2021).

## 3.2 Bases de datos

### 3.2.1 Eventos de quema de biomasa y sulfatos europeos

En este trabajo se han estudiado los días en los que los distintos sectores territoriales definidos en la sección anterior se han visto afectados por eventos de combustión de biomasa en incendios forestales o por la llegada de sulfatos de origen europeo durante el periodo 2005-2020. La base de datos que hemos empleado ha sido suministrada en el marco del encargo del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) para la detección de episodios naturales de aportes transfronterizos de partículas y otras fuentes de contaminación de material particulado, y de formación de ozono troposférico.

La identificación de estos eventos se basa en que los episodios europeos presentan posibilidad de niveles altos de PM antropogénico transportado desde Europa y trazado por altos niveles de sulfato según el modelo NAAPs (*Navy Aerosol Analysis and Prediction System*) de NRL (*Naval Research Laboratory*) (<https://www.troposfera.org/conceptos/modelos-de-prediccion-de-calidad-del-aire/naaps/>) y los de combustión de biomasa tienen posibilidad de niveles altos de PM de incendios forestales trazados por el módulo 'smoke' del mismo modelo (MITECO, 2018).

### 3.2.2 Calidad del aire

Se han empleado datos procedentes de la Red de Calidad del aire de Castilla y León (<http://servicios.jcyl.es/esco/cargarFrmDatosHistoricos.action>), en concreto, de las estaciones de muestreo León1 (estación urbana) y León4 (estación de fondo)

La estación León1 se encuentra en una zona urbana (Avda. San Ignacio de Loyola), en el núcleo urbano de la ciudad de León, con tráfico de coches, rodeado de edificios y sin vegetación cercana. Hay que tener en cuenta también que se encuentra cerca de un colegio, lo que hará que en las horas de entrada y salida de alumnos aumente la concentración de vehículos y, por tanto, la concentración de contaminantes.

En cuanto a la estación León4, se encuentra en una zona suburbana/fondo (coto escolar) y, por lo tanto, el tráfico es menor, aunque sigue estando dentro de la zona de influencia del núcleo urbano de la ciudad de León. Además, se encuentra en una zona verde y con vegetación alrededor. En cuanto a los edificios públicos cercanos, hay un coto escolar, por lo que en temporada de uso puede haber un aumento en la concentración de contaminantes debido a la mayor actividad en la zona.

### 3.2.3 Presiones – tipos de tiempo

Los datos de presión utilizados para la determinación de los tipos de tiempo han sido obtenidos de la página web del Centro Nacional de Investigación Atmosférica, disponibles en <https://ncar.ucar.edu/>

## 3.3 Metodología

### 3.3.1 Tratamiento de datos

Para organizar y llevar a cabo el tratamiento de los datos hemos utilizado Excel, apoyándonos especialmente en tablas dinámicas.

Hemos utilizado el paquete estadístico SPSS (IBM Statistics Software V.21) para aplicar el test no-paramétrico de Kruskal-Wallis (Kruskall y Wallis, 1952), ( $p < 0,05$ ), seguido de la prueba de Dunn (1964), y estudiar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de contaminantes registradas antes, durante y después de un incendio forestal estudiado en León.

Para llevar a cabo el estudio de la evolución estacional del número de episodios en los diferentes sectores, se han definido las estaciones del año de la siguiente manera:

- Primavera: 21 de marzo al 20 de junio.
- Verano: 21 de junio al 20 de septiembre.
- Otoño: 21 de septiembre al 20 de diciembre.
- Invierno: 21 de diciembre al 20 de marzo.

### 3.3.2 Herramientas adicionales para la identificación de eventos

Para la caracterización de un evento de quema de biomasa que afectó a la ciudad de León se han utilizado dos modelos: a) Hysplit (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>), para obtener las retrotrayectorias de las masas de aire que han llegado a la ciudad de León para ver si en su camino han pasado por la zona del incendio pudiendo haber arrastrado partículas del mismo; b) NAAPs para estudiar si los incendios o sus penachos han afectado a nuestra zona de estudio.

### 3.3.3 Tipos de tiempo

La determinación de los diferentes tipos de tiempo se basa en los procedimientos que Jenkinson y Collison (1977) y Jones *et al.* (1993) utilizaron para definirlos en las Islas Británicas pero aplicado para la Península Ibérica. Los índices que se usan son: flujo del sur, flujo del oeste, flujo total, vorticidad del sur, vorticidad del oeste y vorticidad total. Estos índices se calculan usando 16 valores de presión a nivel del mar obtenidos de 16 puntos de una malla obtenida gracias a la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Este método permite obtener un total de 26 tipos de tiempo (Tabla 1) (Fernández-Raga, 2011).

Tabla 1: Tipos de tiempo de Lamb (adaptado de Fernández-Raga, 2011)

Tipos Anticiclónicos		Direccionales puros		Tipos Ciclónicos	
<b>A</b>	Anticiclónico			<b>C</b>	Ciclónico
<b>ANE</b>	Anticiclónico-Noreste	<b>NE</b>	Noreste	<b>CNE</b>	Ciclónico-Noroeste
<b>AE</b>	Anticiclónico-Este	<b>E</b>	Este	<b>CE</b>	Ciclónico-Este
<b>ASE</b>	Anticiclónico-Sureste	<b>SE</b>	Sureste	<b>CSE</b>	Ciclónico-Sureste
<b>AS</b>	Anticiclónico-Sur	<b>S</b>	Sur	<b>CS</b>	Ciclónico-Sur
<b>ASW</b>	Anticiclónico-Suroeste	<b>SW</b>	Suroeste	<b>CSW</b>	Ciclónico-Suroeste
<b>AW</b>	Anticiclónico-Oeste	<b>W</b>	Oeste	<b>CW</b>	Ciclónico-Oeste
<b>ANW</b>	Anticiclónico-Noroeste	<b>NW</b>	Noroeste	<b>CNW</b>	Ciclónico-Noroeste
<b>AN</b>	Anticiclónico-Norte	<b>N</b>	Norte	<b>CN</b>	Ciclónico-Norte

## 4. Resultados

### 4.1 Evolución del número de eventos de quema de biomasa en la Península Ibérica

A lo largo de este apartado se analizará la evolución temporal del número de días en los que la Península Ibérica se vio afectada por eventos de quema de biomasa, desde el 1 de enero de 2005 hasta el 31 de diciembre de 2020.

#### 4.1.1 Anual

La Figura 2 muestra la evolución anual del número de días con eventos de quema de biomasa en la Península Ibérica a lo largo de los años de estudio.

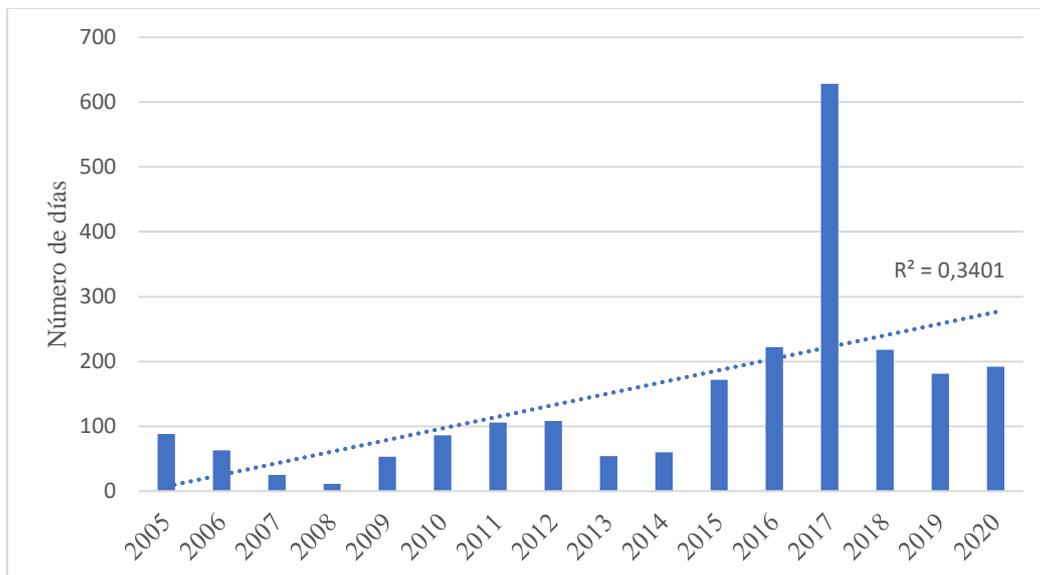


Figura 2: Evolución anual del número total de días con eventos de quema de biomasa en la Península Ibérica entre los años 2005 y 2020.

Se observa una tendencia positiva significativa ( $p > 0,05$ ;  $R^2 > 0,247$ ) en la ocurrencia (número de días) de eventos de quema de biomasa (Figura 2).

