



Universidad  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Resuspensión de polvo mineral en el Valle del  
Ebro: influencia sobre el espesor óptico de  
aerosoles y la calidad del aire de la ciudad de Zaragoza

*Mineral dust resuspension in the Ebro Valley:  
influence on Aerosol Optical Depth and air quality in the  
city of Zaragoza*

Autor

Lucía Hernando Redrado

Director

Jorge Pey Betrán

Ponente

María Eugenia Marqués López

Escuela Politécnica Superior

2020

## AGRADECIMIENTOS

---

A mi director, Jorge Pey, por guiarme y ayudarme durante todo el proceso de elaboración de este trabajo, sin su apoyo y explicaciones este proyecto no hubiera salido adelante.

A todas aquellas personas que han aportado su granito de arena para que se pudiera llevar a cabo el estudio, Arcadio Blasco, Samuel Buisan y Nieves López.

A mi ponente, María Eugenia Marqués, que me abrió el mundo atmosférico y todo lo relacionado con la calidad del aire, si no fuera por su interés quizás no me habría planteado realizar este trabajo.

Y, sobre todo, a mi familia, por confiar en mí y darme su apoyo durante todo momento en esta nueva experiencia.

## RESUMEN

---

En numerosas publicaciones se aborda la caracterización, los impactos o la variabilidad espacial-temporal de diferentes aerosoles atmosféricos que proceden de fuentes diversas como contaminación urbana o industrial, incendios forestales, o polvo mineral transportado desde zonas desérticas. El Valle del Ebro es una zona de emisión de polvo mineral a la atmósfera, pero su fenomenología, recurrencia o impactos asociados no se han estudiado hasta la fecha. El presente trabajo, que ha sido posible gracias a la colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología y la Fundación ARAID a través del Instituto Pirenaico de Ecología, del CSIC, investiga este fenómeno. Se ha elegido una ventana temporal amplia, 2014-2018, y se ha estudiado el impacto que tiene en la calidad del aire, a partir de la evaluación de la concentración de material particulado atmosférico inferior a  $10\ \mu\text{m}$  (o  $\text{PM}_{10}$ ), y en el espesor óptico de aerosoles (AOD, *Aerosol Optical Depth*) en la ciudad de Zaragoza. Para alcanzar el objetivo propuesto se han realizado diferentes tareas, entre ellas el análisis meteorológico que ha permitido identificar cuándo se producen estos eventos y en qué condiciones ambientales, el análisis evolutivo de la concentración de  $\text{PM}_{10}$ , y la evaluación de los valores de AOD y del exponente de Ångström, estos últimos relacionados con el tipo de aerosoles presentes en la columna atmosférica. En total se han identificado 24 episodios, registrados muchos de ellos durante la estación cálida, y con una duración es variable entre 1 y 4 días. En el marco de este trabajo se ha desarrollado una metodología para cuantificar el impacto diario de este fenómeno sobre las concentraciones urbanas de  $\text{PM}_{10}$ . La principal conclusión del presente trabajo refleja que, aunque el impacto de este fenómeno sobre la calidad del aire de la ciudad de Zaragoza es reducido desde el punto de vista anual (entre  $0,3$  y  $0,5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  al promedio anual de  $\text{PM}_{10}$ , que está en torno a  $21\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), su impacto a escala episódica llega a ser importante en algunos casos. Así, pese a que no se ha llegado a superar el valor límite diario de  $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante ninguno de los eventos, sí se alcanzaron valores medios horarios de hasta  $200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  en algunas situaciones de este tipo.

**Palabras clave:** aerosoles atmosféricos, AOD, polvo sahariano, aridez, material particulado, calidad del aire, meteorología.

## ABSTRACT

---

A few publications are related with the characterization, the evaluation of impacts, or the study of spatial and temporal variability of atmospheric aerosols originated from different sources including urban or industrial pollution, forest fires, or mineral dust transported from desert areas. The Ebro Valley is vast region in which, episodically, the emission of mineral dust to the atmosphere occurs. However, the phenomenology of this process, its recurrence or the associated impacts has not been studied to date. This work, which has been possible thanks to the collaboration with the State Meteorological Agency and the ARAID Foundation through the Pyrenean Institute of Ecology - CSIC, investigates this phenomenon. A 5-years interval, 2014-2018, has been chosen. The impact of this process in the city of Zaragoza has been regarded from a twin perspective: on air quality, by evaluating the concentration of atmospheric particulate matter less than 10  $\mu\text{m}$  (or  $\text{PM}_{10}$ ), and on the optical thickness of aerosols (AOD, *Aerosol Optical Depth*). To achieve the proposed objective, a number of tasks have been performed, including a meteorological analysis, from which the identification of the optimal environmental conditions for these events take place was derived; the interpretation of  $\text{PM}_{10}$  concentration data series; and evaluation of AOD and Ångström exponent, the latter related to the type of aerosols present in the atmospheric column. Overall, 24 episodes have been identified, many of them recorded during the warm season, and with a duration ranging from 1 to 4 days. In the framework of this work, a methodology has been developed to quantify the daily impact of this phenomenon on urban  $\text{PM}_{10}$  concentrations. The main conclusion of the present work reflects that, although the impact of this phenomenon on the air quality in Zaragoza is limited in terms of annual average input (between 0.3 and 0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  to the annual  $\text{PM}_{10}$  average, which is around 21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), it can be relevant in some cases. None of the events provoked the exceedance of the daily limit value established in 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , but hourly values up to 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  were observed in some cases associated to these situations.

**Keywords:** *atmospheric aerosols, AOD, Saharan dust, aridity, particulate matter, air quality, meteorology.*

# ÍNDICE

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	6
1 Introducción.....	11
1.1 El aerosol atmosférico.....	11
1.1.1 Definición: ¿qué es un aerosol atmosférico?.....	11
1.1.2 Tipos y propiedades de los aerosoles.....	12
1.1.3 Efectos de los aerosoles.....	19
1.2 Instrumentación para la medida de aerosoles.....	23
1.2.1 La red AERONET.....	24
1.2.2 Descripción del fotómetro solar CIMEL CE318.....	26
1.2.3 Monitorización de PM <sub>10</sub> .....	32
2 Objetivos.....	35
3 Metodología.....	36
3.1 Zona de estudio.....	36
3.2 Compilación e interpretación de datos de partículas en suspensión de la ciudad de Zaragoza.....	38
3.2.1 Redes de vigilancia de la contaminación atmosférica.....	38
3.2.2 Interpretación de datos de PM <sub>10</sub> .....	39
3.3 Herramientas meteorológicas e interpretación de mapas de aerosoles.....	40
3.4 Compilación e interpretación de datos meteorológicos.....	44
3.5 Compilación e interpretación de datos de AOD.....	46
3.6 Cálculo del aporte de polvo sahariano y polvo regional.....	47
4 Resultados y discusión.....	49

4.1	Análisis evolutivo de la concentración de PM <sub>10</sub> .....	49
4.2	Análisis meteorológico .....	51
4.3	Identificación de episodios de polvo mineral regional.....	56
4.3.1	Casos de estudio .....	58
4.3.2	Otros episodios de partículas en suspensión .....	63
4.4	Cuantificación del aporte de polvo sahariano y polvo mineral de origen regional .....	69
5	Conclusiones .....	74
6	Bibliografía .....	76
	Anexos .....	83
	Anexo 1. Valores de concentración de PM <sub>10</sub> de la ciudad de Zaragoza (2014 – 2018).....	83
	Anexo 2. Inventario de episodios de polvo mineral .....	86
	Anexo 3. Inventario de diferentes episodios de partículas en suspensión....	94
	Anexo 4. Cuantificación del aporte de polvo mineral.....	96
	Anexo 5. Cuantificación del aporte de polvo mineral para cada estación de calidad del aire .....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Imágenes microscópicas de diferentes aerosoles atmosféricos.....	12
Figura 2.	Relación entre el tamaño de los aerosoles, la distribución en número y masa, y la composición química.. .....	13
Figura 3.	Diagrama del proceso de inyección de polvo en la atmósfera y su alcance según el tamaño de las partículas. ....	15
Figura 4.	Diagrama de dispersión AOD (550 nm) frente a alfa (500 - 800) con los tipos de aerosoles determinados por la OPAC. ....	17
Figura 5.	Clasificación de las propiedades microfísicas y ópticas de los aerosoles.....	18

Figura 6. Esquema de la deposición de partículas de aerosoles en el tracto respiratorio humano.....	20
Figura 7. Diagrama de los efectos climáticos directos, indirectos y semi-directos sobre el clima causados por los aerosoles.....	21
Figura 8. Vista de La Tejita, en el sur de Tenerife, un día normal. Debajo, distintas secuencias del episodio de calima del 24 de febrero de 2020. ....	22
Figura 9. A la izquierda, Madrid en enero de 2020. A la derecha, Madrid el 22 de abril de 2020. ....	23
Figura 10. Distribución global de las estaciones que proporcionan observaciones de aerosoles en columna que pertenecen a la red AERONET .....	24
Figura 11. Situación de la red CIMEL de AEMET en España. ....	25
Figura 12. Aspectos determinantes en el Convenio de colaboración entre AEMET y la Universidad de Valladolid.....	26
Figura 13. Conjunto de redes de fotómetros solares CIMEL en España.....	26
Figura 14. Representación del tipo de medidas que realiza el CIMEL CE318. 27	
Figura 15. Fotómetro solar CIMEL CE318 situado en la sede de AEMET en Zaragoza. ....	27
Figura 16. Principales componentes de un fotómetro solar CIMEL CE318.....	29
Figura 17. Interpretación gráfica de las medidas de (a) plano principal y (b) almucántar.....	30
Figura 18. Ejemplo de evolución de los datos de AOD en los diferentes niveles de confianza 1.0 (arriba izquierda), 1.5 (arriba derecha), 2.0 (abajo), para el día 8 de agosto de 2017. ....	32
Figura 19. Esquema de un analizador de partículas mediante atenuación de la radiación beta. ....	34
Figura 20. Situación de la zona de estudio, Zaragoza, respecto a España.....	36
Figura 21. Transecto norte - sur de la precipitación total anual en Aragón .....	37
Figura 22. Transecto norte - sur de la temperatura media anual de Aragón ....	37
Figura 23. Situación de las estaciones de calidad del aire de Zaragoza y listado de contaminantes que mide cada una de ellas .....	39

Figura 24. Mapas de aerosoles NAAPS para el 5 de abril de 2016 a las 12:00z ..... 42

Figura 25. Mapas de aerosoles ICoD/DREAM para el 5 de julio de 2015 a las 18:00h. .... 43

Figura 26. Visor SINOBAS.. ..... 44

Figura 27. Estaciones regionales de fondo en España que proporcionan datos de PM<sub>10</sub> y/o datos de especiación química, y vista de la estación de Monagrega. .... 48

Figura 28. Evolución mensual media de la concentración de PM<sub>10</sub> en las estaciones de calidad del aire de Zaragoza entre 2014 - 2018. .... 49

Figura 29. Concentración de polvo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) predicha por el modelo BSC/DREAM el periodo 20 - 24 de febrero de 2016 a las 12 UTC..... 50

Figura 30. Precipitación media acumulada ( $\text{L}/\text{m}^2$ ), velocidad media del viento ( $\text{km}/\text{h}$ ) para la estación de Zaragoza - Aeropuerto, entre 2014 y 2018..... 53

Figura 31. Precipitación media acumulada ( $\text{L}/\text{m}^2$ ), velocidad media del viento ( $\text{km}/\text{h}$ ) para la estación Zaragoza - Valdespartera, entre 2014 y 2018 ..... 53

Figura 32. Rosa de los vientos de la ciudad de Zaragoza (datos de Zaragoza – Aeropuerto) para 2014 – 2018. .... 54

Figura 33. (a) Duración, en días, de cada uno de los eventos de polvo mineral. (b) Distribución mensual del número de episodios en el periodo de estudio 2014 – 2018. .... 58

Figura 34. Evolución del AOD a  $\lambda = 500 \text{ nm}$  y del exponente de Ångström (500 - 870), junto con dos imágenes de muestra de la cámara Full Sky muestran cielo despejado y nubes cirrus, respectivamente ..... 59

Figura 35. Evolución del material particulado en la estación de Renovales, PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la velocidad del viento ( $\text{km}/\text{h}$ ) y el AOD (500 nm) del 14 al 19 de agosto de 2014. .... 60

Figura 36. (a) Imagen satélite HRVIS 15:00 h UTC del 12 de agosto de 2018. Fuente: SINOBAS (b) Imagen satélite del sensor MODIS - Aqua del 12 de agosto de 2018. .... 60

Figura 37. Evolución del material particulado en la estación de El Picarral, PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la velocidad del viento ( $\text{km}/\text{h}$ ) y el AOD (500 nm) del 10 al 13 de agosto de 2018. .... 61



Figura 38. Reducción de la visibilidad por la resuspensión de polvo mineral a las 18:15h el 28 de mayo de 2016 .....	62
Figura 39. Evolución del AOD a $\lambda = 500$ nm y del exponente de Ångström (500 - 870) durante el episodio 6.....	62
Figura 40. Evolución del material particulado en la estación de Renovales, PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la velocidad del viento (km/h) y el AOD (500 nm) del 6 al 9 de junio de 2015. ....	63
Figura 41. Número de episodios de cada fenómeno atmosférico que se ha producido en la ciudad de Zaragoza entre 2014 - 2018. ....	64
Figura 42. Evento de intrusión de aerosol desértico, el 22 de febrero de 2016: a la izquierda, de arriba abajo, concentración de polvo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), deposición seca ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ), carga de polvo ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), y sentido del viento a 3000 m; a la derecha, de arriba abajo, precipitación acumulada (mm) y presiones atmosféricas (hPa), deposición húmeda ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) y cubierta de nubes .....	65
Figura 43. Episodio de polvo sahariano: datos AOD y AE en función de la hora a la que son registrados los valores para el nivel 1.5 y, evolución de la concentración de PM <sub>10</sub> en la estación de Renovales. ....	66
Figura 44. Incendio forestal en Luna (Aragón).....	67
Figura 45. Episodio de incendio forestal en Luna (Aragón), a la izquierda la concentración del espesor óptico total ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y, a la derecha la concentración de humo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) detectado por el modelo NAAPS. ....	67
Figura 46. Episodio de incendio forestal en Luna (Aragón): datos de AOD y AE en función de la hora a la que son registrados los valores para el nivel 1.5 y, evolución de la concentración de PM <sub>10</sub> en la estación de Renovales.....	68
Figura 47. Evolución de la concentración de PM <sub>10</sub> en las estaciones de calidad del aire del Ayuntamiento de Zaragoza desde el día 14 hasta el 23 de diciembre de 2015. ....	69
Figura 48. Contribución del aporte de polvo regional y desértico sobre la concentración de PM <sub>10</sub> de la ciudad de Zaragoza, (arriba) entre 2014 y 2015 y (debajo) entre 2016 y 2018.....	71
Figura 49. Aporte medio diario de polvo mineral de origen regional sobre la concentración de PM <sub>10</sub> en las estaciones de calidad del aire de Zaragoza. ....	72

Figura 50. Porcentaje anual del aporte de PM <sub>10</sub> , polvo sahariano y polvo mineral de origen regional. ....	73
---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las estaciones remotas de vigilancia de la calidad del aire de Zaragoza.....	38
Tabla 2. Directrices para clasificar la calidad del aire de la ciudad de Zaragoza, según los valores establecidos por el RD 102/2011.....	40
Tabla 3. Datos relativos a las estaciones de meteorología de referencia.....	44
Tabla 4. Promedio mensual de racha máxima de velocidad del viento para el año 2014.....	45
Tabla 5. Clasificación de los aerosoles según el espesor óptico (AOD) y coeficiente de Ångström (AE).....	47
Tabla 6. Resumen meteorológico de la ciudad de Zaragoza entre 2014 y 2018, datos medios entre la estación de Zaragoza - Aeropuerto y Zaragoza - Valdespartera. ....	52
Tabla 7. Precipitación mensual y anual acumulada, entre 2014 - 2018, para las estaciones de Zaragoza - Aeropuerto y Zaragoza - Valdespartera. ....	54
Tabla 8. Número de meses que supera o no el umbral (> 30 mm), para su catalogación como periodo húmedo o seco, en las estaciones de Zaragoza - Aeropuerto y Zaragoza - Valdespartera. ....	55
Tabla 9. Resumen del número de episodios y días de polvo mineral de origen regional en el periodo comprendido entre 2014 - 2018, y el promedio anual de AOD y $\alpha$ . ....	57
Tabla 10. Resultados obtenidos para el episodio 1, que se encuentra recogido en el Anexo 4.....	70
Tabla 11. Media anual (M.A) en % y $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM <sub>10</sub> , polvo sahariano y polvo mineral.....	72

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 EL AEROSOL ATMOSFÉRICO

En este apartado se define el aerosol atmosférico y se hace hincapié en sus propiedades físicas y químicas y su impacto en el forzamiento radiativo terrestre. Además, se identificarán las propiedades ópticas y microfísicas que los caracterizan en su interacción con la radiación solar, y se expondrán los efectos más significativos que presentan.