Se alcanzó un pico en 2017 con un total de 628 días afectados por eventos de quema de biomasa. En este año cabe destacar que en la Comunidad Autónoma de Galicia, entre el 8 y el 17 de octubre, se quemaron aproximadamente 48862 Ha repartidas en 393 incendios forestales (Chas-Amil *et al.*, 2020). Por el contrario, el año con el valor más bajo de eventos se registró en 2008, con un total de 11 casos de quema de biomasa.

#### 4.1.2 Por sectores

En la Figura 3 se observa cómo se distribuyeron los casos de quema de biomasa por cada sector dentro del periodo de estudio.

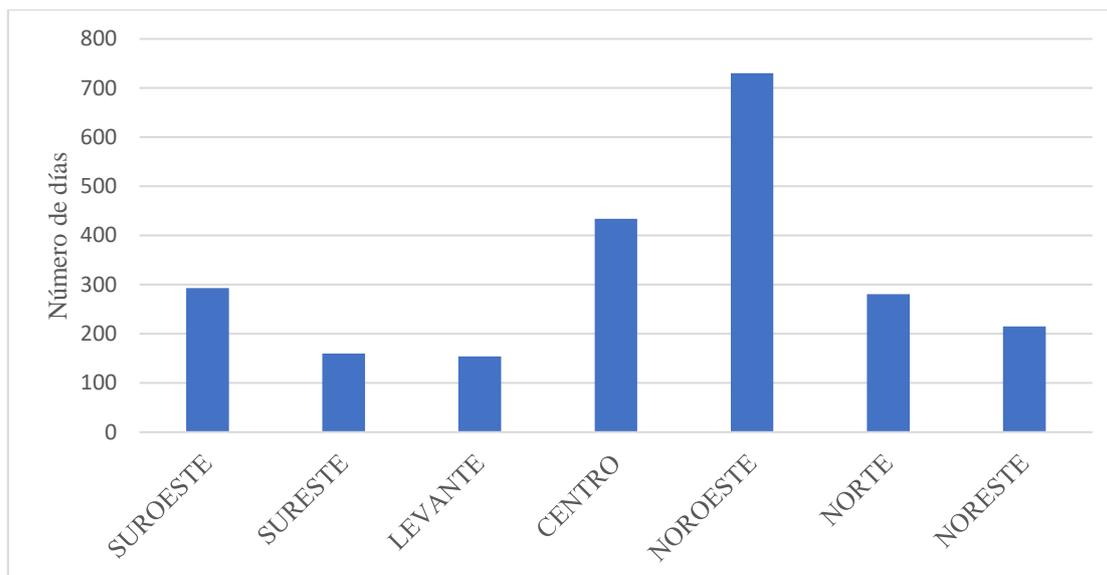


Figura 3: Número total de días con eventos de quema de biomasa en los distintos sectores entre los años 2005-2020

En la zona Noroeste el número eventos fue mayor, con 723 días (con una media anual de incendios de  $45,63 \pm 27,20$ ). Este sector incluye a Galicia, León y Asturias. Estas zonas son de las que mayores incidentes por incendios tienen en la época de verano y suelen ser episodios de gran importancia, ya que suelen ser de un tamaño bastante grande y su extinción suele tardar en darse.

La zona Centro es la segunda con más casos, con un total de 434. Esto puede deberse a su localización, puesto que, al estar completamente rodeada por otros sectores, puede verse afectada por todas las zonas de alrededor.

Una vez visto los casos ocurridos en cada sector, vamos a ver cómo se distribuyen los casos para cada uno de ellos entre 2005 y 2020 (Figura 4).

Como podemos observar, en prácticamente todos los sectores hay una tendencia creciente significativa ( $p > 0,05$ ;  $R^2 > 0,247$ ) en el número de días de casos de eventos de quema, alcanzando su máximo en el año 2017. Destaca como excepción el sector Noroeste, donde el número de casos que se dan es más constante a lo largo del periodo de estudio (la tendencia no es significativa). El máximo de eventos de quema de biomasa en un año se da en el sector Centro en 2017 donde se registraron un total de 150 casos de eventos de quema de biomasa.



Figura 4: Número total de días con casos de eventos de quema de biomasa en cada sector para el periodo 2005-2020

#### 4.1.3 Estacional

El mayor número de eventos de quema de biomasa ocurrió en verano, con una media de  $33,9 \pm 21,0$  días (Figura 5). En esta estación, las elevadas temperaturas y la sequía crean condiciones favorables para la ocurrencia y propagación de incendios forestales. Al verano le siguen los valores de otoño e invierno, entre los que casi no hay diferencia en el número de eventos de quema de biomasa. En estas estaciones, lo más probable es que los casos estén relacionados con quema de rastrojos por parte de la gente los cuales se salen de control y acaban generando incendios. En cuanto a la primavera, es una época más húmeda y a finales de esta estación la temperatura suele ser más agradable y la vegetación está más verde lo que hace que la quema de biomasa sea menor que en el resto de las estaciones. La distribución de estos casos estacionales entre los distintos sectores es bastante similar (Figura 6), siendo el verano la época con mayor número de casos de media mientras que las otras 3 estaciones varían más su posición dependiendo del sector. El sector que más se diferencia del resto de sectores es el Noroeste, donde el mayor número de casos es el invierno. Esto puede estar debido a que en la época de quema de rastrojos en esa zona se salgan de control causando más incendios que en otras épocas con mayor riesgo como el verano.

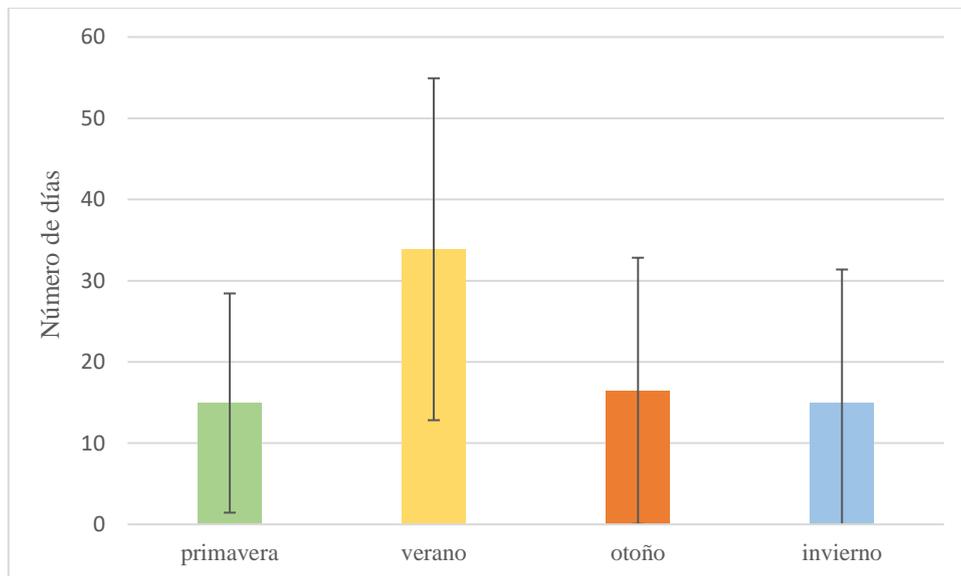


Figura 5: Número medio de días afectados por eventos de quema de biomasa en cada estación entre los años 2005 y 2020

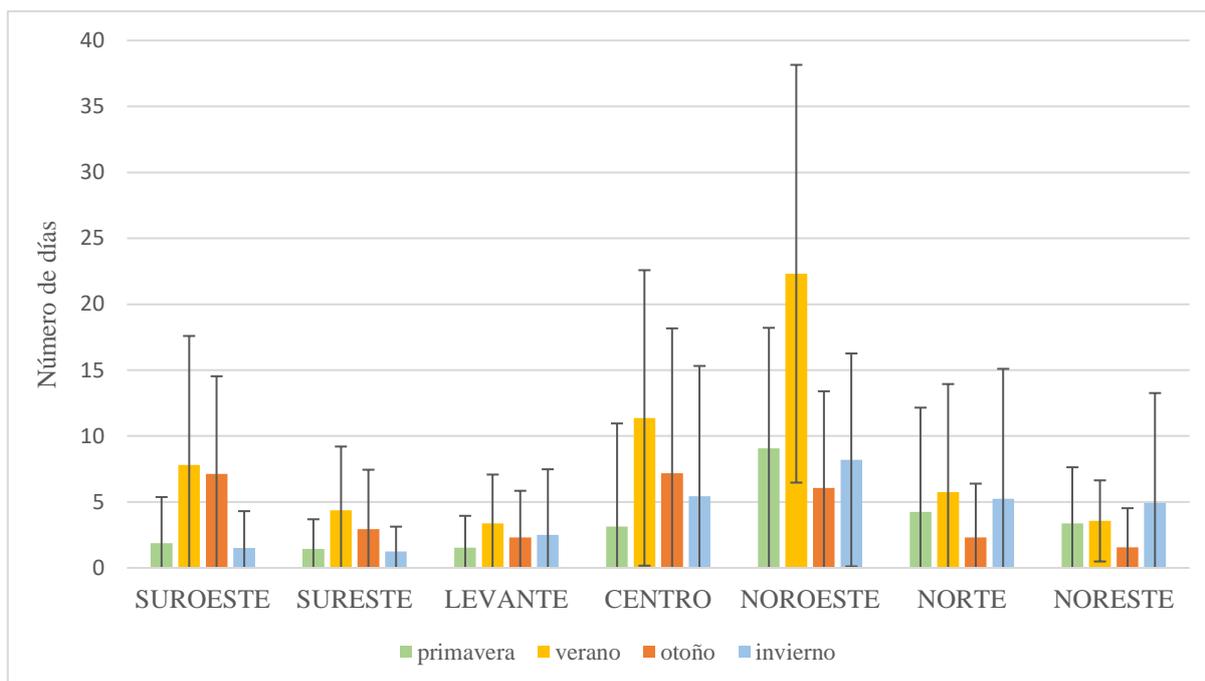


Figura 6: Número medio de días (y desviación estándar) con casos de quema de biomasa en los distintos sectores para cada estación dentro del periodo de estudio

#### 4.1.4 Tipos de tiempo

En este apartado veremos cómo se distribuyen los días con eventos de quema de biomasa en función de los tipos de tiempo (Figura 7). Estos tipos de tiempo, junto con diferentes variables climáticas, tendrán efectos sobre los incendios (Rodrigues *et al.*, 2020). En la Figura 7 se puede observar un mayor número de eventos de quema de biomasa (durante todo el periodo de estudio) asociados al tipo de tiempo Noroeste (395 episodios) y Anticiclónico (387 episodios). Por el contrario, el menor número de eventos se dan con el tipo de tiempo Ciclónico-Noroeste (5 episodios) y Ciclónico-Oeste (11 episodios).

Si calculamos el cociente entre el número de días con evento de quema de biomasa y los días totales que se registra cada tipo de tiempo (Figura 8), se observa que el tipo Ciclónico-Sureste es el que presenta mayor cociente, mientras que para el Noreste y el Anticiclónico, el cociente es bastante menor.

Podemos fijarnos en los tipos de tiempo cuyo porcentaje es superior al 50% (ASE, CNE NE, E, AN, CE, CSE), para los cuales, cuando se presentan, lo más probable es que se registre un episodio de quema de biomasa. Se observa que todos estos tipos de tiempo (salvo AN) tienen una componente del este.

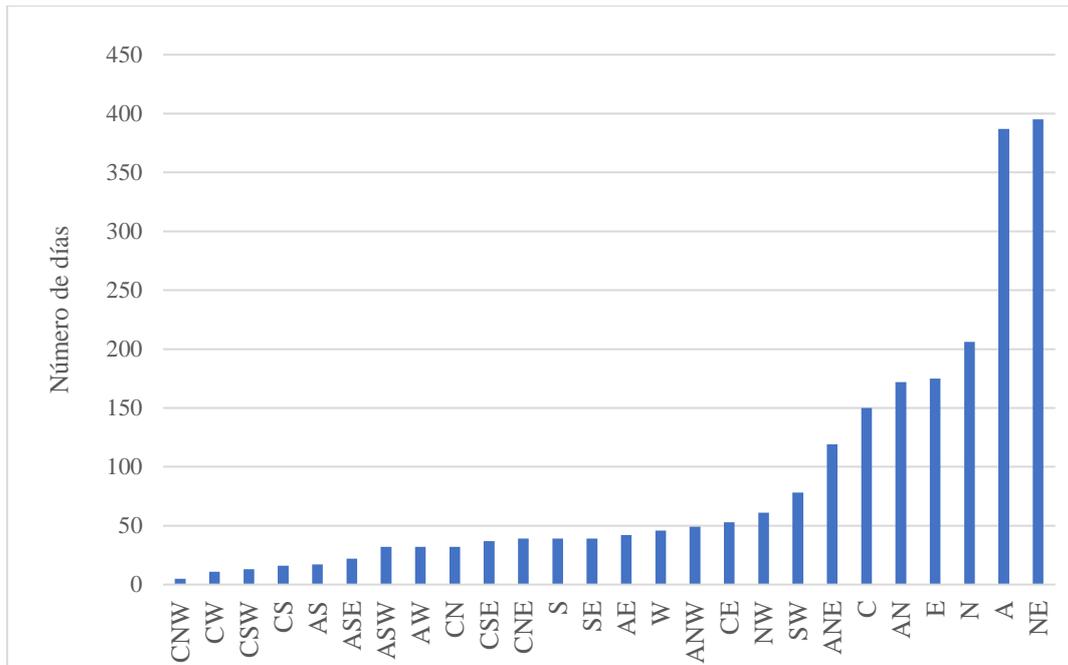


Figura 7: Número de días de eventos de quema de biomasa asociados a los diferentes tipos de tiempo durante todo el periodo de estudio.

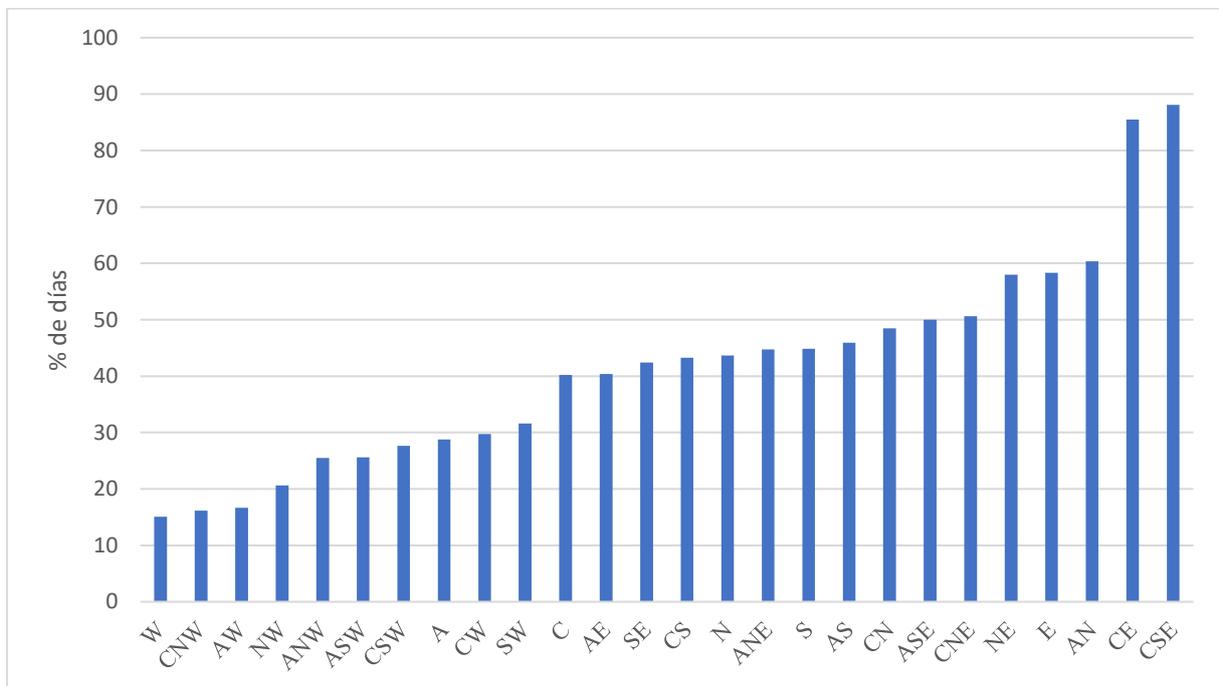


Figura 8: Cociente entre el número de días con eventos de quema de biomasa para cada tipo de tiempo y número total de días que se ha dado ese tipo de tiempo durante el periodo de estudio.

## 4.2 Evolución del número de eventos de intrusiones de sulfatos europeos en la Península Ibérica

### 4.2.1 Anual

Los casos de intrusión de sulfatos procedentes de Europa son bastante intermitentes, tal y como se puede ver en la Figura 9. Destaca el año 2016, en el que se registró un pico en el número de casos, con 109 días afectados por la llegada de sulfatos europeos.