### 1.1.1 Definición: ¿qué es un aerosol atmosférico?

El aerosol atmosférico se define como una suspensión coloidal de partículas sólidas o líquidas en un gas, exceptuando el agua en estado puro. Cuando se habla de aerosol atmosférico, se refiere por tanto a aquellas partículas (en estado sólido o líquido) que se mantienen en el aire y, son arrastradas por éste en su movimiento (Alonso, 2007; Estellés, 2006; Pey, 2007; Sanchez-Romero, González, Calbó, Sanchez-Lorenzo, y Michalsky, 2016).

Cabe destacar, tal y como indica Mészáros (1999), que los términos aerosol atmosférico y material particulado atmosférico se utilizan indistintamente, aunque no significan lo mismo, ya que los aerosoles engloban tanto las partículas en suspensión como la masa de aire en la que están contenidas.

Los aerosoles son un constituyente habitual e importante en la atmósfera terrestre. Estos interactúan de forma directa con la radiación solar terrestre, afectando de esta forma al balance radiativo, o de forma indirecta por su efecto sobre la microfísica de las nubes, el albedo y la precipitación (Calderón Mateo, 2018; Corbin, Kreidenweis, y Vonder Haar, 2002; Estellés, 2006; Fernández García, 2017). Estas partículas (figura 1), como se verá a continuación, se emiten en mayor medida a través de fuentes naturales (aerosol marino, materia mineral suspendida, actividad volcánica, incendios forestales no intencionados, emisiones biogénicas, etc.). No obstante, en la actualidad existen numerosas fuentes de emisión antrópicas (tráfico rodado, procesos industriales emisiones residenciales y domésticas, generación de energía, quema de biomasa, incendios forestales intencionados, etc.), que también contribuyen a incrementar los niveles de aerosoles en suspensión, pese a que las fuentes naturales sigan siendo los contribuyentes dominantes de las emisiones a escala global (IPCC, 2007).

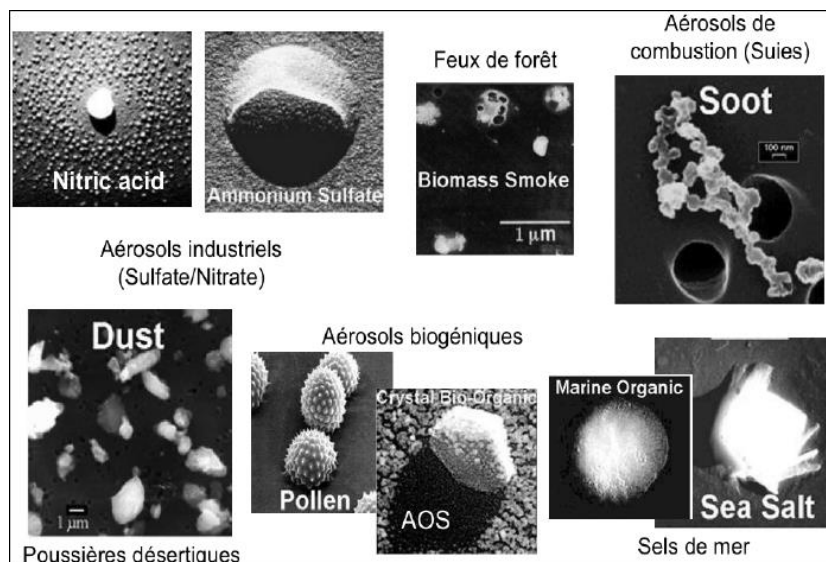


Figura 1. Imágenes microscópicas de diferentes aerosoles atmosféricos. Fuente: Stromatas (2013).

El estudio de material particulado atmosférico ha atraído el interés científico en las últimas décadas debido a los efectos negativos que causan sobre la salud humana y al papel que desempeñan en el forzamiento radiativo del clima. En este sentido, el avance en el conocimiento científico sobre el papel que juegan los aerosoles en el balance climático de la Tierra no se ha producido a la misma velocidad que el relativo a los gases de efecto invernadero (GEI), quizá por la mayor complejidad en su estudio y la gran variabilidad de tamaño y composición química que los caracteriza.

### 1.1.2 Tipos y propiedades de los aerosoles

Cada tipo de aerosol produce unos efectos diferentes, por ello, resulta de interés identificar los tipos de aerosoles existentes en la atmósfera. Con relación a sus propiedades, a continuación, se describen algunas clasificaciones expuestas en algunos estudios como los de Calderón Mateo (2018); Estellés (2006); Fernández García (2017); Guirado (2015); Herrero (2019) y; Obregón Muñoz (2012).

#### 1.1.2.1 Según su origen y mecanismos de formación

Los aerosoles atmosféricos pueden ser clasificados por su origen natural o antropogénico, y su composición depende de la fuente que los genera. Algunos de estos aerosoles son emitidos directamente a la atmósfera (**aerosoles primarios**, como son, entre otros, el aerosol desértico o marino) y otros se forman en la atmósfera a partir de precursores gaseosos (por ejemplo: óxidos de azufre y nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, o amoníaco) que, al reaccionar entre ellos, o reaccionar con partículas que ya estaban en suspensión, o debido a cambios en las condiciones ambientales (temperatura, incidencia de la radiación solar, variaciones en

la humedad relativa, o disminución de la carga de partículas en suspensión) pueden formar partículas en la atmósfera, que se conocen como **aerosoles secundarios**).

Los **aerosoles de origen natural** son aquellos presentes en la atmósfera por acción de fenómenos naturales, generalmente por procesos mecánicos (emisión de polvo mineral, generación de aerosol marino) y, de forma menos significativa, por otras causas (erupciones volcánicas, emisiones biogénicas, incendios forestales naturales, descargas eléctricas, etc.).

Los **aerosoles de origen antropogénico** son aquellos presentes en la atmósfera debido a la actividad humana, generalmente procesos mecánicos y de combustión. Este tipo de aerosoles comprenden tanto las emisiones de actividades industriales, extractivas o de construcción, y todo un abanico de partículas carbonosas derivadas de procesos de combustión (tráfico, industria, emisiones domésticas o residenciales, etc.).

### 1.1.2.2 Según su tamaño

En cuanto a la distribución por tamaños de los aerosoles (figura 2) encontramos cuatro tipos, que dependen del diámetro equivalente de las partículas. Esta clasificación está estrechamente relacionada con los efectos que producen estas partículas sobre la salud humana. Aunque, no sólo en los efectos radica la importancia de esta categorización, sino que el tiempo de vida media de los aerosoles en la atmósfera depende principalmente de su tamaño y, adicionalmente, del carácter higroscópico de los mismos.

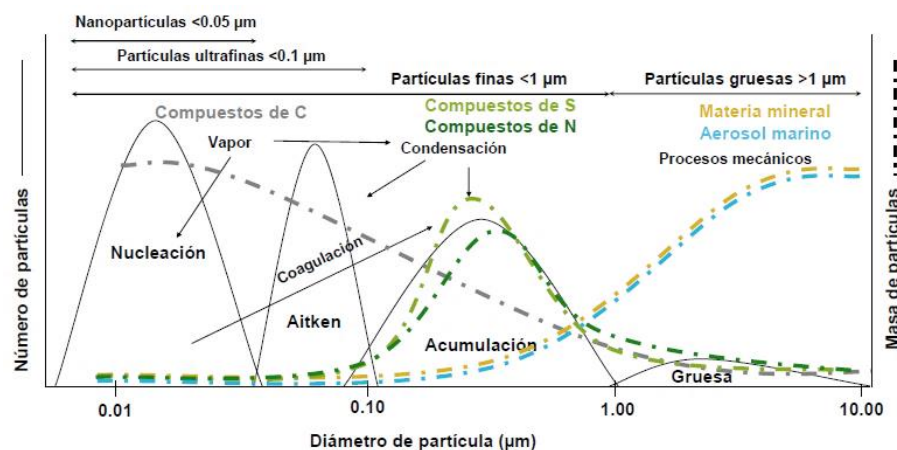


Figura 2. Relación entre el tamaño de los aerosoles, la distribución en número y masa, y la composición química. Fuente: Pey (2007).

- **Modo de nucleación.** Las dimensiones de estas partículas varían entre 0.001 y 0.01  $\mu\text{m}$ . Se originan mediante procesos de conversión de gas a partícula, conocidos como nucleación (formación de nuevas partículas).
- **Núcleos de Aitken.** Sus diámetros oscilan desde 0.01 hasta 0.1  $\mu\text{m}$ . Estos núcleos se agrupan formando partículas de mayor tamaño, que posteriormente sufren coalescencia en cadenas de agregados y actúan como núcleos de condensación. Estas partículas se pueden eliminar de la atmósfera por precipitación de las gotas de lluvia de las que forman parte y por arrastre del agua de lluvia sin necesidad de formar núcleos de condensación. Estas partículas pueden ser primarias, generalmente de composición carbonosa, o secundarias, resultantes de la coagulación con otras partículas. Las partículas derivadas de la combustión en vehículos diésel se encuentran generalmente en este rango granulométrico.
- **Modo de acumulación.** A este tipo pertenecen las partículas entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ . Su origen radica en procesos de coagulación o condensación de gases atmosféricos con dichas partículas. Tienen más masa que las anteriores y son eliminadas de forma similar, por ejemplo, en este grupo se encontrarían partículas procedentes del humo de la quema de biomasa. Como su propio nombre indica, este tipo de partículas son las que tienden a “acumularse” en la atmósfera, y por tanto su tiempo de vida es mayor que el resto de rangos granulométricos.
- **Partículas gruesas.** Poseen tamaños entre 1 y 10  $\mu\text{m}$ . En este grupo se encontrarían las partículas primarias generadas por procesos mecánicos de erosión o desintegración (figura 3) ya sea por procesos naturales (polvo mineral, aerosol marino, etc.) o antropogénicos (demolición de infraestructuras, actividades extractivas, resuspensión de polvo de carretera, etc.). Debido a su mayor masa, este tipo de aerosol se puede eliminar fácilmente de la atmósfera por procesos de sedimentación, es decir, por acción de la gravedad.

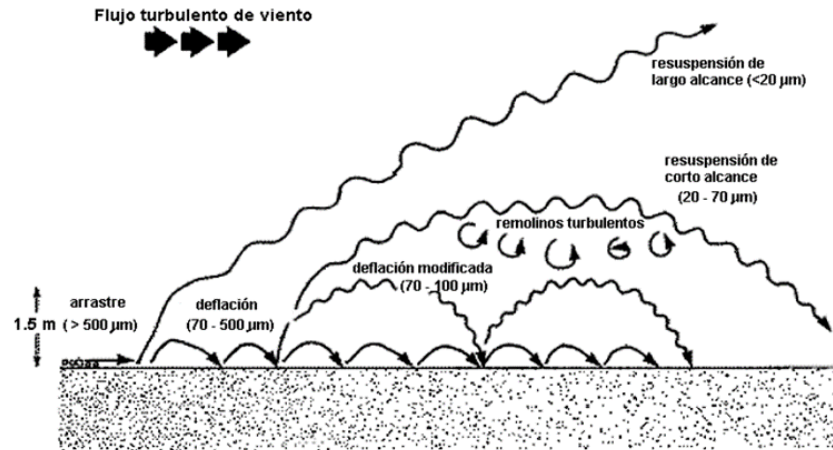


Figura 3. Diagrama del proceso de inyección de polvo en la atmósfera y su alcance según el tamaño de las partículas. Fuente: Alonso (2007).

### 1.1.2.3 Según su composición química

Atendiendo a su composición química los aerosoles se clasifican según dicha naturaleza en:

- **Aerosol marino.** Está constituido por partículas que se generan por acción mecánica del viento sobre las zonas marinas (mares y océanos), cuya composición reflejará en gran medida la composición del medio originario de las mismas, el agua del mar. El aerosol marino está formado mayoritariamente por NaCl, aunque pueden existir otras especies como el MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub> o el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Según el V informe del IPCC (Boucher *et al.*, 2013) la contribución marina de aerosoles a la atmósfera constituye el segundo grupo de aerosoles más importante en cuanto a masa (37%) (Alastuey *et al.*, 2005).
- **Materia o aerosol mineral.** Este tipo de aerosol suele proceder de zonas desérticas y/o continentales. Los procesos erosivos que ejerce el viento sobre estas regiones dan lugar a la degradación de la superficie material sobre la que ejerce su influencia y además incorpora a la atmósfera el material particulado desprendido y resuspendido. Los principales componentes de este tipo de aerosol son cuarzo (SiO<sub>2</sub>); carbonatos de caliza (CaCO<sub>3</sub>) y dolomita (Ca, MgCO<sub>3</sub>); minerales de la arcilla como caolinita o illita, entre otros. El aerosol mineral, tiene a escala global, un origen usualmente natural, aunque a escala local las fuentes antrópicas pueden ser aquellas que más contribuyen al aumento de sus niveles. El aporte mineral supone la fracción

mayoritaria en masa de emisiones de partículas y se estima en un 44% sobre el total de emisiones a la atmósfera (Duce, 1995).

- **Partículas derivadas del azufre o sulfatos.** Como su nombre indica son aquellos aerosoles cuyo componente principal es el azufre. El origen de estas partículas puede ser natural, como partículas primarias (azufre elemental,  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), o pueden ser aerosoles secundarios, formados a partir del  $\text{SO}_2$  (origen volcánico) o el sulfuro de dimetilo y sulfuro de carbonilo (origen biogénico). Generalmente, el aporte de sulfatos a la atmósfera es de origen antrópico, y se generan esencialmente a partir de la transformación del  $\text{SO}_2$  derivado de combustión de carbón y fuel-oil, según el IPCC (2001) más del 50%. Sin embargo, determinadas regiones del planeta, como el Valle del Ebro, son ricas en yesos y otras especies de composición similar. Los procesos de emisión natural en esta región enriquecen la atmósfera a escala regional en sulfatos de origen natural.
- **Partículas derivadas del nitrógeno o nitratos.** Al igual que en el caso anterior, estos aerosoles, como su nombre indica, tendrán por componente principal el nitrógeno. Normalmente, se trata de partículas de tipo secundario, formadas a partir de gases precursores emitidos por fuentes naturales (suelo, descargas eléctricas, combustión de biomasa, etc.) o antrópicas (derivadas de combustión de combustibles fósiles, biomasa, agricultura y ganadería).
- **Aerosol biológico.** Este tipo de aerosol surge de procesos de degradación o destrucción de restos animales o vegetales, presencia de microorganismos, polen, o partículas secundarias formadas a partir de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico.

En este estudio, se ha utilizado la clasificación de aerosoles propuesta por Hess, Koepke, y Schult (1998), que utiliza las componentes de los aerosoles descritas anteriormente: sulfatos, minerales, sales, etc. combinándolas entre sí. Este modelo que se conoce como OPAC (*Optical Properties of Aerosols and Clouds*) que recoge un diagrama de dispersión de los tipos de aerosoles según el mismo y, se puede observar en la figura 4. La composición química de los aerosoles puede permitir calcular otras propiedades de los aerosoles, como son las ópticas, que se detallarán más a continuación, mediante el uso de modelos de aerosoles.



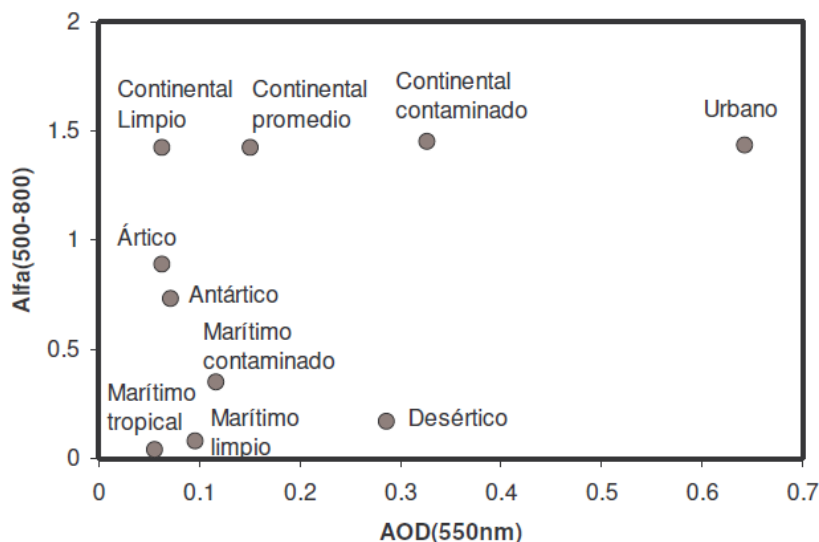


Figura 4. Diagrama de dispersión AOD (550 nm) frente a alfa (500 - 800) con los tipos de aerosoles determinados por la OPAC. Fuente: Hess et al. (1998).

En cuanto a las propiedades de los aerosoles, se pueden diferenciar entre propiedades microfísicas y ópticas.

- **Microfísicas.** Estas propiedades engloban aspectos de forma, contenido total o volumen y tamaño de los aerosoles. En cuanto a la forma, pese a que las partículas sólidas pueden ser muy irregulares, la mayoría de los modelos que se han utilizado en las últimas décadas presuponen que las partículas son esféricas, fundamentándose en que una gran cantidad de partículas de forma irregular tendría un comportamiento promedio similar al que tendrían si fuesen esféricas (Alcántara, 2013). Así el tamaño de un aerosol monodisperso está completamente representado por el radio de la partícula.
- **Ópticas.** Esta propiedades abarcan los procesos que tienen lugar en la atmósfera debido a los procesos de absorción y dispersión de la radiación solar que interactúa con los aerosoles suspendidos (Herrero, 2019). Esto provoca que la radiación que llega a la superficie terrestre conste de dos componentes una directa y otra difusa, cuya suma se denomina radiación global. El efecto de los aerosoles sobre la radiación incidente depende de la región espectral y está estrechamente relacionado con las características del aerosol (Toledano Olmeda, 2005).

A continuación, se recogen los diferentes subgrupos de parámetros que engloban las propiedades microfísicas y ópticas. En este estudio, solo se han tenido en cuenta dos de las propiedades ópticas que aparecen en la figura 5, el espesor óptico de aerosoles (AOD) y el exponente de Ångström ( $\alpha$ , AE), que se explicarán a continuación.

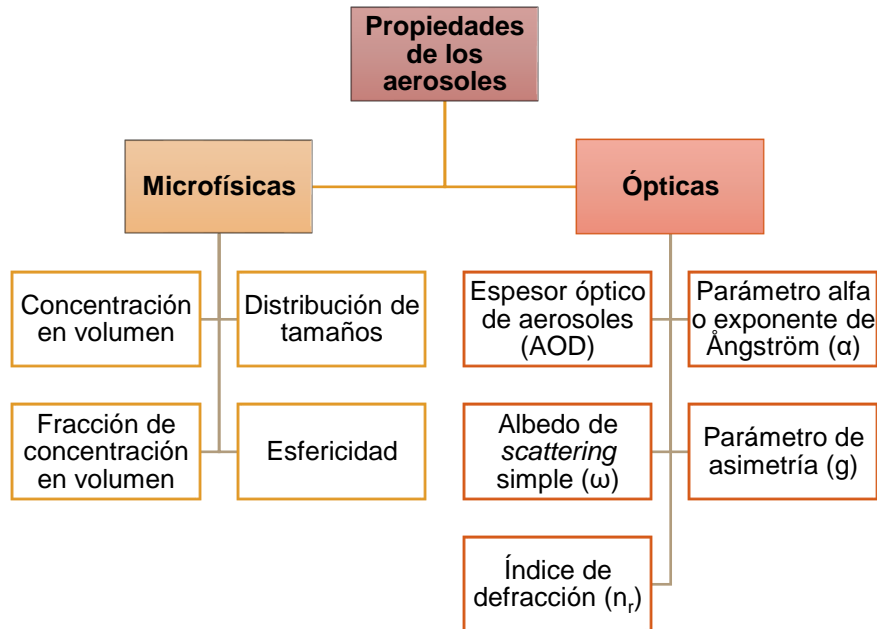


Figura 5. Clasificación de las propiedades microfísicas y ópticas de los aerosoles. Fuente: elaboración propia a partir de Herrero (2019).

El espesor óptico de aerosoles (AOD, *Aerosol Optical Depth*) es una magnitud adimensional, que representa la carga total de aerosoles en la columna atmosférica. Es decir, se refiere a las propiedades de las partículas de aerosol que tienen la capacidad de atenuar la radiación solar a una cierta longitud de onda mediante los procesos de dispersión o absorción de la radiación solar (Alegría, 2015).

El AOD, como se observa en la ecuación 1, se estima a partir del espesor óptico total ( $\tau$ ), el cual es la suma del espesor óptico del aire, la dispersión de Rayleigh ( $\tau_R$ ) y la absorción del ozono ( $\tau_O$ ) y de otros gases atmosféricos ( $\tau_g$ ), se elimina la contribución de estos aspectos para obtener el valor de AOD (Boadhaine, 1999).

$$AOD = \tau - \tau_R - \tau_O - \tau_g \quad [1]$$

Una vez eliminada la contribución de los parámetros  $\tau_R$ ,  $\tau_O$  y  $\tau_g$  se determina el AOD total, a partir de la ley de Beer-Bouguer-Lambert (ecuación 2), que explica la atenuación de la radiación solar a su paso por la atmósfera (Tomasi y Vitale, 1997).

$$\tau = \frac{\ln(RI_{0\lambda}/I_{\lambda})}{m} \quad [2]$$

Donde:

R es el factor de corrección distancia Sol – Tierra;

$I_{\lambda}$  es la intensidad de la radiación observada a una longitud de onda ( $\lambda$ ), a nivel de la superficie del suelo;

$I_{0\lambda}$  es la intensidad de radiación en el límite de la atmósfera, obtenido gráficamente por el método Langley, para una  $\lambda$  particular;

$m$  es la masa del aire determinado por la secante del ángulo cenital solar.

La otra propiedad que se tiene en cuenta en dicho estudio es el parámetro alfa o exponente de Ångström, que representa la forma espectral del AOD, es decir, su dependencia con la longitud de onda, y su expresión es la siguiente (ecuación 3).

$$\tau_{\alpha}(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad [3]$$

Donde

$\tau_{\alpha}(\lambda)$  es el AOD para una longitud de onda determinada;

$\beta$  se conoce como el coeficiente de turbiedad (AOD para  $\lambda = 1$  nm);

$\alpha$  es el exponente de Ångström.

Este parámetro es un indicador cualitativo del tamaño predominante de los aerosoles y puede calcularse para diferentes longitudes de onda. Puede tomar valores entre 0 y 4, aunque para aerosoles, normalmente oscila entre 0 y 0.25. Los valores más altos ( $< 1$ ) indican el dominio del aerosol grueso. Mientras que los valores próximos a 4 están relacionados con la dispersión molecular (Rayleigh) (Schuster, Dubovik, y Holben, 2006).

### 1.1.3 Efectos de los aerosoles

Los aerosoles desempeñan diferentes efectos positivos y negativos sobre el medio ambiente y el clima, y provocan efectos perniciosos sobre la salud humana. A continuación, se presentan los diferentes efectos que pueden albergar los aerosoles presentes en la atmósfera.

#### 1.1.3.1 Efectos sobre la salud

Las alergias y los problemas respiratorios son las principales afecciones que pueden causar los aerosoles en la salud humana. Estas afecciones dependen

principalmente de la cantidad de partículas que penetran en los pulmones al respirar así como de su tamaño y composición, propiedades que están directamente relacionadas con el origen de los aerosoles (Brook *et al.*, 2002; Obregón Muñoz, 2012; Stromatas, 2013). Los aerosoles de mayor diámetro generalmente se filtran en la nariz y en la garganta y no causan problemas graves (figura 6). Sin embargo, los inferiores a  $10\ \mu\text{m}$  pueden llegar a los bronquios y pulmones. Y, las partículas inferiores a  $2.5\ \mu\text{m}$  penetran, todavía, con mayor facilidad en el cuerpo humano pudiendo alcanzar las zonas periféricas de los bronquiolos y alterar el intercambio pulmonar de gases (Brook *et al.*, 2002).

La repercusión de la presencia de material particulado en la atmósfera sobre la salud de la población es innegable. Según el último informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2019), la contaminación atmosférica provoca en Europa más de 400.000 muertes prematuras cada año. Además, se ha demostrado que la contaminación atmosférica provoca otro tipo de problemas graves, como retraso en el desarrollo cognitivo de los jóvenes más expuestos a los contaminantes atmosféricos (Sunyer *et al.*, 2015).

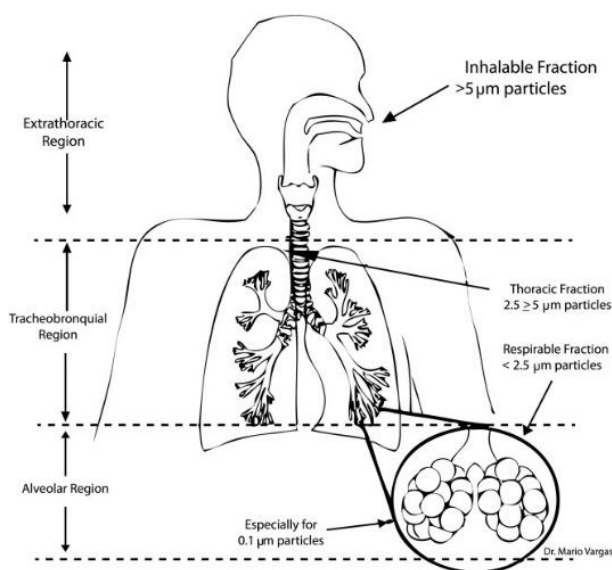


Figura 6. Esquema de la deposición de partículas de aerosoles en el tracto respiratorio humano. Fuente: Sierra-Vargas y Teran (2012).

### 1.1.3.2 Efectos sobre el clima

Los aerosoles actúan sobre la radiación solar y terrestre actuando sobre el balance radiativo terrestre global, debido a que dispersan y absorben parte de la radiación que atraviesa la atmósfera, y emiten, simultáneamente, radiación.

Los efectos que producen los aerosoles sobre el clima, se pueden englobar en tres categorías, descritas por Sharma, Maind Sandip, Kelkar, Knox, y Satish (2013), efectos directos, efectos indirectos y efectos semidirectos (figura 7).

El primero es el **efecto directo** en el que los aerosoles dispersan y absorben la radiación térmica que se emite desde la superficie y la atmósfera de la Tierra y la radiación solar, lo que conlleva un cambio en el equilibrio del balance radiativo global. El segundo es el **efecto indirecto** (Calderón Mateo, 2018), que hace referencia a la capacidad de muchos aerosoles de actuar como núcleos de condensación para la formación de nubes, aumentando la concentración de gotas de agua en la atmósfera y afectando, así, a las propiedades radiativas (forzamiento negativo), ya que las nubes producen una mayor reflexión de la radiación solar. El último efecto es el **efecto semi-directo** (Pey, 2007; Sharma *et al.*, 2013) de los aerosoles que absorben la radiación solar y térmica, como el carbón negro y el polvo mineral. Este tipo de aerosoles calientan el ambiente y, posteriormente, afectan a la generación de nubes, debido al cambio en la estabilidad atmosférica y, en la presión de vapor de agua saturada.

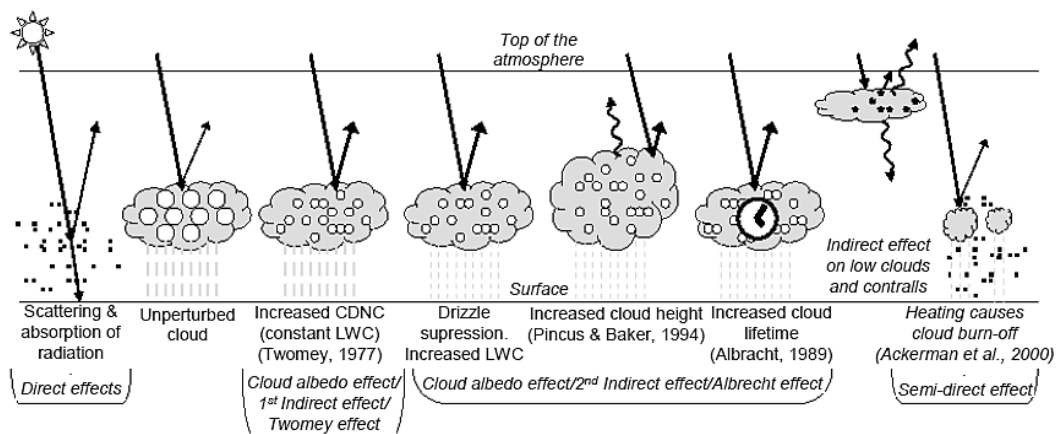


Figura 7. Diagrama de los efectos climáticos directos, indirectos y semi-directos sobre el clima causados por los aerosoles. Fuente: IPCC (2007).

### 1.1.3.3 Otros efectos

#### 1.1.3.3.1 Sobre los ecosistemas

Los aerosoles atmosféricos también repercuten sobre los ecosistemas, indistintamente por procesos de deposición seca o húmeda. Mecanismos como la acidificación o eutrofización de suelos y aguas superficiales son efectos derivados de la deposición de material particulado, que repercutirá, a su vez, en la composición de las aguas subterráneas (Obregón Muñoz, 2012). Los aerosoles que contienen metales pesados, influyen en los procesos de acidificación y/o eutrofización del medio, cuya

acción es impedir procesos químicos y/o biológicos que tienen lugar en dichas matrices ambientales (Wright y Schindler, 1995). Otro efecto causado por la acidificación sería la lluvia ácida que repercute, en especial, a la cubierta vegetal (Pey, 2007). Por otro lado, las partículas de mayor tamaño, como el polvo mineral, se depositan sobre la superficie de las hojas de las plantas, reduciendo la capacidad de intercambio gaseoso y afectando a la fotosíntesis, y, por lo tanto, ralentizando su crecimiento.

#### 1.1.3.3.2 Sobre la visibilidad del medio

Si se entiende el concepto de visibilidad atmosférica como la máxima distancia a la cual un objeto es claramente perceptible en el horizonte, esta puede verse afectada por interferencias en el medio existente entre el objeto y el observador. La presencia de aerosoles en dicho medio provoca una disminución en la luz transmitida debido a los procesos de absorción y *scattering* asociados a las mismas (Salvador, 2005). Ejemplo de este efecto, serían los intensos episodios de calima que se producen en regiones de España, como es el caso de Canarias, que originan reducciones de visibilidad importantes (figura 8).

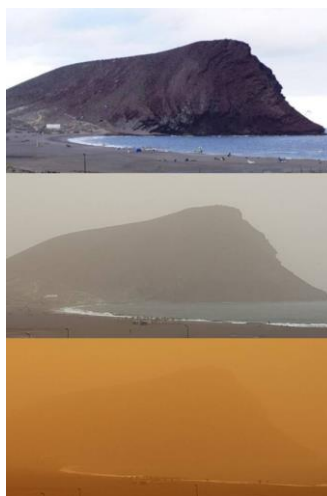


Figura 8. Vista de La Tejita, en el sur de Tenerife, un día normal. Debajo, distintas secuencias del episodio de calima del 24 de febrero de 2020. Fuente: Salas (2020) para El País.

La contaminación urbana, las quemadas de biomasa y los incendios forestales son también buenos ejemplos de actividades que provocan una reducción de la visibilidad atmosférica. Un caso actual que permite evidenciar este efecto es la evolución de la contaminación del aire en Madrid durante el estado de alarma por el Covid – 19 (figura 9). La imagen que aparece en la izquierda muestra la ciudad en plena actividad industrial y social, donde la polución se apodera del medio. Mientras que, la imagen de la derecha, mes y medio después del comienzo de la cuarentena muestra un panorama totalmente distinto.