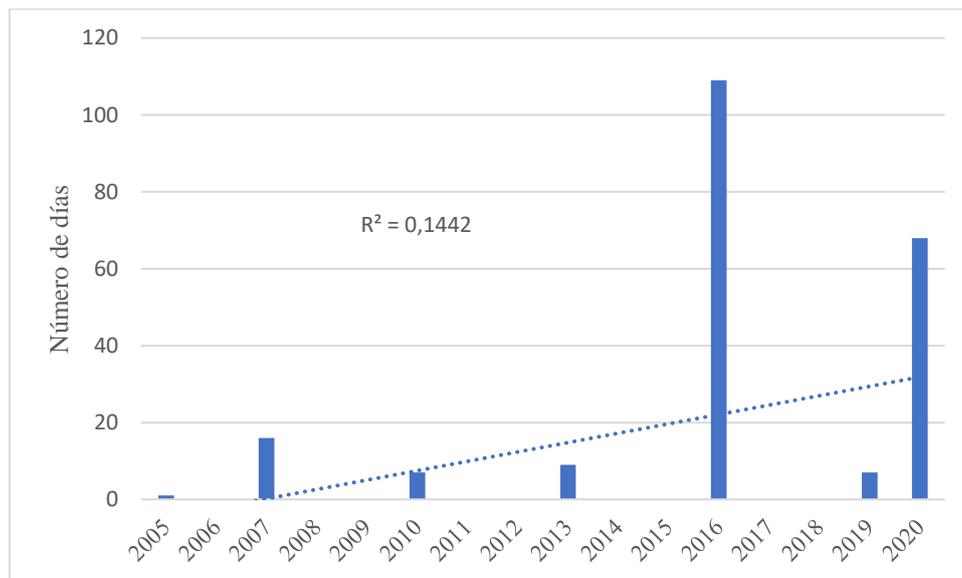


Figura 9: Número de días con intrusión de sulfatos durante el periodo 2005-2020

### 4.2.2 Por sectores

En la Figura 10 se puede observar el número de casos de intrusión que se han dado en cada uno de los diferentes sectores durante todo el periodo de estudio. Por otro lado, en la Figura 11 se ha representado la evolución anual de los casos de intrusión en los diferentes sectores. Se observa una tendencia creciente, pero no es significativa ( $p > 0,05$ ;  $R^2 > 0,247$ ). Cabe destacar que los sectores con más casos son aquellos más cercanos al continente europeo, de donde proceden estas intrusiones.

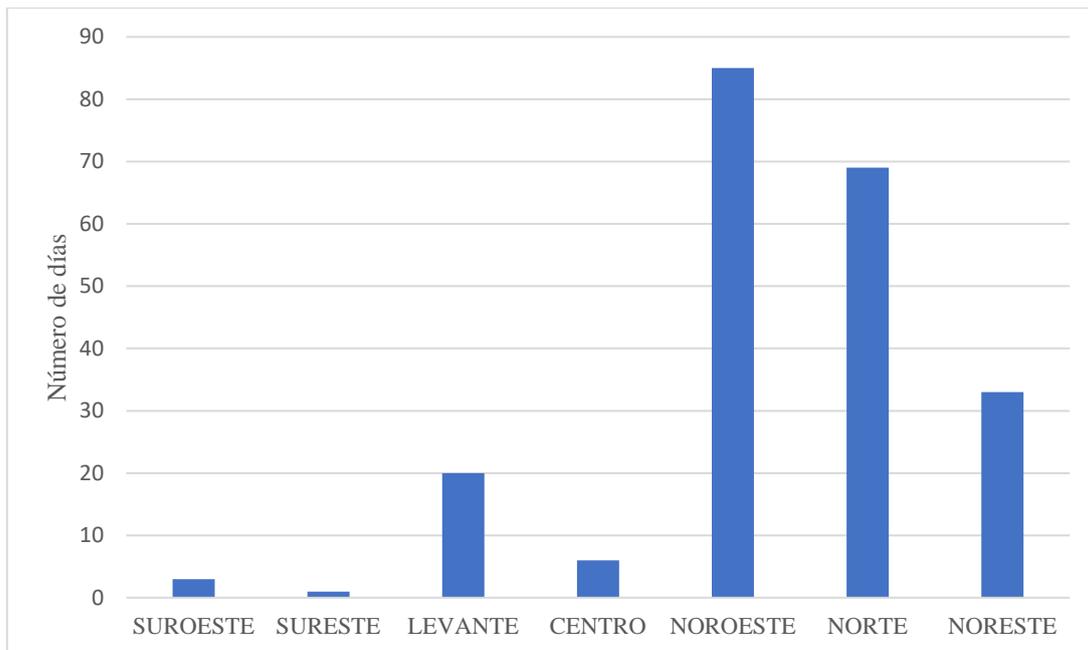


Figura 10: Número total de días de intrusión de sulfatos para cada sector en el periodo 2005-2020

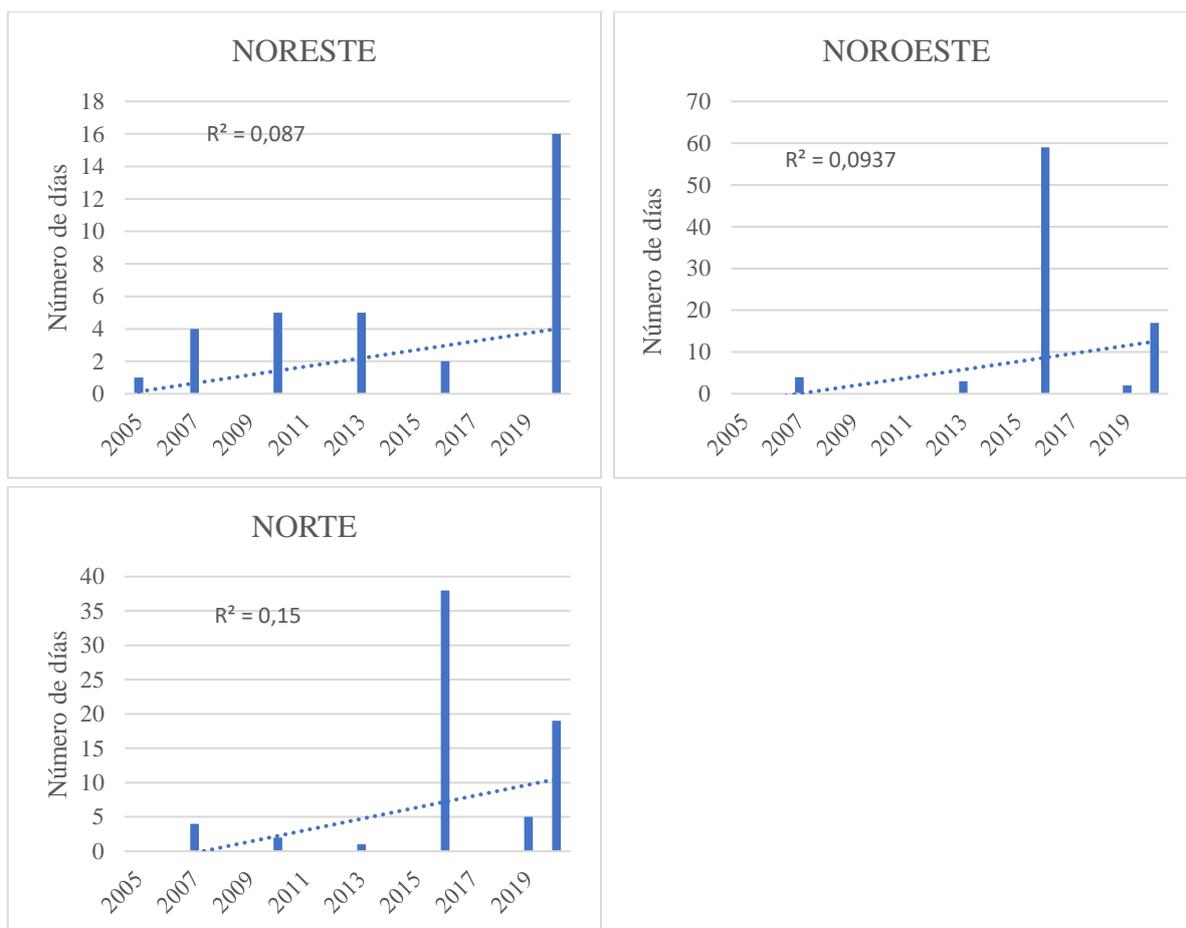


Figura 11: Número total de días con intrusión de sulfatos por sectores en el periodo 2005-2020 (los sectores Levante, Centro, Suroeste y Sureste no están incluidos por falta de datos).

Dentro del periodo estudiado (2005-2020), el año en el que se dieron más casos fue el 2016, donde se llegaron a registrar casi 60 episodios de intrusión de sulfatos en el sector Noroeste y casi 40 en el Norte.

#### 4.2.3 Estacional

Las estaciones que registraron un mayor número medio de días con intrusión fueron primavera y verano, con medias de  $3,4 \pm 9,4$  y  $2,3 \pm 7,0$ , respectivamente (Figura 12). Durante estas estaciones, la fuerte radiación solar aumenta la temperatura y contribuye a la formación de radicales OH, favoreciendo así la formación de sulfatos secundarios (Querol *et al.*, 2008).