Figura 9. A la izquierda, Madrid en enero de 2020. A la derecha, Madrid el 22 de abril de 2020. Fuente: Chaparro (2020) para *El Comodorensense*.

## 1.2 INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDIDA DE AEROSOLES

Existen numerosas metodologías e instrumentos que permiten obtener información diversa sobre los aerosoles atmosféricos a diferentes escalas (global, regional y local). Una de las fuentes de información para monitorizar los aerosoles atmosféricos es la teledetección activa o pasiva, con sensores a bordo de satélites o medidas de diferentes instrumentos en la superficie (radiómetros, LIDAR – *Laser Imaging Detection and Ranging*, etc.) que, junto a la ayuda de un modelo, permite obtener la máxima información posible. Estas técnicas de teledetección, tal y como indica Burgos (2016) en su estudio, analizan los procesos de absorción y dispersión – *scattering* – que provoca la interacción entre la radiación solar y el material particulado en la atmósfera.

Otras técnicas de monitorización de aerosoles comprenden las mediciones *in situ*, bien sea desde observatorios en superficie o en plataformas aéreas, que se basan en tomar datos automáticos o muestras que, posteriormente, serán analizadas en laboratorio (Herrero, 2019).

En este proyecto se han utilizado datos de dos tipos de instrumentos para la monitorización de aerosoles *in situ*. Por una parte, se han obtenido datos de espesor óptico de aerosoles (o AOD) de la red AERONET (*Aerosol RObotic NETwork*), que lleva a cabo mediciones en superficie de la columna atmosférica a través de un instrumento denominado fotómetro solar CIMEL, cuyas características se detallan más adelante. Y, por otro lado, se han recopilado los datos de concentración másica de partículas  $PM_{10}$  de la ciudad de Zaragoza, proporcionados por el Ayuntamiento, cuyas mediciones han sido realizadas con un captador de atenuación beta.

### 1.2.1 La red AERONET

La red AERONET es una federación de redes de fotómetros solares instalados a nivel de suelo, que se estableció con el objetivo de estandarizar las mediciones en tierra y el procesamiento de los datos de los fotómetros solares CIMEL, que es el instrumento de referencia de dicha red, proporcionar los datos de validación en tierra necesarios para futuros programas de teledetección y proporcionar información acerca de las características de los aerosoles para cuantificar mejor su impacto en el forzamiento radiactivo, así como establecer sinergias con otras bases de datos (Corbin, Kreidenweis y, Vonder Haar, 2002; Obregón Muñoz, 2012; Toledano Olmeda, 2005).

AERONET se creó en 1998 y, fue establecida por el *Goddard Space Flight Center* (GSFC – NASA) y el *Laboratoire d'Optique Atmospherique* (LOA) de la Universidad de Lille (Francia) (Holben *et al.*, 1998). En la actualidad cuenta ya con más de 450 estaciones repartidas por todo el planeta (Piñas Sumalave, 2015), como se aprecia en la figura 10. La base de la red proporciona información sobre el AOD, el vapor de agua y, diversos parámetros radiativos y microfísicos obtenidos mediante algoritmos de inversión en estaciones con diversas condiciones y regímenes de aerosoles: marítimo, continental, ártico, de alta montaña, desértico, etc. (Holben *et al.*, 1998; Obregón Muñoz, 2012; Represa, Fernández-Sarría, Porta, y Palomar Vázquez, 2018; Toledano Olmeda, 2005).

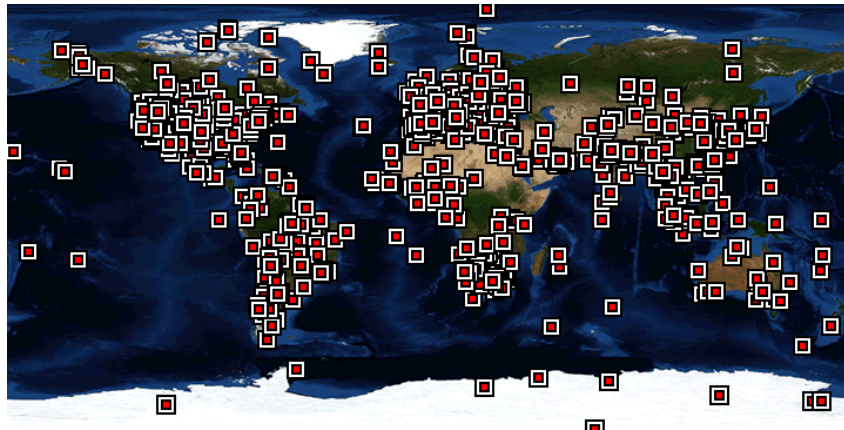


Figura 10. Distribución global de las estaciones que proporcionan observaciones de aerosoles en columna que pertenecen a la red AERONET. Fuente: NASA (2020).

El programa ofrece una base de datos de dominio público sobre el espesor óptico de aerosoles, microfísica y propiedades de radiación, de los que se hablará más adelante.



En el ámbito español, la red de fotómetros solares CIMEL de AEMET comenzó a funcionar en 2003, año en el que se adquirió el primer fotómetro y, desde 2006, que se montaron los últimos, consta de cinco estaciones: A Coruña, Zaragoza, Madrid, Palma de Mallorca y Murcia (figura 11).



Figura 11. Situación de la red CIMEL de AEMET en España. Fuente: San Atanasio (2016).

AEMET, a su vez, dispone todavía de un fotómetro más que permite realizar una calibración anual de cada uno de los fotómetros, de tal manera que siempre hay un fotómetro calibrándose.

El emplazamiento de los fotómetros que aparece en la figura 11, no sé llevo a acabo de forma aleatoria, sino que se tuvieron en cuenta varios factores que actuaron en conjunto:

- La distribución en forma de estrella de las estaciones de AEMET en la Península para cubrirla toda a falta de una estación en el suroeste, pero se prefirió llevarla a Baleares.
- Se debió, también, a unos criterios de disponibilidad de personal de AEMET para llevar a cabo las labores de mantenimiento de los equipos.

Cabe destacar que España, antes de 2006, ya contaba con algunos fotómetros solares CIMEL propiedad de algunas universidades y centros de investigación, en Palencia, Barcelona, Cáceres, Granada o El Arenosillo (Huelva). En 2011, AEMET firmó un Convenio de Colaboración con la Universidad de Valladolid para 3 años en el que se aseguraron varios puntos (figura 12):

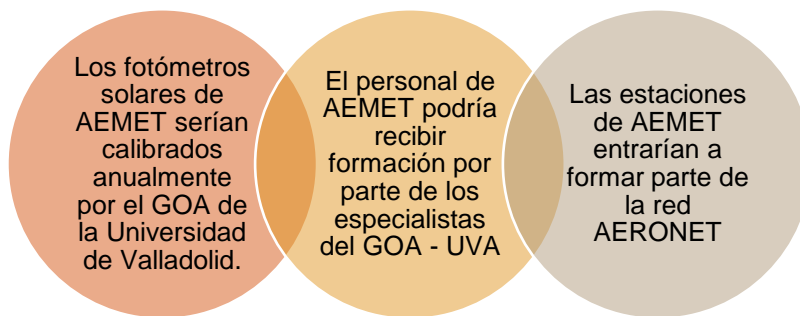


Figura 12. Aspectos determinantes en el Convenio de colaboración entre AEMET y la Universidad de Valladolid. Fuente: San Atanasio (2016).

Esto supuso la visibilidad de la red de AEMET de medida de aerosoles obtenidos por los fotómetros CIMEL de AEMET. Y, en la actualidad, coexiste con otras redes de fotómetros solares CIMEL instalados en distintas universidades, Parques Nacionales y centros de investigación (figura 13). El fotómetro solar CIMEL de Zaragoza es el único ubicado en el Valle del Ebro.



Figura 13. Conjunto de redes de fotómetros solares CIMEL en España. Fuente: San Atanasio (2016).

### 1.2.2 Descripción del fotómetro solar CIMEL CE318

El fotómetro solar Cimel Electronique (CE) modelo 318 es el instrumento estándar de la red AERONET, diseñado para la medida autónoma y automática de la radiancia solar directa y de cielo, tanto en el plano almucántar como principal, tal como se muestra en la figura 14 (Estellés, 2006). El primer modelo (CE318-1, con 5 canales) fue desarrollado a principios de los años 90 en una colaboración entre la empresa Cimel Electronique y el LOA. Este primer modelo se convirtió en el instrumento

estándar de la red francesa PHOTONS (*PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire*) (Estellés, 2006; Herrero, 2019; Obregón Muñoz, 2012; Piñas Sumalave, 2015). A mediados de los 90, la NASA en colaboración con esta red crearon la red AERONET, como se ha indicado en el punto 1.2.1.

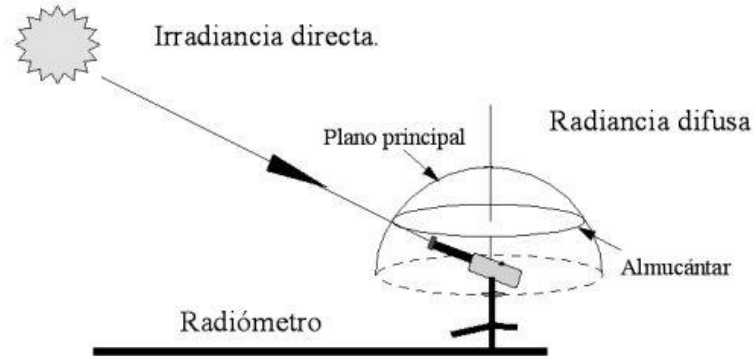


Figura 14. Representación del tipo de medidas que realiza el CIMEL CE318. Fuente: Alcántara (2013)

En este estudio se han utilizado los datos paramétricos de aerosoles en columna sobre la ciudad de Zaragoza. Estos parámetros, en general, AOD y exponente de Ångström, se han obtenido del fotómetro solar CIMEL CE318 instalado en la Delegación de AEMET en Zaragoza (figura 15), ubicada en el centro de la ciudad ( $41,633370^\circ$  N,  $-0,882410^\circ$  S), concretamente, el instrumento se encuentra en la terraza del edificio, con unas condiciones óptimas para la medida de la radiación, debido al horizonte libre de obstáculos que rodea la instalación.



Figura 15. Fotómetro solar CIMEL CE318 situado en la sede de AEMET en Zaragoza.

A continuación, se describe en qué consiste el instrumento, cómo funciona y cuál es la forma en la que los datos están disponibles para cualquier usuario.

#### 1.2.2.1 Estructura

El fotómetro solar CIMEL CE318 (figura 16) consta de las siguientes partes:

- **Caja electrónica de control.** El funcionamiento del instrumento se controla a través de una EPROM (*Erasable Programmable Read – Only Memory*) parcialmente programable. El sistema de control se encuentra dentro de una caja metálica sellada y deshumidificada con pantalla de cristal líquido, un reducido teclado de cuatro botones y un puerto de comunicaciones. Este elemento permite el almacenamiento de los datos que después se descargarán vía red o satélite a un servidor (Cimel Advanced Monitoring, 2015; Estellés, 2006; Guirado, 2015; Obregón Muñoz, 2012; San Atanasio, 2016)

La caja se encuentra ubicada en el interior de un armario en el que también se alojan las baterías destinadas a alimentar el sistema de control (6V) y los motores del robot (12V), una placa solar de 5W destinada a recargar las baterías en el caso de que se carezca de alimentación eléctrica y un sensor de humedad cuya función es impedir el funcionamiento del robot en el caso de que se esté produciendo precipitación (San Atanasio, 2016).

- **Robot.** Rige el movimiento del fotómetro con la ayuda de dos motores eléctricos que controlan las coordenadas acimutal y cenital. Estos vienen gobernados por la caja de control y alimentados por una batería externa de 12V (Cimel Advanced Monitoring, 2015; Estellés, 2006; Guirado, 2015; Obregón Muñoz, 2012; San Atanasio, 2016).
- **Cabeza sensora.** Principalmente contiene la optoelectrónica de medida. El sistema sensor lo constituyen dos fotodios de silicio dedicados a la medida de la radiancia directa y de cielo. Aunque no existe un control activo de la temperatura, en el detector se ha instalado un sensor que registra la temperatura en el momento de cada medida para poder aplicar las correcciones pertinentes durante la fase de procesado.

A la cabeza sensora se acoplan los dos **colimadores** que limitan el *Field of View* del equipo a 1.2°, uno destinado a la medida de la componente directa y la aureola solar y, otro a la medida de radiancia del cielo.

La selección de las diferentes longitudes de onda se realiza por medio de filtros interferenciales insertados en una **rueda de filtros** con hasta nueve posiciones. Las longitudes de onda básicas son 440, 670, 870, 940 y 1020 nm. El ancho de banda o FWHM (*Full Width at Half Maximum*) depende del canal, aunque varía entre 2 – 40 nm según la región del espectro (Cimel Advanced Monitoring, 2015; Estellés, 2006; Guirado, 2015; Obregón Muñoz, 2012; San Atanasio, 2016).



Figura 16. Principales componentes de un fotómetro solar CIMEL CE318. Fuente: Guirado (2015).

#### 1.2.2.2 Características del funcionamiento

Las medidas solares directas se realizan en todas las longitudes de onda disponibles en el instrumento, que se han enumerado en el apartado anterior. Para cada una de estas longitudes de onda se determina el AOD, salvo para el canal de 940 nm que se utiliza para la obtención del contenido en vapor de agua de la columna atmosférica. Cada observación consiste, en realidad, en tres medidas tomadas aproximadamente cada 30 segundos, creando un triplete de medidas para cada longitud de onda, que facilita la detección de medidas que deben ser desechadas, ya sea por fallo del instrumento o por la presencia de nubes durante la medida (Calderón Mateo, 2018; Guirado, 2015; Obregón Muñoz, 2012; Stromatas, 2013).

En lo que respecta a las observaciones de radiancia, hay dos tipos de medidas (plano principal y almucántar) y se realizan para cuatro longitudes de onda, de las mencionadas anteriormente: 440, 670, 870 y 1020 nm. Como paso previo a las

medidas de radiancia siempre se realiza una medida solar directa que permite fijar la posición del sol, que se corresponderán a los ángulos cenital y acimutal (Guirado, 2015; Stromatas, 2013).

Tal como indica Guirado (2015) en su tesis, el primer tipo de medida, es decir, la medida del plano principal del sol, se lleva a cabo manteniendo constante el ángulo acimutal y variando el cenital desde  $6^\circ$  por debajo del sol hasta  $140^\circ$  en sentido opuesto (figura 17 (a)). El segundo tipo de medida consiste en seguir el plano almucántar solar, que es el ángulo de elevación constante variando el ángulo acimutal con relación a la posición del sol, en este caso, se fija el ángulo cenital y se varía el ángulo acimutal  $180^\circ$  hacia la derecha primero y, tras apuntar de nuevo al sol,  $180^\circ$  hacia la izquierda (figura 17 (b)).

Estas medidas permiten obtener un amplio rango de ángulos de dispersión a través de un perfil constante de aerosoles que, mediante la aplicación de métodos de inversión, permite obtener la distribución de tamaños de aerosoles, así como diversas propiedades microfísicas y radiativas (Dubovik y King, 2000).

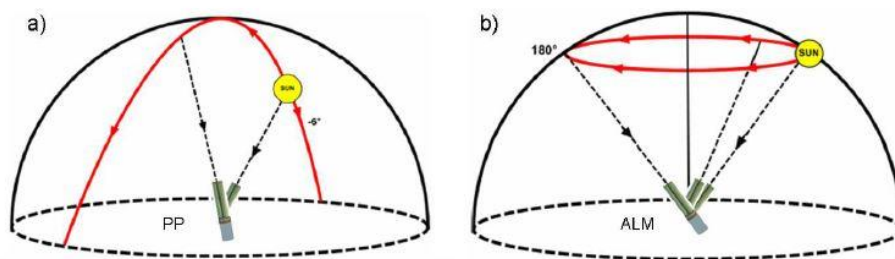


Figura 17. Interpretación gráfica de las medidas de (a) plano principal y (b) almucántar. Fuente: Cimel Advanced Monitoring (2015).

Los datos registrados por el fotómetro solar CIMEL CE318 se almacenan en la memoria del instrumento y, posteriormente, se envían al sistema de procesamiento de AERONET por dos posibles procedimientos (Calderón Mateo, 2018; Obregón Muñoz, 2012):

- Vía satélite.
- Mediante descargas a un ordenador y, su posterior envío por internet, como es el caso de la estación de Zaragoza. Esta descarga al ordenador puede realizarse de manera manual o programada, siempre con una frecuencia diaria debido a que la memoria interna del fotómetro sólo puede almacenar, aproximadamente, las medidas de un día y medio.

Además, siguiendo cualquiera de las dos vías, se envían informes relativos a los problemas que pueda estar sufriendo el instrumento de medida, que impida su correcto funcionamiento, como fallos de temperatura, de baterías, humedad, en el robot, etc. (Herrero, 2019).

*A posteriori*, estos datos se podrán consultar en la página web de AERONET en la página web gestionada por el GOA (<http://www.caelis.uva.es/>) o, en los informes de las transmisiones en tiempo cuasi-real, tanto los datos generados, como de las alarmas descritas antes (Herrero, 2019).

Finalmente, los datos proporcionados por AERONET se encuentra en dos versiones que son 1 y 2; y se agrupan en tres niveles de confianza (Calderón Mateo, 2018; San Atanasio, 2016; Toledano Olmeda, 2008), los cuales son los niveles 1.0, 1.5 y 2.0 para cada producto:

- El **nivel 1.0** está conformado por las medidas brutas, es decir, por aquellos datos que no han sido revisados ni filtrados.
- El **nivel 1.5** es la serie de datos de los que se han eliminado las medidas afectados por la presencia de nubes, a partir de un algoritmo automático desarrollado por la red – *screening* –.
- El **nivel 2.0** es aquel compuesto por los datos o medidas que han filtrado los datos con nubes, control de calidad y, además, se les ha aplicado una calibración probada (pre y postcalibración), de esta forma se asegura que estos datos son aquellos con mayor calidad que se pueden encontrar en la versión 2.

Los datos de estos tres niveles archivados, los distribuye el GSFC y, como se ha comentado antes, son de dominio público. En este proyecto de toda la información sobre aerosoles que proporciona la red y la serie de datos, solamente se trabajará con el AOD y el exponente de Ångström. Y, con datos de nivel 1.5.

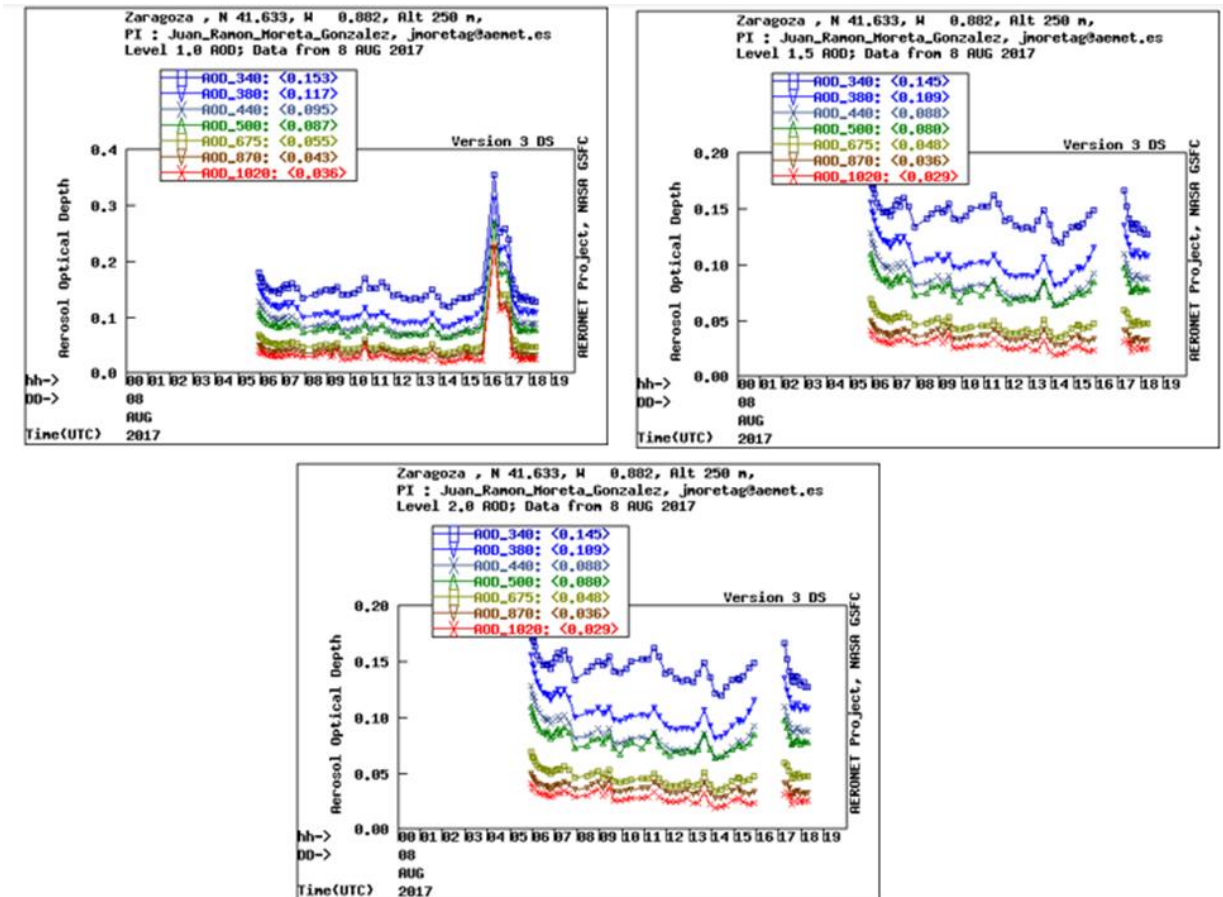


Figura 18. Ejemplo de evolución de los datos de AOD en los diferentes niveles de confianza 1.0 (arriba izquierda), 1.5 (arriba derecha), 2.0 (abajo), para el día 8 de agosto de 2017. Fuente: NASA (2020).

### 1.2.3 Monitorización de PM<sub>10</sub>

Las partículas, de diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros, al igual que los gases como NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, etc., se analizan en continuo a partir de instrumentos como son los captadores automáticos de atenuación beta o, los de microbalanza oscilatoria. No obstante, estos instrumentos no analizan químicamente el contenido de la muestra, sino que determinan la concentración de partículas a partir de sus propiedades físicas. (Gobierno de México, n.d.).

Los principios de operación comúnmente utilizados para el monitoreo de partículas son: el de microbalanza de elemento oscilante y el de atenuación de radiación beta. Estos instrumentos aprovechan la dinámica de las partículas para que, a cierta velocidad de flujo, las partículas de mayor tamaño sean impactadas en algún sistema de retención y no lleguen hasta el filtro (Gobierno de Aragón, 2020a; Gobierno de México, n.d.). Aunque el método de referencia para la determinación de la concentración de partículas en el ambiente en el contexto de la gestión de calidad del



aire, suele ser usualmente el muestreo de alto volumen, en combinación con el método gravimétrico en laboratorio (Gobierno de Aragón, 2020a).

Los analizadores de la red de calidad del aire de la ciudad de Zaragoza siguen el patrón de la atenuación de radiación beta. El Ayuntamiento de Zaragoza realiza dos campañas de monitorización al año basadas en el método de referencia (EN 12341, gravimétrico) y auditadas por el Instituto de Salud Carlos III con las que obtiene los factores de corrección que aplican para corregir los datos de los monitores beta.

#### 1.2.3.1 *Captador automático por atenuación beta*

Este equipo (figura 19) usa el principio radiométrico de atenuación beta a través de un filtro de área conocida para detectar de manera continua la masa de partículas depositadas. De manera adicional, mide las emisiones de partículas alfa de aerosol en el aire ambiente que está siendo muestreado, y excluye la contribución de radiación proveniente de la disminución del gas radón, obteniendo una medida de masa precisa. Las medidas simultáneas de masa refinada de partículas en el filtro y del volumen muestreado proporcionan una medida continua de la concentración de partículas en aire ambiente (Losada, 2016).

Se inicia un ciclo cuando un nuevo filtro limpio es introducido por un cambiador automático a la cámara combinada de muestreo y detección, esto sucede al menos cada 24 horas. Inmediatamente después del cambio de filtro, se inicia un nuevo ciclo de medida con un autoajuste cero de la señal de masa. El intervalo y hora del cambio de filtro pueden ajustarse (Losada, 2016).

El aire es arrastrado a través de un cabezal de entrada selectivo con corte 10  $\mu\text{m}$ . El caudal volumétrico a la entrada suele ser de 16,7 L/min (1  $\text{m}^3/\text{h}$ ). La muestra particulada se arrastra después por un tubo calentado por carcasa. El calor aplicado a la muestra puede ajustarse para alcanzar una temperatura determinada. El propósito del calentamiento es la reducción de la posible presencia de agua y humedad relativa en la corriente de muestra. Con esto se consigue reducir una medida incorrecta de la atenuación beta que puede ocurrir potencialmente como resultado de la condensación en el filtro o por condiciones de humedad elevada (Losada, 2016; Met One Instruments Inc., 2008).

Cuando el tubo de muestreo llega al instrumento, un tubo aislado lo une con la cámara. Después, la materia particulada es arrastrada a través del filtro de fibra de vidrio entre el detector proporcional y la fuente de  $^{14}\text{C}$ . Aquí la radiación beta pasa a través del filtro y la capa de  $\text{PM}_{10}$  acumulada. La concentración de  $\text{PM}_{10}$  que se ha depositado en el filtro da lugar a una atenuación de la radiación beta. A medida que la

carga másica de PM<sub>10</sub> depositada sobre el filtro aumenta, aumenta también la atenuación de la radiación, dando lugar a una intensidad beta reducida medida por el detector proporcional. Durante el muestreo, la masa en el filtro siempre es conocida y se obtiene la cantidad de PM<sub>10</sub> acumulada en cada momento (Gobierno de México, 2020; Losada, 2016; Schulte y Friedman, 2019).

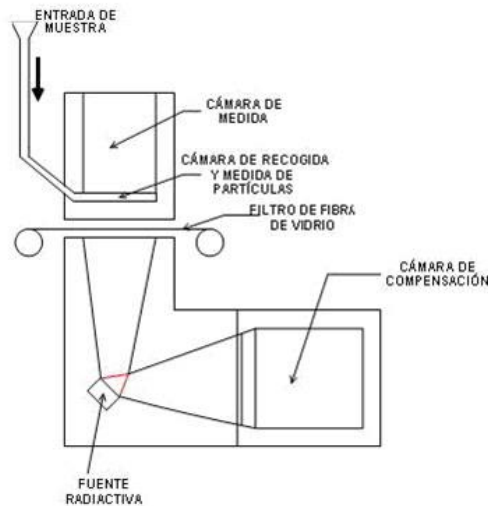


Figura 19. Esquema de un analizador de partículas mediante atenuación de la radiación beta. Fuente: Gobierno de Cantabria (2020).

La relación entre la intensidad del rayo beta transmitido y la masa de partículas está dada por la ecuación 4 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014):

$$I = I_0^{(-um/Xm)} \quad [4]$$

Donde,  $I$  es la intensidad de la radiación beta transmitida a través del filtro con partículas,  $I_0$  es la intensidad de la radiación beta transmitida a través del filtro limpio,  $um$  es el coeficiente de absorción de masa ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $Xm$  es la masa de partículas ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

De esta forma, despejando la masa se calcula de la siguiente manera:

$$Xm = 1/um \ln(I_0/I) \quad [5]$$

Donde la concentración es expresada de la siguiente manera:

$$C = S/VXm \cdot 10^6 \quad [6]$$

Donde,  $C$  es la concentración de PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $S$  es el área de colección ( $\text{cm}^2$ ) y  $V$  es el volumen muestreado a CN, en condiciones normales ( $\text{Nm}^3$ ).

## 2 OBJETIVOS

---

El principal objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es:

- Estudiar la fenomenología y el impacto que puede tener el proceso de emisión de polvo mineral en el Valle del Ebro sobre la calidad del aire y el espesor óptico de aerosoles (AOD) en la ciudad de Zaragoza.

De entre las numerosas fuentes de emisión de polvo mineral a la atmósfera, este trabajo se ha centrado especialmente en el polvo de origen regional, asociado en muchas ocasiones al uso del suelo en zonas agrícolas, y cuya emisión se favorece bajo condiciones meteorológicas particulares. Hasta la fecha el estudio de este fenómeno no se ha abordado. Por ello, para poder dar respuesta al objetivo principal, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los principales episodios de contaminación por aerosoles acontecidos en la ciudad de Zaragoza durante el periodo de 2014 – 2018, a partir de la siguiente combinación de herramientas: análisis de mapas de aerosoles, estudio de parámetros meteorológicos, interpretación de las series de datos de AOD y partículas  $PM_{10}$ .
- Seleccionar las situaciones favorables a la resuspensión de polvo y verificar su incidencia en la calidad del aire para su catalogación.
- Evaluar el impacto de las situaciones potencialmente favorables para la emisión de polvo mineral a escala regional, Valle del Ebro, sobre el AOD.
- Estudiar la fenomenología de la emisión de polvo regional a través de parámetros como la recurrencia, la cantidad de episodios severos, la posible estacionalidad, o la necesidad de ciertas condiciones en el entorno.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 ZONA DE ESTUDIO

Para la consecución de los objetivos planteados se seleccionó la ciudad de Zaragoza, que se sitúa en el noreste de España (figura 20), en el centro del Valle del Ebro. El clima en la zona de estudio se clasifica como mediterráneo continentalizado, y se caracteriza por presentar una elevada oscilación térmica, escasez de precipitaciones, y un flujo de vientos canalizado a través del propio Valle, con una componente noroeste dominante y en muchas ocasiones con gran intensidad (Cuadrat, 2004; López, Cabrera, Cuadrat, Saz, y Martín, 2007; Palomares, 2018).

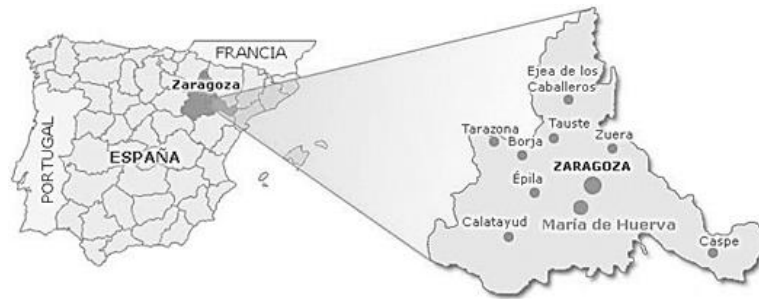


Figura 20. Situación de la zona de estudio, Zaragoza, respecto a España. Fuente: López, Cabrera, Cuadrat, Saz, y Martín (2007).

Por su latitud Aragón se encuentra en el límite meridional del dominio templado de la circulación de vientos del oeste, en contacto con la zona de altas presiones subtropicales. Este límite entre el cinturón templado y el tropical presenta un movimiento pendular a lo largo del año, de tal modo que en invierno desciende hacia el Sur avanzando hasta el solar regional, y en verano se desplaza nuevamente hacia el norte, alejándose de nuestras latitudes; por ello, buena parte del año la región está subgobernada por los mecanismos propios de áreas templadas, como son la presencia de masas de aire polar y las típicas borrascas atlánticas con sus frentes asociados; mientras que, a medida que se aproximan los meses estivales, se aprecia una disminución de esta influencia y el progresivo dominio de las masas de aire cálido y de la células anticiclónicas de las regiones subtropicales, más concretamente del anticiclón de las Azores (Cuadrat, 2004; López, Cabrera, Cuadrat, Saz, y Martín, 2007).

Es decir, esta zona se caracteriza por presentar bajas precipitaciones que se concentran sobre todo en los meses de primavera (548,8 mm anuales), aunque en la

depresión del Ebro este promedio difícilmente alcanza los 400 mm; y una temperatura media moderada de 12,3 °C. En las figuras 21 y 22 se pueden ver representados estos valores, tanto de precipitaciones como de temperatura, donde los promedios térmicos anuales más elevados se encuentran en el Valle del Ebro y, consecuentemente, los promedios pluviométricos son inferiores también en dicha zona (Cuadrat, 2004; Cuadrat, Saz, Serrano, y Tejedor, 2015; López *et al.*, 2007; Palomares, 2018).