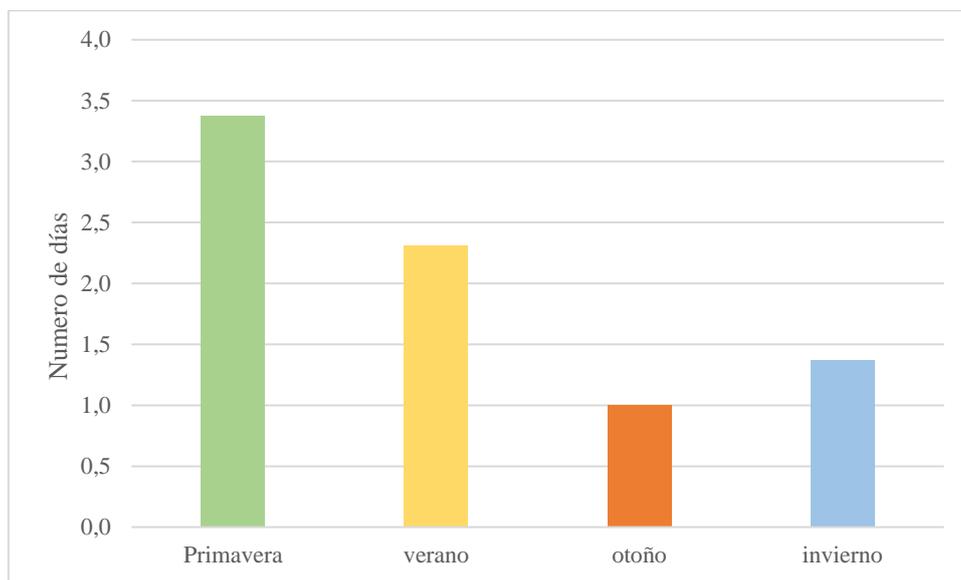


Figura 12: Número medio de días afectados por intrusión de sulfatos en cada estación entre los años 2005 y 2020.

#### 4.2.3 Tipos de tiempo

Como se observa en la Figura 14, el mayor número de casos de intrusión de sulfatos se registran durante los tipos de tiempo Anticiclónico puro seguido de Ciclónico. Dentro de los demás, se puede ver que hay muchos casos cuya dirección es Norte y Noroeste.

En relación con el cociente del número de casos por cada tipo de tiempo y el número total de días de cada tipo de tiempo (Figura 15) se observa que el tipo de tiempo predominante fue el Ciclónico-Oeste. Sin embargo, este cociente es muy pequeño para todos los casos ya que el número de intrusiones en el periodo total del estudio es muy reducido.

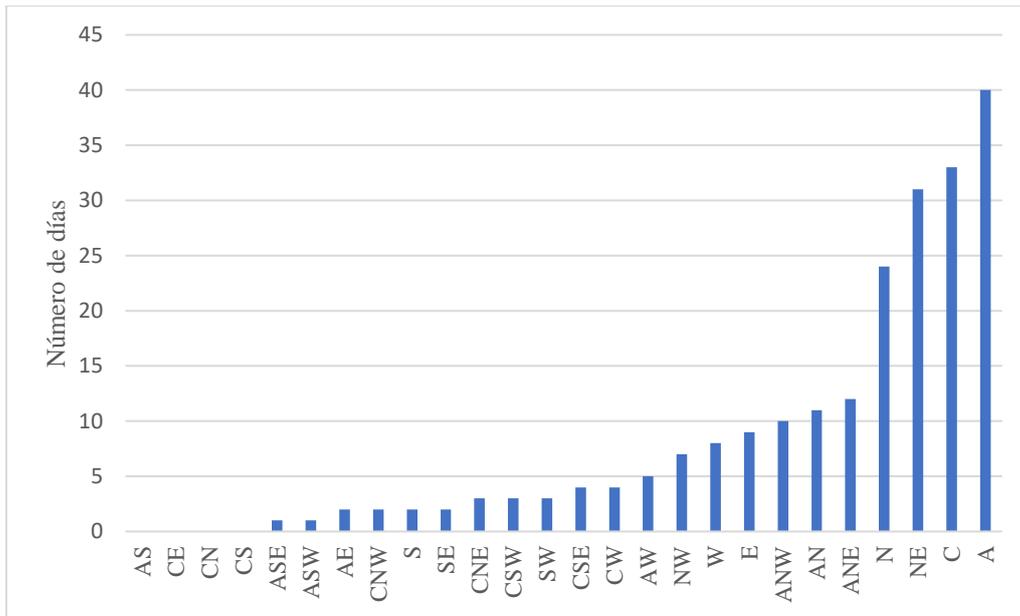


Figura 14: Número de días totales con intrusión de sulfatos para cada tipo de tiempo durante el periodo 2005-2020

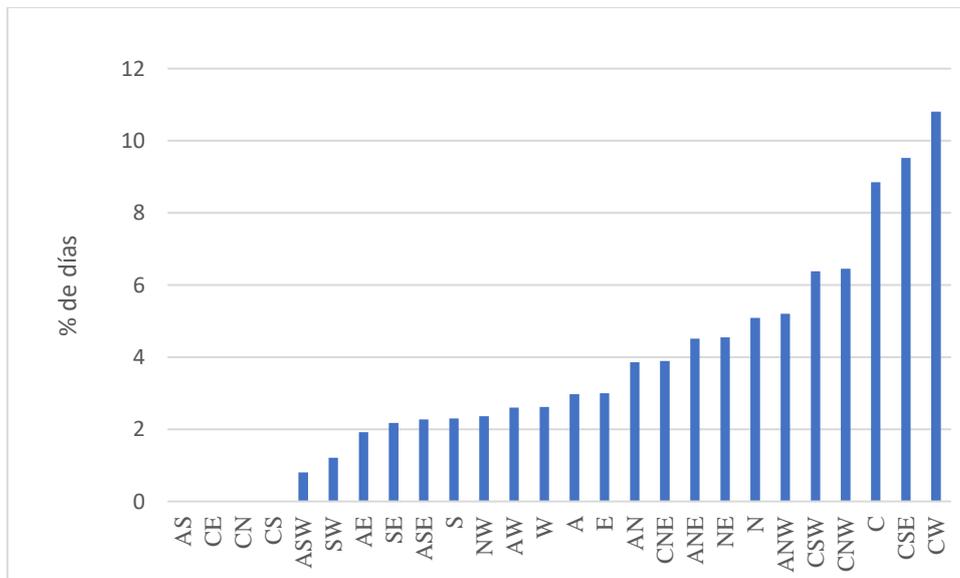


Figura 15: Cociente entre episodios de intrusión de sulfatos para cada tipo de tiempo y número total de días que se ha dado ese tiempo

En la Figura 15 se puede observar cómo los tipos de tiempo para los que hay más casos son principalmente los de tipo Ciclónico (Ciclónicos puros y Ciclónicos que no son direccionales puros) ya que estos son los que están asociados a mayor inestabilidad y un mayor movimiento de masas de aire.

### 4.3 Análisis de datos de un caso en León

#### 4.3.1. Análisis de las superaciones de PM<sub>10</sub>

Durante el período de estudio (2005-2020) se registraron en la ciudad de León un total de 338 superaciones del valor límite diario de PM<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>) establecido por la Directiva 2008/50/CE (Tabla 2).

Se observa una disminución en el número de superaciones del valor límite diario de PM<sub>10</sub> durante el transcurso de los años. En 2005, cuando se inició el estudio, se registró el mayor número de superaciones, con un total de 93 en la estación León1 (L1). Para la estación León4 (L4) no hay datos hasta 2010, donde se dieron 3 superaciones. A partir de 2009 las superaciones se han mantenido por debajo de las 10 para la estación L1, a excepción de los años 2015 y 2017, en los que se dieron 12 y 13 superaciones, respectivamente. Por otro lado, en la estación L4 no se han sobrepasado las 4 superaciones anuales, a excepción de 2011, en el que se registraron 8.

Tabla 2: Concentración media anual de PM<sub>10</sub> y número de días anuales con superación del límite legal (50 µg/m<sup>3</sup>) para el periodo de estudio (2005-2020)

	Estación León1		Estación León4	
	Concentración media PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Número de días con superación de PM <sub>10</sub>	Concentración media PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Número de días con superación de PM <sub>10</sub>
2005	41,9±15,1	93	Sin Datos	Sin Datos
2006	39,1±15,4	76	Sin Datos	Sin Datos
2007	39,5±13,2	61	Sin Datos	Sin Datos
2008	32,5±13,8	38	Sin Datos	Sin Datos
2009	22,3±9,6	2	Sin Datos	Sin Datos
2010	18,3±7,7	1	18,0±9,2	3
2011	18,3±9,7	5	19,5±10,4	8
2012	18,1±10,8	2	18,7±11,4	4
2013	18,2±9,7	7	15,9±8,0	1
2014	18,6±9,3	1	16,3±7,9	1
2015	22,5±11,2	12	14,1±7,9	0
2016	19,9±9,3	4	11,8±6,6	0
2017	23,7±11,6	13	12,9±7,9	2
2018	20,9±10,2	8	10,8±7,8	4
2019	20,2±10,1	7	12,0±7,2	0
2020	17,7±11,7	8	11,7±9,2	4

Además, la media anual de la concentración de  $PM_{10}$  de la estación L1 también ha sufrido un descenso a lo largo del periodo de estudio, pasando de  $41,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2005 a  $17,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2020. Para la estación L4, aunque la concentración media no ha sufrido tanta variación, se observa un descenso ( $18,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2010 a  $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2020).