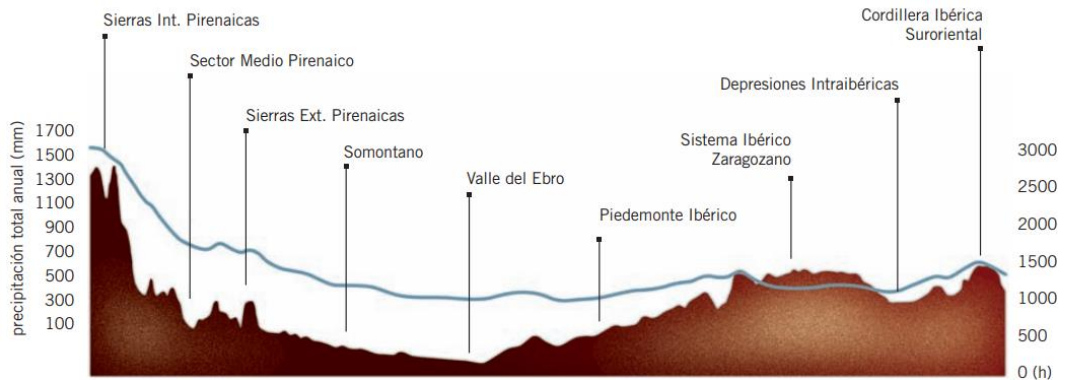


Figura 21. Transecto norte - sur de la precipitación total anual en Aragón. La curva azul representa el valor de esta variable. La superficie en marrón corresponde con un perfil topográfico longitudinal de Aragón. Fuente: López *et al.* (2007).



Figura 22. Transecto norte - sur de la temperatura media anual de Aragón. La curva roja representa el valor de esta variable. La superficie marrón corresponde al perfil topográfico longitudinal de Aragón. La línea recta azul señala el valor de la temperatura media anual de toda la Comunidad Autónoma (12,3 °C). Fuente: López *et al.* (2007).

En este sentido, teniendo en cuenta el clima del Valle del Ebro y sus particularidades geográficas, el viento es un elemento que juega un importante papel dentro de este estudio, tanto por su frecuencia como por la intensidad, ya que, en la zona central, en el Valle del Ebro no es extraño que se presenten velocidades de 100 km/h. Este viento característico de la Comunidad, comúnmente conocido como cierzo, tendería a actuar como purificador de la atmósfera. Sin embargo, según el informe de

la OMS de 2018, Zaragoza presenta niveles de contaminación de la atmósfera superiores a los recomendados por este organismo, si bien cumple con los valores límite permitidos en la legislación vigente.

### 3.2 COMPILACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN DE LA CIUDAD DE ZARAGOZA

#### 3.2.1 Redes de vigilancia de la contaminación atmosférica

La ciudad de Zaragoza dispone de 8 estaciones de vigilancia y control de la calidad del aire, representadas en la figura 23, todas ellas pertenecientes a la *Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Zaragoza*. De estas 8 estaciones, solamente se han seleccionado 6 para la toma de los datos de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>: Renovales (Luis Vives), El Picarral, Roger de Flor, Jaime Ferrán, Avenida de Soria y Las Fuentes (tabla 1). Las tres primeras estaciones de control pertenecen a la red EUROAIRNET, Red Europea de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire Ambiente, y las restantes pertenecen a la Red Nacional.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las estaciones remotas de vigilancia de la calidad del aire de Zaragoza. Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza (2020)

Estación de calidad del aire	Renovales	El Picarral	Roger de Flor	Jaime Ferrán	Avda. Soria	Las Fuentes
Altitud	220 m	195 m	212 m	196 m	208 m	198,20 m
Tipo de zona	Urbana, estación de fondo	Urbana	Urbana	Suburbana	Urbana	Urbana, estación de tráfico
Tráfico	Ligero	Moderado	Intenso	Ligero	Moderado	Moderado

La red de vigilancia y control de la calidad del aire monitoriza en tiempo real las concentraciones horarias de óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono, monóxido de carbono y partículas en suspensión de diámetro inferior a 10 µm (PM<sub>10</sub>) en todas sus estaciones, y de forma localizada otros parámetros como el sulfuro de hidrógeno o el PM<sub>2.5</sub>. Cada una de las estaciones envía sus datos en tiempo real al centro de adquisición de datos ubicado en el Ayuntamiento de Zaragoza. De este modo, se vigila que ningún agente nocivo supere sus límites de contaminación establecidos por el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Para realizar este estudio se solicitaron los datos de PM<sub>10</sub> del periodo 2014 – 2018 al Ayuntamiento de Zaragoza.

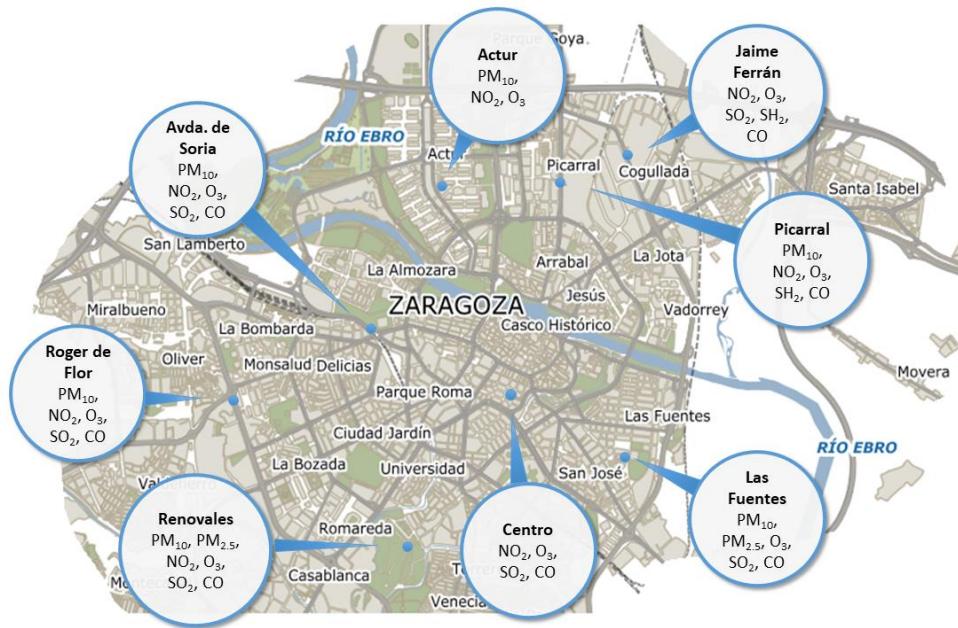


Figura 23. Situación de las estaciones de calidad del aire de Zaragoza y listado de contaminantes que mide cada una de ellas. Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2 Interpretación de datos de PM<sub>10</sub>

Las concentraciones de PM<sub>10</sub> se han utilizado para evaluar el impacto de la emisión de polvo regional en la ciudad de Zaragoza. El histórico de datos diarios puede obtenerse de la página web del Ayuntamiento de Zaragoza, sin embargo, para este estudio se solicitó el envío de los datos a escala horaria y por ello se contactó con Nieves López, responsable de la Red de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Zaragoza.

Los valores de PM<sub>10</sub> se obtienen en formato hoja Excel, donde aparecen los niveles de concentración de partículas agrupados por estación de medida, por días, durante todo el periodo de estudio, 2014 – 2018, y de forma horaria, es decir, cada día presenta 24 valores. Estos datos tienen unidades de  $\mu\text{g}$  de partículas de tamaño igual o inferior a 10 micras por  $\text{m}^3$  de aire y, están expresados como una medida diaria/horaria en cada una de las estaciones.

Para poder trabajar con los datos de forma más sencilla se calculó el promedio diario de partículas en suspensión por estación de calidad del aire, a partir de la ecuación 7 adjunta. De esta forma, los promedios permiten elaborar gráficas mensuales, que muestra la evolución de la concentración de partículas en un mes de estudio, y, así, poder identificar los episodios de polvo regional en suspensión, observando la coherencia con los casos de vientos intensos y AOD elevados.

$$\text{Promedio diario } PM_{10} = \frac{\sum cc PM_{10} \text{ diaria en una estación de calidad del aire determinada}}{24} \quad [7]$$

### 3.2.2.1 Legislación vigente en lo relativo a partículas en suspensión en aire ambiente

En materia legislativa, en este estudio se trabaja con el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, que entró en vigor a principios del 2011. Este Real Decreto recoge, entre otras cosas, los valores límite de las partículas  $PM_{10}$  que se deben dar en condiciones ambientales para la protección de la salud (tabla 2). Asimismo, es importante tener en cuenta los valores fijados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) en materia de material particulado, que recomienda un valor límite anual de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (la mitad del establecido por el RD 102/2011) y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media en 24 horas para que no se produzcan daños a la salud humana.

Tabla 2. Directrices para clasificar la calidad del aire de la ciudad de Zaragoza, según los valores establecidos por el RD 102/2011.

	Periodo promedio	Valor límite	Nº de superaciones máximas	Fecha de cumplimiento del valor límite
<b>Valor límite diario</b>	24 horas	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	35 días en un año	En vigor desde el 1 de enero de 2005
<b>Valor límite anual</b>	1 año civil	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	–	En vigor desde el 1 de enero de 2005

## 3.3 HERRAMIENTAS METEOROLÓGICAS E INTERPRETACIÓN DE MAPAS DE AEROSOLES

Para la interpretación de la variabilidad diaria de los niveles de partículas,  $PM_{10}$ , y de los valores de AOD, y el posterior análisis de los resultados, ha sido necesario analizar detalladamente las diferentes situaciones meteorológicas que han tenido lugar durante el periodo de estudio, entre enero de 2014 a diciembre de 2018. Para ello, se han utilizado diversas herramientas y mapas meteorológicos, mapas de concentración de aerosoles y, en algún caso imágenes satélite. A continuación, se explica detalladamente en que consiste cada una de las herramientas utilizadas.

**NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System)** de la Marine Meteorology Division, Naval Research Laboratory (NRL) es un modelo global de análisis de aerosoles multicomponente que proporciona información sobre el espesor



óptico de aerosoles, así como de concentración a nivel de superficie de partículas de sulfato, polvo mineral de origen desértico y aerosoles carbonosos derivados de la combustión de biomasa. El modelo NAAPS consiste en un conjunto de varios modelos pronosticadores específicos, que cuenta con un archivo histórico desde marzo de 2000. La información meteorológica se obtiene del modelo pronosticador del Sistema Global de Pronósticos Atmosféricos de La Marina (NOGAPS). Este modelo tiene cuatro salidas diarias a las 00, 06, 12 y 18 horas, con predicción de hasta 96 horas (Pey, 2007; SERVIR, 2009; TROPOSFERA, 2019).

El pronóstico que genera NAAPS se presenta en una única imagen con cuatro mapas cuadrilaminares, como se puede observar en la figura 24. En la parte superior izquierda se presenta el espesor óptico de aerosoles de sulfato, polvo y humo y, muestra el pronóstico de la profundidad óptica total de aerosoles en toda la troposfera. La altura de la troposfera varía según la temporada y la región, pero generalmente es de 10-15 kilómetros. Los tipos de aerosoles están identificados por color para facilitar la interpretación. Este cuadro no es aplicable al análisis de la calidad del aire superficial, ya que representa un pronóstico de las concentraciones de aerosoles en toda la troposfera (SERVIR, 2009; Westphal, 2014).

En el cuadro superior derecho se presenta la concentración superficial de sulfatos en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Al igual que en todo el modelo, se representa un pronóstico, en este caso, de la concentración de aerosoles de sulfato en superficie. Los valores de concentración están identificados por color para facilitar la futura interpretación de los datos. Con efecto del análisis de la calidad del aire, es importante tener en cuenta la concentración de sulfato debido a que es uno de los principales componentes de la bruma de las áreas urbanas.

En el cuadro inferior izquierdo, se muestra el pronóstico de la concentración superficial de polvo, principalmente de origen desértico, en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Al igual que con los sulfatos o con el humo para facilitar la interpretación de los datos, los valores de concentración aparecen remarcados de diferentes colores. Por último, en el cuadro inferior derecho, aparece el pronóstico de la concentración superficial de humo, en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Normalmente este humo procede de la combustión de biomasa.

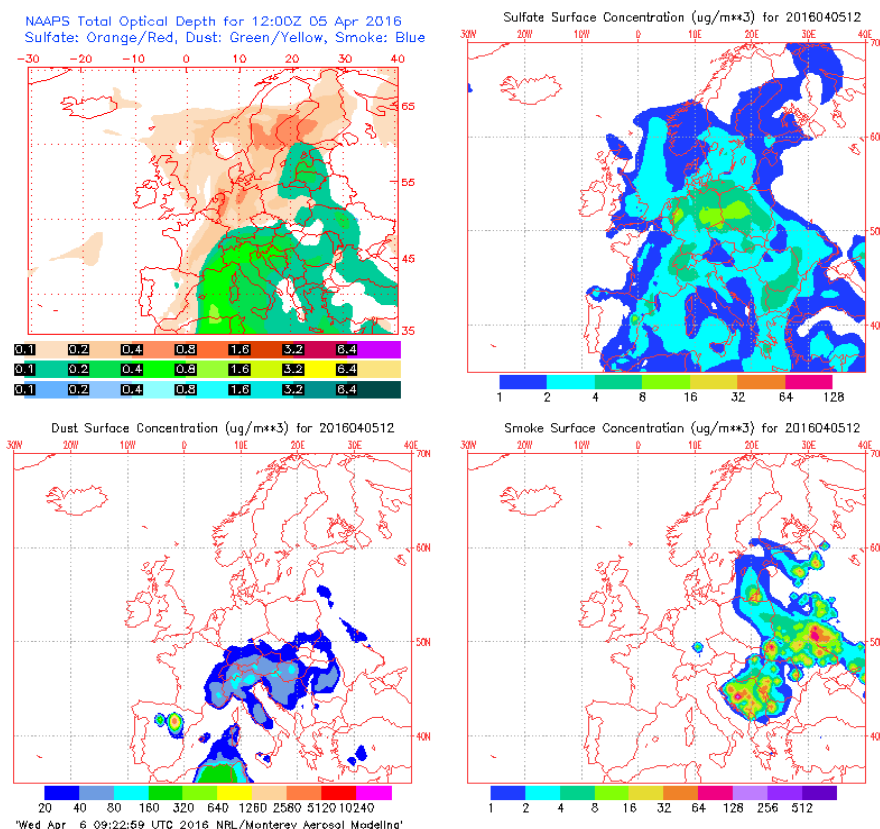


Figura 24. Mapas de aerosoles NAAPS para el 5 de abril de 2016 a las 12:00z. Se muestra el espesor óptico de aerosoles (parte superior izquierda), la concentración de sulfatos ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a nivel de superficie (parte superior derecha), la concentración de polvo mineral ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a nivel de superficie (parte inferior izquierda) y la concentración a nivel de superficie de partículas carbonosas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) derivadas de combustión de biomasa (parte inferior derecha).

El **Dust Regional Atmospheric Modelling (BSC/DREAM)** es un modelo, ejecutado por el *Barcelona Supercomputing Center*, que se basa en la ecuación no lineal diferencial parcial de tipo Euler para la continuidad de las masas de polvo y, hasta junio de 2005, fue desarrollado en el Centro Euromediterráneo de Dinámica Costera Insular (ICoD). Este modelo proporciona pronósticos diarios en la web de BSC que se evalúan en tiempo prácticamente real frente a observaciones satélites y terrestres (Knippertz y W.Stuut, 2014).

El BSC/DREAM8b v2.0 facilita una predicción a 72 horas, con un mapa cada 6 horas (figura 25). Cada mapa se compone de uno meteorológico en la parte derecha, mostrando las isobaras a nivel de superficie y la precipitación prevista o acumulada con el paso de las horas, y otro de la concentración prevista de aerosoles en la parte inferior, mostrando las áreas afectadas por las masas de aire cargadas en polvo mineral de origen desértico y las concentraciones esperadas a nivel de superficie. Con estos mapas es posible identificar además las áreas fuente emisoras de material desértico para cada episodio. Además, existen en esta página otros productos muy

interesantes como los perfiles verticales de distribución de polvo mineral en diferentes ciudades europeas; mapas de carga total de polvo y nubosidad, mapas de deposición húmeda y seca, etc. Estos últimos se pueden cotejar con los anteriores para diferenciar el alcance de la intrusión a distintas alturas y su presencia en un área acorde al tiempo (Negral, 2010).