Del total de superaciones del valor límite diario registrados, alrededor del 20% estuvieron probablemente influenciados por eventos de quema de biomasa, ya que coincide con los días en los que se detectaron casos de quema de biomasa en el sector Norte, en el que se incluye León.

#### 4.3.2. Análisis del impacto de un incendio forestal

El incendio seleccionado para el análisis tuvo lugar en la zona del País Vasco francés, entre los días 10 al 14 de marzo de 2014 (localizado a unos 325 km de la ciudad de León). Durante este periodo la concentración de  $PM_{10}$  detectada en la ciudad de León por las estaciones León1 y León4 (Figura 16) sufrió un ascenso.

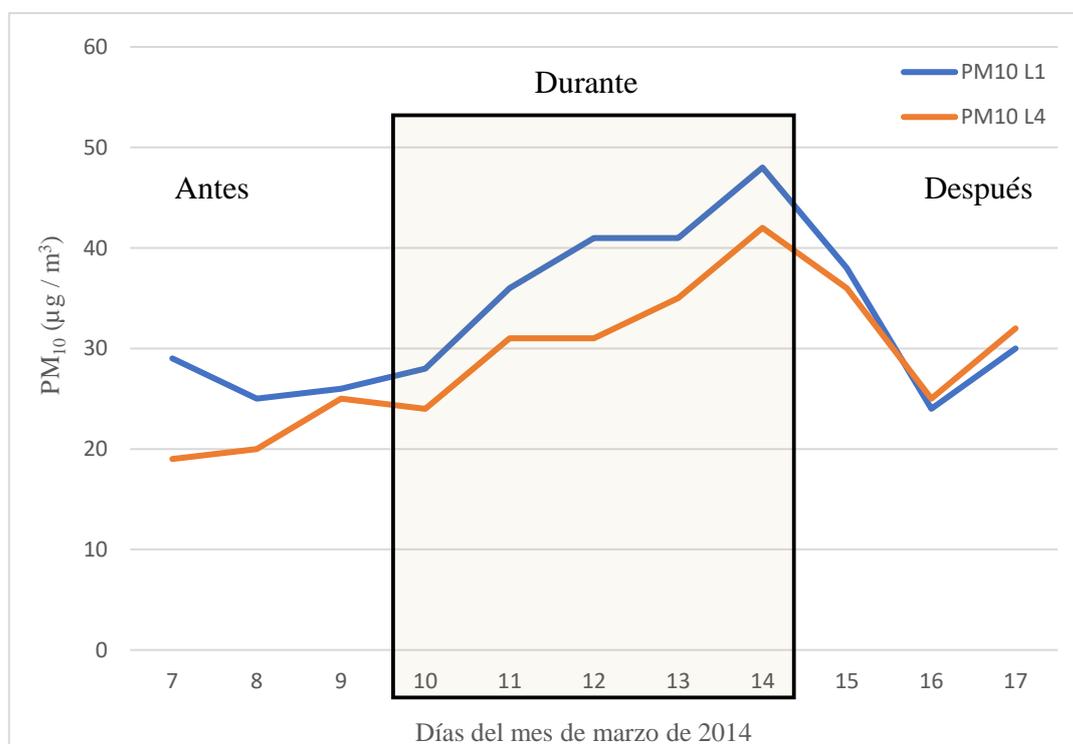


Figura 16: Evolución de la concentración de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) antes, durante y después del incendio en la estación León1 (L1) y León 4 (L4). Se ha indicado con un rectángulo de color el periodo de ocurrencia del incendio.

Como se puede observar en la Figura 16, hay un aumento en la concentración de PM<sub>10</sub> registrado en la ciudad de León durante el periodo del incendio. En base a los datos registrados por las estaciones de calidad del aire de León, hemos establecido tres intervalos de tiempo (Tabla 3):

- Antes del incendio: del 7 al 9 de marzo.
- Durante el incendio: del 10 al 14 de marzo.
- Después del incendio: del 15 al 17 de marzo.

Tabla 3: Casos detectados de quema de biomasa en los sectores NW, N y NE, tipos de tiempo y concentración de PM<sub>10</sub> en las estaciones L1 y L4 entre los días 10-14 de marzo de 2014

FECHA	NOROESTE	NORTE	NORESTE	TIPO DE TIEMPO	L1 PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	L4 PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
07/03/2014				A	29	19
08/03/2014				S	25	20
09/03/2014				S	26	25
10/03/2014		1		E	28	24
11/03/2014		1	1	E	36	31
12/03/2014	1	1		E	41	31
13/03/2014	1	1		A	41	35
14/03/2014	1	1		A	48	42
15/03/2014	1		1	ANE	38	36
16/03/2014	1		1	ANE	24	25
17/03/2014	1		1	N	30	32

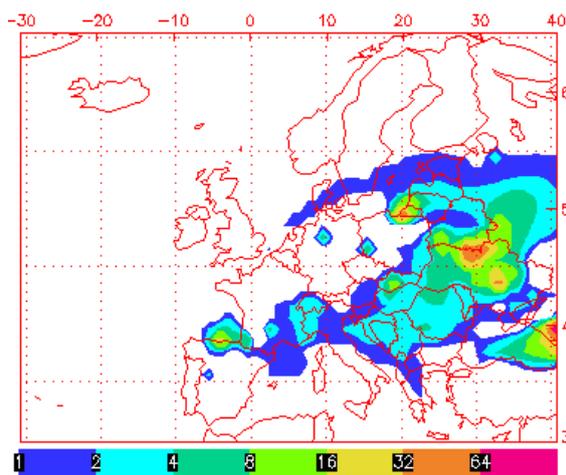
En la estación L1 se observó que la concentración de PM<sub>10</sub> paso de 28 µg/m<sup>3</sup>, registrado el día 10 de marzo, a 48 µg/m<sup>3</sup> en el día 14 de marzo. Para la estación L4 la media diaria de PM<sub>10</sub> paso de 24 µg/m<sup>3</sup> a 42 µg/m<sup>3</sup>. Dos días después del incendio las concentraciones de PM<sub>10</sub> bajaron a 24 µg/m<sup>3</sup> y 25 µg/m<sup>3</sup> respectivamente para las estaciones L1 y L4.

Los resultados obtenidos con el test no-paramétrico de Kruskal-Wallis muestran la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> registradas antes, durante y después del incendio ( $p < 0,05$ ).

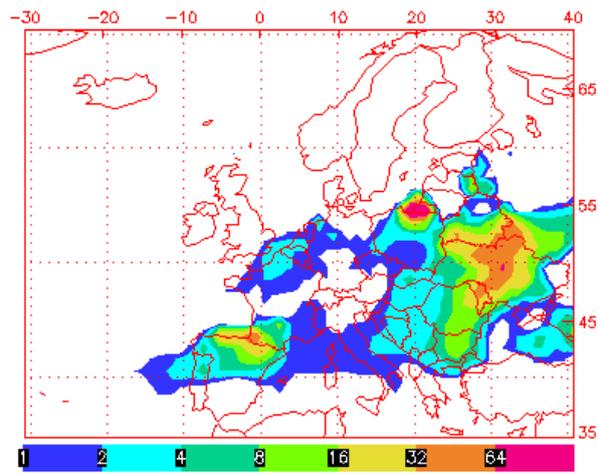
Apoyándonos en el modelo NAAPs, vamos a ver cómo es la concentración del humo en Europa y la forma en la que se ve afectada nuestra zona de estudio durante el incendio (Figura 17). Hay

que tener en cuenta que esta misma zona se ha podido ver afectada por otros incendios de menor extensión que ha habido en la zona norte de la Península, ya que es una época en la que los incendios suelen ser comunes. En la Figura 17a, se observa que el incendio no ha crecido mucho y casi no se ve en la imagen. Sin embargo, en la zona de Cantabria parece haber un incendio que puede que haya llegado a afectar ligeramente a León. En la Figura 17b se puede ver ya claramente el foco del incendio en el que nos vamos a centrar y cómo el humo producido afecta a la zona norte de la Península, incluyendo a León. El 12 de marzo (Figura 17c) se puede ver que el incendio es mayor, así como la extensión del humo que ahora afecta en mayor medida a León. El día siguiente (Figura 17d) se observa que el incendio ya está reduciendo su intensidad y el humo afecta menos a la zona de León, ya que este se ha desplazado más hacia el norte. Ya en la Figura 17e el incendio ha reducido bastante su tamaño, pero hay un foco en la zona de Asturias que parece afectar a la zona de León.