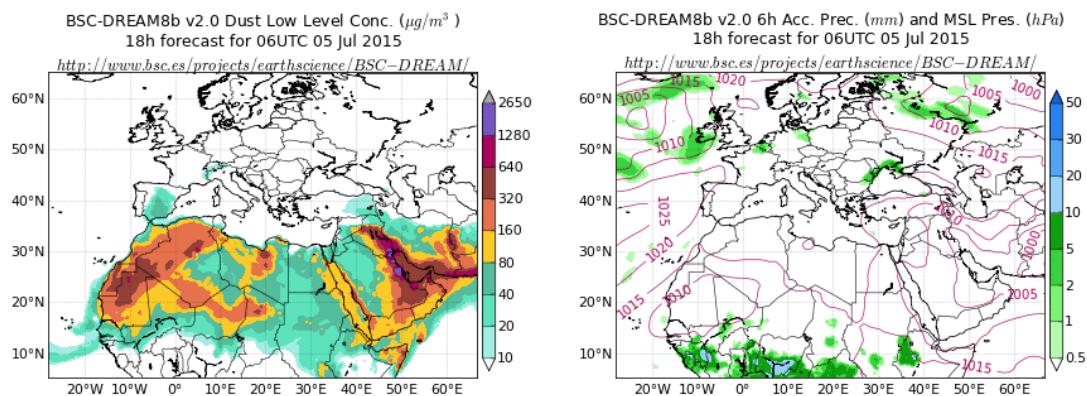


Figura 25. Mapas de aerosoles ICoD/DREAM para el 5 de julio de 2015 a las 18:00h. En la parte derecha de la imagen se muestran las isobaras a nivel de superficie, en la parte izquierda se presenta la concentración de partículas de polvo mineral a nivel de superficie ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Y, por último, también se ha utilizado **SINOBAS** que es el acrónimo de "Sistema de Notificación de OBServaciones Atmosféricas Singulares". Es un sistema implementado por AEMET para recoger y poner a disposición de los ciudadanos información sobre la ocurrencia de ciertos fenómenos meteorológicos que se han denominado singulares (Figura 26), entendiéndose por tales los que se caracterizan por ser:

- locales (no se extienden por una región amplia),
- poco frecuentes (ocurren raramente),
- de intensidad significativa y,
- con capacidad de provocar alto impacto social.

Estos fenómenos, a pesar de su intensidad, difícilmente son detectados por los medios de observación meteorológica convencionales, bien sea por la limitación de la densidad de la red de observación en tierra, bien por la resolución espacial y temporal de los medios de teledetección como satélites y radares.

La principal fuente de información es la observación visual directa, referenciada y/o documentada por cualquier ciudadano, que posteriormente es validada por AEMET, en la medida de lo posible.



Figura 26. Visor SINOBAS. Fuente: Gutiérrez et al. (2020).

### 3.4 COMPILACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos utilizados para este trabajo proceden de dos estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET): Zaragoza – Valdespartera y Zaragoza – Aeropuerto (tabla 3). Se solicitaron a AEMET los datos horarios del periodo 2014 – 2018 de ambas estaciones de los siguientes parámetros: dirección y velocidad de viento, y precipitación. Los datos recibidos reflejan los valores medios horarios y diarios, y los valores extremos registrados, como las rachas máximas de viento.

Tabla 3. Datos relativos a las estaciones de meteorología de referencia. Fuente: Gobierno de Aragón (2012)

Indicativo climatológico	Nombre	Provincia	Altitud	Latitud	Longitud
9434	Zaragoza aeropuerto	Zaragoza	249 m	413938N	010015W
9434P	Zaragoza Valdespartera	Zaragoza	254 m	413715N	005606W

Para poder determinar los periodos de viento intenso que afectaron a la ciudad de Zaragoza se seleccionó el umbral de racha máxima superior a 50 km/h. Por debajo de ese umbral se consideró que la velocidad de viento era insuficiente para provocar fenómenos de emisión de las partículas desde el suelo con capacidad para afectar grandes áreas. A partir de la ecuación 8, se calculó la racha máxima de velocidad del viento de forma mensual para cada año, como ejemplo en la tabla 4 se muestran los resultados para 2014.

$$\text{Promedio mensual } R_{M\acute{a}x_{Vel}} = \frac{\sum R_{m\acute{a}x} \text{ de velocidad en la estaci3n meteorol3gica}}{n^{\circ} \text{ de d\acute{a}as del mes}} \quad [8]$$

Tabla 4. Promedio mensual de racha máxima de velocidad del viento para el año 2014.

Meses (año 2014)	Racha máxima de velocidad $R_{M\acute{a}x_{Vel}}$
<b>Enero</b>	45,2
<b>Febrero</b>	50,0
<b>Marzo</b>	48,7
<b>Abril</b>	46,9
<b>Mayo</b>	52,2
<b>Junio</b>	50,6
<b>Julio</b>	51,7
<b>Agosto</b>	45,3
<b>Septiembre</b>	36,1
<b>Octubre</b>	35,4
<b>Noviembre</b>	36,7
<b>Diciembre</b>	53,0

Además, el otro factor que influye en la posible emisi3n de partículas desde el suelo es la humedad de éste. Por ello, era necesario evaluar el contexto climático general y la cantidad de precipitaciones acontecidas en días previos.

Por norma general, los episodios de emisi3n de partículas minerales a escala regional se producirán durante periodos mensuales en los que la precipitaci3n ha sido baja. Para ello se ha establecido un umbral de precipitaci3n mensual de 30 L/m<sup>2</sup> para discriminar entre meses secos (por debajo de este umbral) y meses húmedos (por encima), que va a ayudar a localizar temporalmente estos eventos. Por encima de los 30 L/m<sup>2</sup> se presupone que el suelo puede estar suficientemente húmedo y cohesionado como para limitar la emisi3n de partículas desde el mismo. En cambio, por debajo de 30 L/m<sup>2</sup>, sí se pueden dar con mayor facilidad condiciones 3ptimas para la emisi3n de polvo. No obstante, puede ocurrir que se produzcan fen3menos de emisi3n de polvo en meses con alta precipitaci3n, por ejemplo, asociada a uno o dos eventos tormentosos intensos. Por ello, para que la metodología fuera más precisa se ha determinado un segundo umbral. Se seleccionan aquellas situaciones en las que el valor diario de precipitaci3n supera los 5 L/m<sup>2</sup>. Se sabe que cantidades de precipitaci3n inferiores a 5 L/m<sup>2</sup> solamente humedecen los primeros milímetros más superficiales del suelo y el efecto no dura más allá de unas pocas horas. Para aquellos eventos de precipitaci3n diaria superior a 5 L/m<sup>2</sup> se consider3 que el efecto humidificador sobre el suelo se mantuvo hasta 7 días despu3 de acontecer, sabiendo que esta presuposici3n es fuertemente conservativa, especialmente durante el periodo estival. Es decir, tras un evento de precipitaci3n superior a 5 L/m<sup>2</sup>, los siguientes 7 días

no se consideraron como potenciales a efectos de producirse emisión de polvo a escala regional.

Todas estas hipótesis no serían suficientes para identificar minuciosamente los episodios. La interrelación de estos (temperatura, dirección y velocidad del viento, precipitaciones recientes y pasadas) y otros factores (como el porcentaje de cobertura vegetal del suelo según la estación del año) explicarán la fenomenología de estos episodios.

### 3.5 COMPILACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS DE AOD

Los valores de AOD son compilados por el fotómetro solar CIMEL CE318 situado en la sede de AEMET en Zaragoza. Se obtuvieron los datos del periodo enero de 2014 hasta diciembre de 2018. Los datos pueden obtenerse de la página web de AERONET, según varios niveles de validación, en este estudio, se ha utilizado el nivel 1.5, que son los datos a los que se les ha aplicado de forma automática el filtrado de nubes, pero no han pasado una calibración del equipo posterior a la toma de datos, como se ha explicado en el punto 1.2.2.2 *Características del funcionamiento* del CIMEL. Para este estudio, dado que se cuenta con el apoyo directo de AEMET, los datos de AOD fueron suministrados por Arcadio Blasco, técnico en la Delegación de AEMET en Aragón. Los datos recibidos contienen la siguiente información: valores de espesor óptico de aerosoles (nm), agua precipitable (cm), exponente de Ångström, espesor óptico de aerosoles en modo fino y grueso, y datos de geocalización (latitud, longitud, elevación, ángulo cenital solar, etc.) del fotómetro solar CIMEL.

A partir de estos datos, se han realizado promedios de los valores de AOD y exponente de Ångström para distintas longitudes de onda, que han permitido clasificar los aerosoles (tabla 5) teniendo en cuenta lo dispuesto por Dubovik *et al.* (2002); Hess *et al.* (1998); Holben *et al.* (2001); además, se han elaborado gráficas de evolución de AOD para los distintos episodios de polvo regional en resuspensión y, para distintos periodos de tiempo y, se ha podido correlacionar dichos datos con los valores de PM<sub>10</sub>, como se ha comentado en el apartado anterior.

Tabla 5. Clasificación de los aerosoles según el espesor óptico (AOD) y coeficiente de Ångström (AE). Fuente: Dubovik *et al.* (2002); Hess *et al.* (1998); Holben *et al.* (2001).

Tipo de aerosol	AOD (500 nm)	AE (500 – 870)
<b>Continental</b>	0 – 0.153	> 1.2
<b>Polvo sahariano</b>	> 0.153	0 – 1.02
<b>Mezcla</b>	> 0.153	1.02 – 1.5
<b>Contaminado</b>	0.153 – 0.38	> 1.5
<b>Marino</b>	0 – 0.153	0 – 1.2
<b>Biomasa</b>	> 0.38	> 1.5

### 3.6 CÁLCULO DEL APORTE DE POLVO SAHARIANO Y POLVO REGIONAL

El objetivo principal del trabajo se centra en el estudio del polvo mineral de origen regional. No obstante, es importante discriminar otras componentes del aerosol atmosférico que pueden presentar similitudes muy evidentes con esta fuente. Con el objetivo de cuantificar la magnitud de los episodios de polvo sahariano y polvo mineral regional se han seguido dos metodologías diferentes.

Para los episodios de polvo sahariano se ha usado la metodología disponible en el Ministerio para la Transición Ecológica (Procedimiento para la identificación de episodios naturales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>), y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM<sub>10</sub>, de Querol *et al.*, (2013). A partir de ésta, se han utilizado los datos de polvo sahariano diario estimados a partir de los datos de la estación de Monagrega (Teruel), que es la que toma el Ayuntamiento de Zaragoza como referencia (figura 27), disponibles en la web del MITECO (Gobierno de España, 2020). La metodología allí descrita presupone que la cantidad de polvo sahariano que se estima en una zona de fondo regional como Monagrega puede extrapolarse a la zona de influencia de esta estación, es decir, hasta unos 100 – 150 km a la redonda. Esta presuposición introduce algunos errores en la estimación de la cantidad de polvo sahariano a escala diaria, que se acentúan a medida que nos alejamos de la estación utilizada. Para un día bajo el efecto del polvo sahariano, se toma el valor de PM<sub>10</sub> registrado en la ciudad de Zaragoza y se le sustrae el valor de polvo sahariano registrado en la estación de fondo regional, en este caso, Monagrega. De esta forma, con los datos de la estación de referencia se cuantifica la carga neta de polvo que será la cantidad que se debe descontar para todas aquellas estaciones que se hallen en su radio de influencia (Negral, 2010).

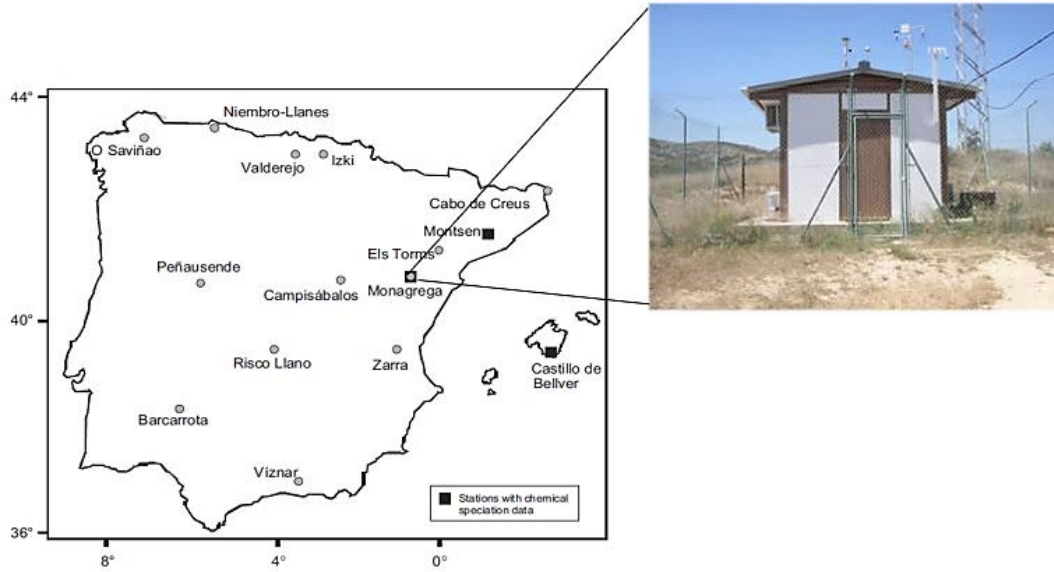


Figura 27. Estaciones regionales de fondo en España que proporcionan datos de  $PM_{10}$  y/o datos de especiación química, y vista de la estación de Monagrega. Fuente: Escudero et al. (2007)

Para cuantificar el impacto del polvo regional se ha desarrollado un método en el contexto de este trabajo que se detalla a continuación:

- 1) se identificaron todos los episodios de viento intenso (racha máxima diaria  $> 50$  km/h), y se calculó el percentil 75 (P75) de los valores de  $PM_{10}$  de dichos días;
- 2) se tomó el valor del P75 como la concentración esperable bajo situaciones de viento intenso (= limpieza de la contaminación) que resultó ser  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;
- 3) se estimó el impacto de la resuspensión de polvo en el Valle del Ebro restando al valor diario de  $PM_{10}$  el valor del P75 (en este caso,  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para aquellos días que cumplían las condiciones descritas anteriormente (viento superior a 50 km/h y al menos 7 días después de un evento con precipitación diaria superior a  $5 \text{ L}/\text{m}^2$ ).



## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ANÁLISIS EVOLUTIVO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM<sub>10</sub>

En este apartado se aborda la evolución de las partículas en suspensión, como son las inferiores a 10 micras, en la ciudad de Zaragoza entre 2014 – 2018, para dar respuesta a su posible sinergia con el AOD. Para ello, se tiene en cuenta la concentración de dichas partículas en las estaciones de medida de calidad del aire de Zaragoza mostradas en 3.2.1 *Redes de vigilancia de la contaminación atmosférica*.

Asimismo, a partir de la legislación vigente en materia de calidad del aire, se analizan los posibles episodios excepcionales de partículas que se han producido en el área de estudio, que podrían relacionarse con la presencia de polvo mineral de origen africano o de origen regional.

En la figura 28, se representa la evolución de la media mensual de material particulado, PM<sub>10</sub>, en las estaciones remotas de estudio a lo largo del periodo 2014 – 2018.