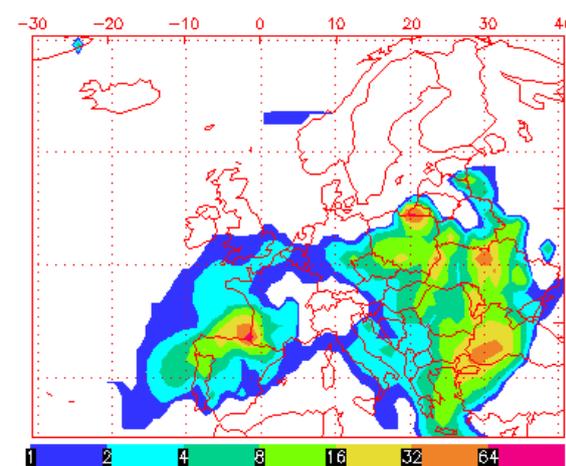
a) 10 de marzo de 2014. 12 UTC



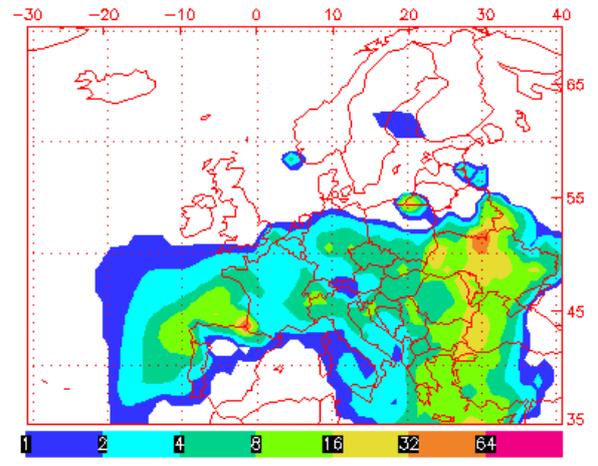
b) 11 de marzo de 2014. 12 UTC



c) 12 de marzo de 2014. 12 UTC



d) 13 de marzo de 2014. 12 UTC



e) 14 de marzo de 2014. 12 UTC

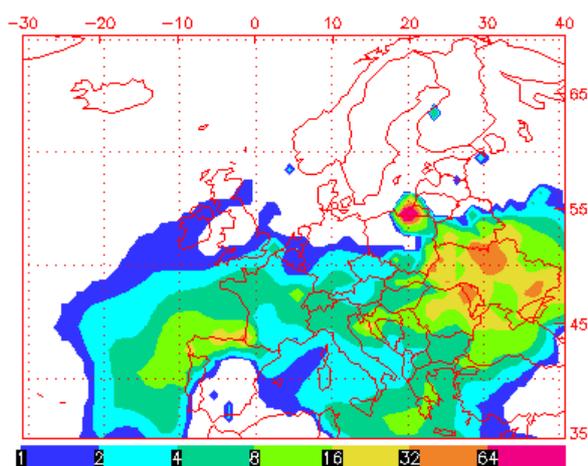
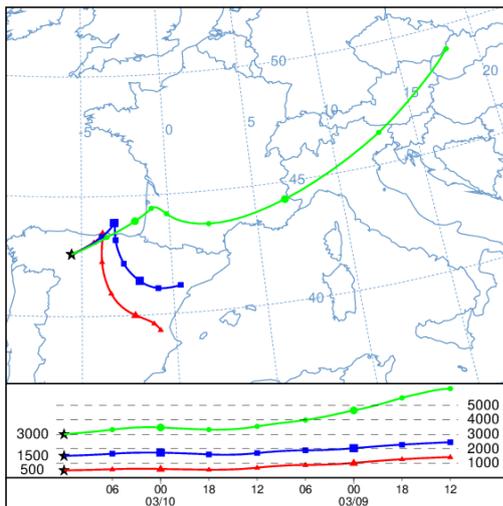


Figura 17: Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de humo los días a) 10, b) 11, c) 12, d) 13 y e) 14 de marzo de 2014, obtenida a partir del modelo NAAPs

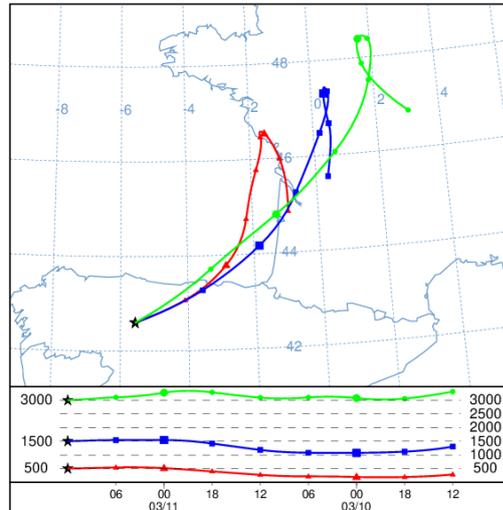
Para estudiar la trayectoria de las masas de aire que llegaron a León durante el periodo analizado, hemos utilizado el modelo Hysplit (Figura 18). Las retrotrayectorias fueron obtenidas para tres alturas distintas (500, 1500 y 3000 m) y para dos días de recorrido.

En la Figura 18a se observa que las masas de aire que llegaron a León a 3000 m cruzaron media Europa y pasaron por la zona del pequeño incendio de Cantabria, lo que podría suponer un aumento del  $\text{PM}_{10}$  por las partículas transportadas. Al día siguiente (Figura 18b) se puede ver cómo las masas de aire (a las tres alturas estudiadas) pasan por la zona de influencia del incendio, por lo que podrían arrastrar partículas y provocar un aumento de  $\text{PM}_{10}$  en la ciudad de León. En la Figura 18c se observa que la masa de aire a 500 m tiene su origen en una zona muy cercana al incendio, mientras que las masas de aire que llegan a León a 1500 m y 3000 m pasan por la zona de influencia del incendio. Para la Figura 18d el mayor cambio que se observa es que a 500 m no pasan por la zona del incendio, por lo que las partículas que lleguen a León puede que se reduzcan un poco. Las retrotrayectorias de 1500 m y 3000 m pasan muy cerca de la localización del incendio, e igual que antes, la retrotrayectoria de 3000 m se ve afectada por la zona de influencia de los incendios de las zonas cercanas a Rusia. Por último, el día 14 de marzo (Figura 18e), se puede ver cómo solo la retrotrayectoria de 3000 m pasa por la zona del incendio. Además, pasa por la zona de Cantabria donde había un pequeño incendio por lo que arrastrará más partículas. Por su parte, las retrotrayectorias correspondientes a las otras 2 masas de aire no pasan por esta zona, por lo cual no tendrán tanta carga de partículas.

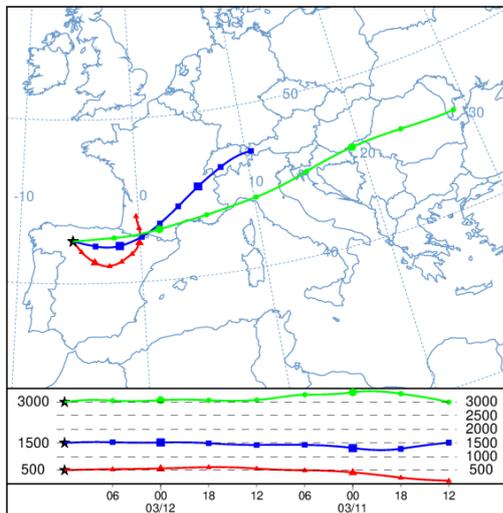
a)



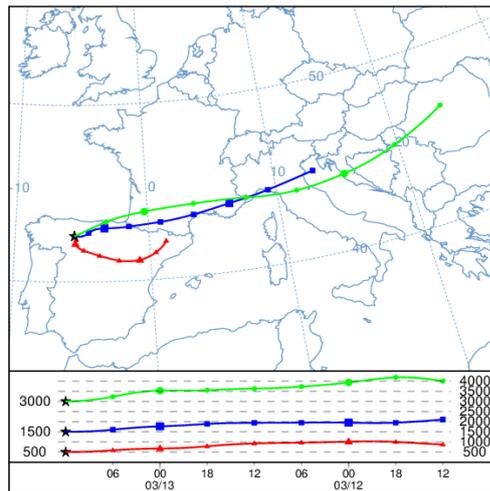
b)



c)



d)



e)

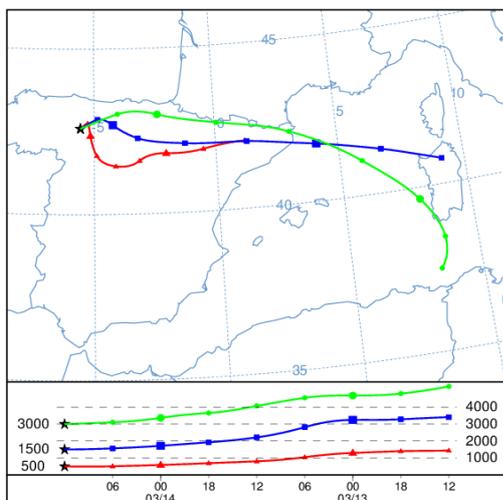


Figura 18: Retro trayectorias de 48 horas obtenidas con el modelo HYSPLIT a tres alturas distintas (500, 1500 y 3000 m), para la ciudad de León los días a) 10, b) 11, c) 12, d) 13 y e) 14 de marzo de 2014 a las 12 UTC.

## 5. Conclusiones

Del presente trabajo, centrado en analizar la influencia de los episodios de quema de biomasa y del transporte de sulfatos procedentes de Europa en la Península Ibérica, desde 2005 hasta 2020, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. El número medio de días en los que se registraron eventos de quema de biomasa entre los años 2005 y 2014 fue inferior a 100 casos al año. A partir de 2015, se registró un aumento en el número de eventos de quema de biomasa, con el máximo en 2017, con 628 episodios. En el periodo de estudio total, se observó una tendencia positiva significativa en el número de días con quema de biomasa en la Península.
2. En todos los sectores, salvo el Noroeste, se registró una tendencia creciente significativa en el número de días de casos de eventos de quema, alcanzando su máximo en el año 2017.
3. El tipo de tiempo en el que se registraron más eventos de quema de biomasa fue el Noroeste, seguido del Anticiclón.
4. Los tipos de tiempo con más probabilidad de venir acompañados de eventos de quema de biomasa son: ASE, CNE NE, E, AN, CE, CSE. Se observa que todos estos tipos de tiempo (salvo AN) tienen una componente del este.
5. Las intrusiones de sulfatos procedentes de Europa son intermitentes. El mayor número de intrusiones se registró durante el año 2016 (109 episodios). Las estaciones que registraron un mayor número medio de días con intrusión fueron primavera y verano. Por otro lado, asociados a las intrusiones de sulfatos europeos los tipos de tiempo más comunes son el Anticiclónico seguido del Ciclónico.
6. En la ciudad de León se registraron 338 días en los que se superó el valor límite diario establecido para las concentraciones de  $PM_{10}$  ( $50 \mu g/m^3$ ). De estas superaciones, cerca del 20% estuvieron probablemente influenciadas por eventos de quema de biomasa.
7. Entre el 10 y el 14 de marzo de 2014, la ciudad de León se vio afectada por un incendio sucedido en la zona del País Vasco francés. Además, dos pequeños incendios en Cantabria también afectaron levemente a la calidad del aire de la ciudad de León. El análisis estadístico mostró que las concentraciones de  $PM_{10}$  en la ciudad de León aumentarían significativamente durante los días de incendio.

## Referencias

- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., y Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), pp. 123-132. .
- Alonso-Blanco, E., Calvo, A. I., Pont, V., Mallet, M., Fraile, R. y Castro, A. (2014) "Impact of biomass burning on aerosol size distribution, aerosol optical properties and associated radiative forcing", *Aerosol and Air Quality Research*, 14(3), pp. 708–724. doi:10.4209/aaqr.2013.05.0163
- Alonso-Blanco, E., Castro, A., Calvo, A. I., Pont, V., Mallet, M., y Roberto, F. (2018) "Wildfire smoke plumes transport under a subsidence inversion: Climate and health implications in a distant urban area", *Science of the Total Environment*, 619-620, pp. 988-1002. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.142
- Chas-Amil, M. L., García-Martínez, E. y Touza, J. (2020) "Iberian Peninsula October 2017 wildfires: Burned area and population exposure in Galicia (NW of Spain)", *International Journal of Disaster Risk Reduction*48, pp. 101623. doi:10.1016/j.ijdrr.2020.101623.
- DeCarlo, P. F., Slowik, J. G., Worsnop, D. R., Davidovits, P. y Jimenez, J. L. (2004) "Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory", *Aerosol Science and Technology*, 38(12), pp. 1185–1205. doi:10.1080/027868290903907
- Dunn, O.J. (1964). "Multiple Comparisons Using Rank Sums". *Technometrics*, 6(3), pp. 241-252. doi: 10.1080/00401706.1964.10490181.
- España (2007) "Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera", *Boletín Oficial del Estado*, 16 de noviembre de 2007, (275), pp. 19744-46962
- Fernández-Raga, M., (2011) *Estudio de la precipitación mediante disdrómetros. Una aplicación particular: erosión por salpicadura*. Tesis doctoral. Universidad de León.
- Gibson, J. (2015) "Air pollution, climate change, and health", *The Lancet. Oncology*, 16(6), pp. e269. doi:10.1016/S1470-2045(15)70238-X.
- Junta de Castilla y León (2022) "Estadísticas de incendios forestales." Disponible en: <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/medio-natural/incendios-forestales-cifras.html> (Accedido: 10 de mayo de 2022)
- Kruskal, W. H., y Wallis, W. A. (1952). "Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis", *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), pp. 583–621. <https://doi.org/10.2307/2280779>
- López Santalla, A. y López García, M. (2019) "Los incendios forestales en España, decenio 2006-2015", *Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación*. Madrid. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/incendios-decenio-2006-2015\\_tcm30-521617.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/incendios-decenio-2006-2015_tcm30-521617.pdf)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España (2021) *Histórico de Informes de Episodios Naturales*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/fuentes-naturales/anuales.aspx> (Accedido: 3 de junio de 2022).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España (2018) *Episodios naturales de partículas 2017*. Disponible en [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/episodiosnaturales2017\\_tcm30-482151.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/episodiosnaturales2017_tcm30-482151.pdf) (Accedido: 3 de junio de 2022)
- Nunes, R. A. O., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., Calderay-Cayetano, F., Durán-Grados, V., Moreno-Gutiérrez, J., Jalkanen, J.-P., Hannuniemi, H., y Sousa, S. I. V. (2020): "Shipping emissions in the Iberian Peninsula and the impacts on air quality", *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9473–9489, <https://doi.org/10.5194/acp-20-9473-2020>.

- Oduber, O., Calvo, A.I., Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Calzolari, G., Nava, S., Lucarelli, F., Nunes, T., Barata, J., y Fraile, R. (2021) " Characterization of aerosol sources in León (Spain) using Positive Matrix Factorization and weather types", *Science of the Total Environment*, 754, pp. 142045. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142045
- Pope, C. A. y Dockery, D. W. (2006) "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), pp. 709–742. doi:10.1080/10473289.2006.10464485.
- Pósfai, M., y Molnár A., (2000) "Aerosol particles in the troposphere: a mineralogical introduction" ., en Vaughan, D. J. y Wogelius, R. A. (eds.) *Environmental Mineralogy*. Volume 2. London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, pp. 197-252.
- Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Escudero, M., Castillo, S., Orío, A., González, A., Pallarés, M., Jiménez, S., Ferreira, F., Marques, F., Monjardino, J., Cuevas, E., Alonso, S., Artíñano, B., Salvador, P. y de la Rosa, J. (2013) "Procedimiento para la identificación de episodios naturales de PM10 y PM2,5 y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM10.", pp. 1–40. Disponible en : [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/metodologiaparaepisodiosnaturales-revabril2013\\_tcm30-186522.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/metodologiaparaepisodiosnaturales-revabril2013_tcm30-186522.pdf).
- Rodrigues, M., Trigo, R. M., Vega-García, C. y Cardil, A. (2020) "Identifying large fire weather typologies in the Iberian Peninsula", *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, pp. 107789. doi:10.1016/j.agrformet.2019.107789.
- Vélez Muñoz, R. (1990) "Los incendios forestales en España", *Ecología*, (1), pp. 213–222.
- Vicente, E. D. y Alves, C. A. (2018) "An overview of particulate emissions from residential biomass combustion", *Atmospheric Research*, 199, pp. 159–185. doi:10.1016/j.atmosres.2017.08.027.
- Wang, Yinghong, Tang, G., Zhao, W., Yang, Y., Wang, L., Liu, Z., Wen, T., Cheng, M., Wang, Yiming y Wang, Yuesi (2020) "Different roles of nitrate and sulfate in air pollution episodes in the North China Plain", *Atmospheric Environment*, 224, pp. 117325. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117325.
- World Health Organization, (sin fecha) *Air pollution*. Disponible en: [https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1) (Accedido: 27 de febrero de 2022)