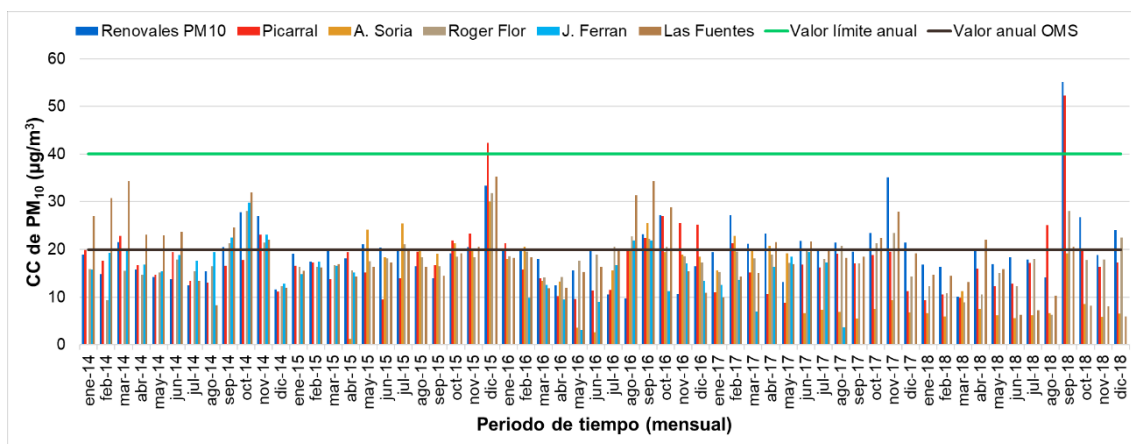


Figura 28. Evolución mensual media de la concentración de PM<sub>10</sub> en las estaciones de calidad del aire de Zaragoza entre 2014 - 2018.

Del análisis de los datos que se recogen en las tablas del Anexo 1 se determina que entre 2014 – 2018 no se superó en ninguna de las estaciones de calidad del aire el valor límite anual de 40 µg/m<sup>3</sup>. Del mismo modo, el máximo anual de superaciones del valor límite diario establecido en 50 µg/m<sup>3</sup> no fue superado en más de 35 ocasiones en ninguna de las estaciones de la red urbana. Por tanto, Zaragoza cumple con los valores europeos y nacionales en lo relativo a partículas en suspensión, aunque sobrepasa ligeramente (lo hizo en 2014 y 2015, con 21 µg/m<sup>3</sup>) el

límite anual de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la OMS como un límite realmente seguro para la población.

Las superaciones del valor límite diario debidas a causas naturales, como es el polvo de Sáhara, pueden descontarse del cómputo anual tras la debida acreditación por parte de las autoridades competentes. Durante 2014, la influencia de intrusiones de polvo sahariano sobre la ciudad de Zaragoza se observó durante 41 días, y supusieron en conjunto  $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la media anual en cada una de las estaciones de la red. Estas intrusiones son más frecuentes en los meses de primavera y verano, sin embargo, una vez que se descuenta su influencia sobre la concentración de  $\text{PM}_{10}$ , es en los meses de otoño donde se observa una mayor reducción de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  al descontarse el efecto de esta fuente natural.

Durante el año 2015 se identificaron 69 días con polvo sahariano, que aportaron  $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a la media anual de  $\text{PM}_{10}$ , fundamentalmente durante los meses de abril, agosto y diciembre.

En 2016 se identificaron 67 días con presencia de polvo sahariano sobre Zaragoza, que aportaron  $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a la media anual de  $\text{PM}_{10}$ , registrándose el evento más importante en el mes de febrero (Moreta, Montero, San Atanasio, Moreno, y Roa, 2016). El 21 y 22 de febrero tuvo lugar un episodio de intrusión de polvo sahariano (figura 29), inusual tanto por su intensidad como por la época del año en la que tuvo lugar, que repercutió a todas las regiones de la Península, y donde todas las estaciones de calidad del aire de Zaragoza detectaron valores de concentración de  $\text{PM}_{10}$  superiores a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se detalla con más profundidad en el apartado de los resultados.

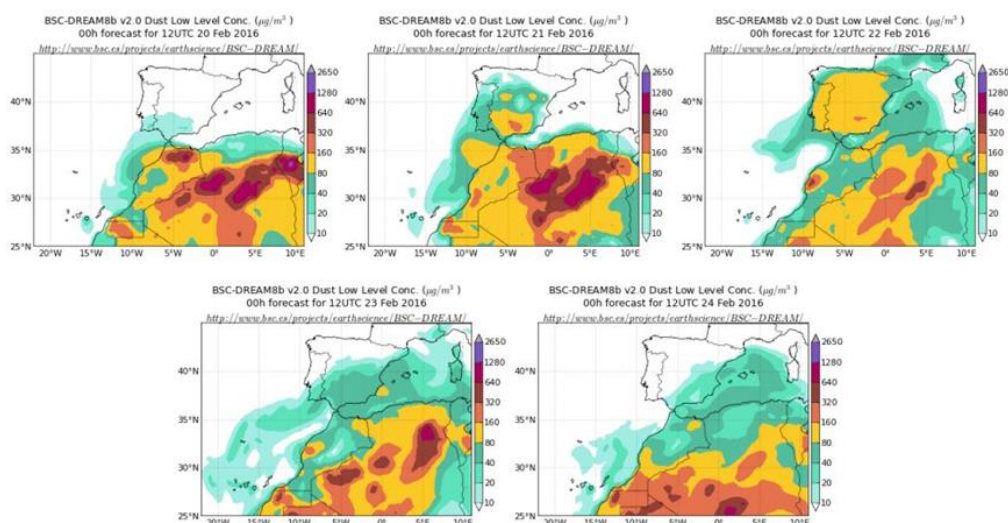


Figura 29. Concentración de polvo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) predicha por el modelo BSC/DREAM el periodo 20 - 24 de febrero de 2016 a las 12 UTC. Fuente: BSC (2020).

Durante el año 2017 hubo 71 días con masas de aire procedentes del norte de África sobre la zona Noreste de la península, que aportaron  $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a la media anual de  $\text{PM}_{10}$ , registrándose la más importante en el mes de febrero.

Analizando los datos, se puede determinar que 2018 fue el año con los niveles de concentración de partículas más bajos de la serie histórica en la ciudad de Zaragoza,  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y aunque el número de días con polvo sahariano fue comparable al de años anteriores (71) que en conjunto aportaron  $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a la media anual de  $\text{PM}_{10}$ , siendo abril y julio los meses con mayor número de días afectados por esta fuente natural. En conjunto, la calidad del aire fue considerablemente mejor que en años precedentes y, con gran probabilidad, la elevada pluviometría de 2018 jugó un papel decisivo en este sentido.

Una vez evaluado el grado de cumplimiento de la legislación vigente en materia de calidad del aire, los resultados muestran que el comportamiento de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  está influenciado, en parte por la intrusión de polvo sahariano que es muy evidente durante episodios concretos. Sin embargo, es el conjunto de otras fuentes ordinarias, principalmente antropogénicas, como el tráfico de vehículos en la ciudad y sus circunvalaciones, las emisiones industriales en el entorno de Zaragoza, las emisiones agrícolas y ganaderas (uso de suelo en tierras de labranza, quemas agrícolas), y la contaminación que se encuentra a escala regional, las que contribuyen al 90% de las concentraciones de partículas en suspensión en la fracción de  $\text{PM}_{10}$ . De entre todas estas fuentes, el objeto de estudio en este trabajo es el polvo mineral de origen regional, asociado en muchas ocasiones al uso del suelo en zonas agrícolas, que se emite desde la superficie en determinadas ocasiones bajo condiciones meteorológicas particulares, como ya se ha mencionado.

## 4.2 ANÁLISIS METEOROLÓGICO

En este apartado se describe brevemente la meteorología ocurrida durante el periodo de estudio, desde 2014 hasta 2018, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para la emisión de aerosol mineral a escala regional. Para ello, se tiene en cuenta la dirección y velocidad del viento, la temperatura y la precipitación.

En la tabla 6, se recogen los datos de temperatura media anual (T) en  $^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima media anual (TM) en  $^{\circ}\text{C}$ , temperatura mínima media anual (Tm) en  $^{\circ}\text{C}$ , precipitación total acumulada (PP) en  $\text{L}/\text{m}^2$ , total de días con lluvia durante el año (DL) y, la velocidad media anual de viento (Vv) en  $\text{km}/\text{h}$ .

Tabla 6. Resumen meteorológico de la ciudad de Zaragoza entre 2014 y 2018, datos medios entre la estación de Zaragoza - Aeropuerto y Zaragoza - Valdespartera. Fuente: AEMET.

Año	T (°C)	TM (°C)	Tm (°C)	PP (L/m <sup>2</sup> )	DL (día)	Vv (km/h)
<b>2014</b>	15,8	22,6	10,8	302	117	16,4
<b>2015</b>	15,4	22,2	10,3	301	98	16,6
<b>2016</b>	15,5	21,9	10,6	370	115	16,8
<b>2017</b>	16,2	22,7	10,6	244	107	17,7
<b>2018</b>	15,8	21,8	10,8	516	141	16,7

Según los informes climáticos disponibles en la página web de AEMET, el año 2014 en el entorno de Zaragoza fue extremadamente cálido, especialmente los meses de abril, junio y octubre. Con relación a las precipitaciones acumuladas, 2014 fue un año normal, aunque la distribución de las lluvias a lo largo del año fue muy irregular, con meses muy secos (mayo y octubre) y otros muy húmedos (noviembre y agosto).

El 2015, también fue catalogado de extremadamente cálido, con un temperatura media anual parecida al año precedente. El comienzo del año fue ligeramente más frío de lo normal, mientras que la primavera resultó, en cambio, muy cálida. De igual forma, 2015 fue un año muy seco en España, solo se registraron precipitaciones durante la última parte del mes de marzo hasta mitad de mayo, y el trimestre veraniego, asociadas principalmente a tormentas puntuales y, ocasionalmente, intensas.

A la vista de los datos meteorológicos el 2016, fue un año entre cálido y muy cálido y, en cuanto a las características hidrológicas, fue un año muy húmedo, con un elevado número de episodios de precipitación en Zaragoza, a excepción de los meses de verano, como se observa en las figuras 30 y 31.

El año 2017, fue aquel con una mayor temperatura media, 16,2 °C, considerándolo un año extremadamente cálido. En cuanto a sus características pluviométricas se refiere, fue un año muy seco en el conjunto de España.

Por último, el 2018, sigue un modelo térmico parecido al 2014, con una temperatura media de 15,8 °C, extremadamente cálido. Sin embargo, las características pluviométricas son excepcionales en comparación con los otros cuatro años de estudio, siendo un año extremadamente húmedo.

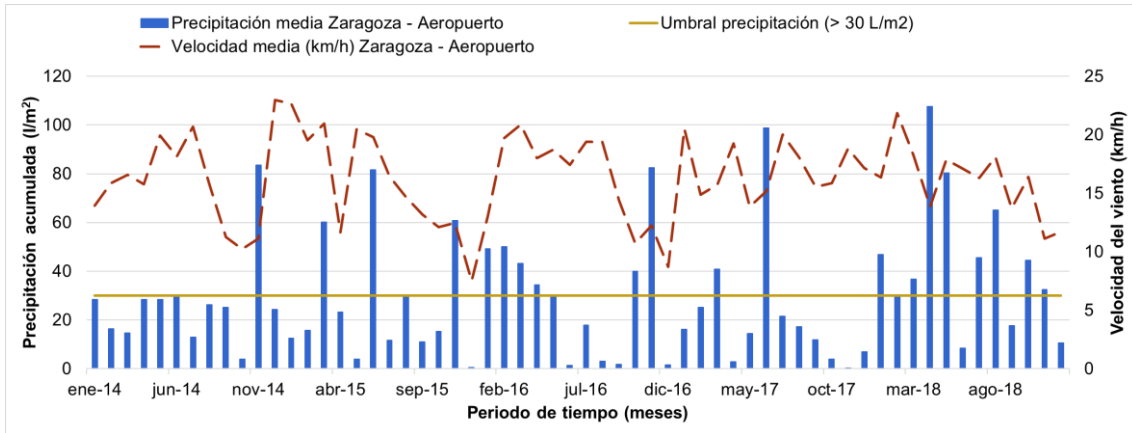


Figura 30. Precipitación media acumulada ( $L/m^2$ ), velocidad media del viento ( $km/h$ ) para la estación de Zaragoza - Aeropuerto, entre 2014 y 2018.

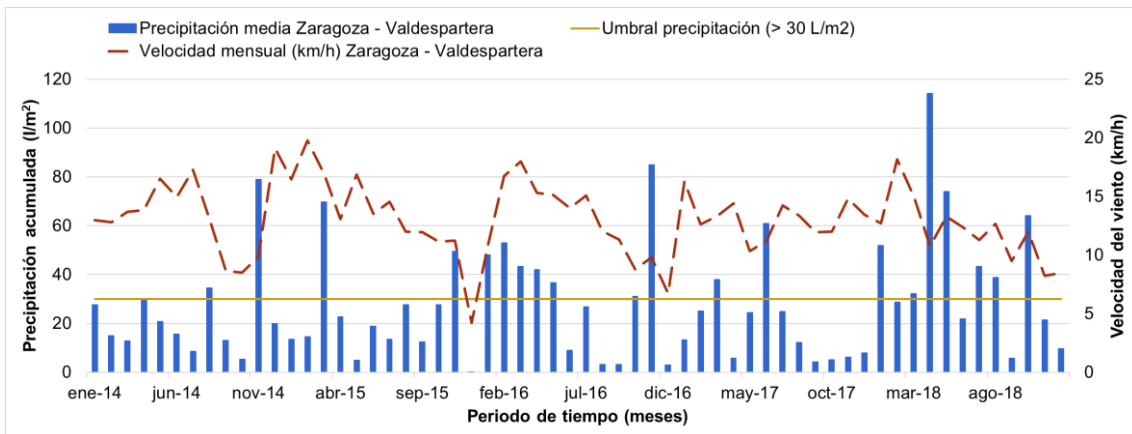


Figura 31. Precipitación media acumulada ( $L/m^2$ ), velocidad media del viento ( $km/h$ ) para la estación Zaragoza - Valdespartera, entre 2014 y 2018.

En la figura 32 se muestra el comportamiento de los vientos respecto a la velocidad y dirección de estos. Durante todo el periodo de estudio, fue W – NW, es decir, cierzo. Casi todos los meses del año hubo episodios de viento con rachas superiores a los 50 – 55 km/h.

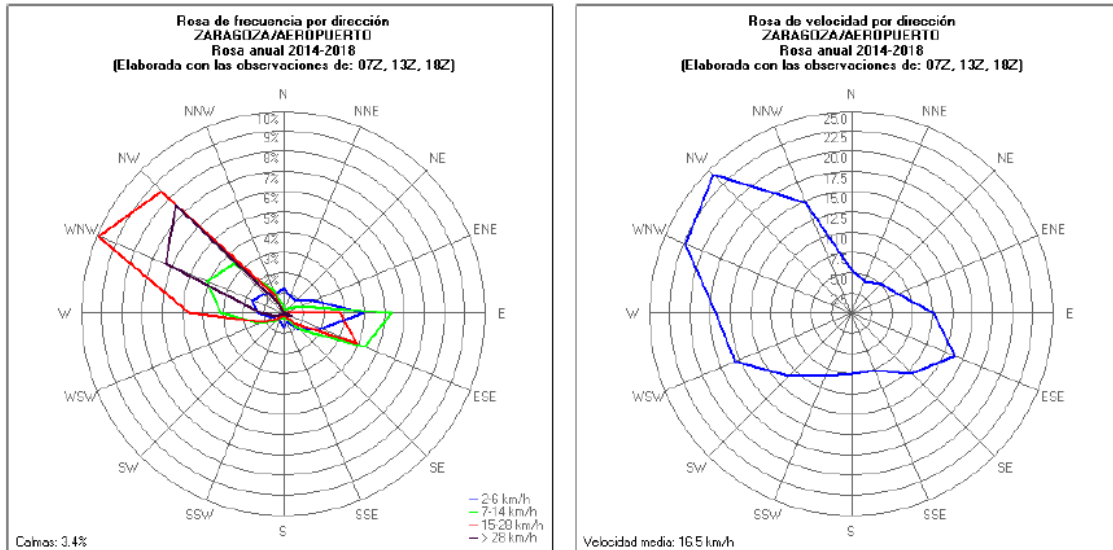


Figura 32. Rosa de los vientos de la ciudad de Zaragoza (datos de Zaragoza – Aeropuerto) para 2014 – 2018. Fuente: AEMET (2020a)

Como se ha indicado en 3.4 *Compilación e interpretación de datos meteorológicos*, es importante conocer la estacionalidad y envergadura de las precipitaciones ya que, en periodos relativamente lluviosos la probabilidad de emisión de partículas mineral es baja. En la tabla 7, se recogen los valores de precipitación acumulada mensual para cada año de estudio y la precipitación acumulada anual en L/m<sup>2</sup>.

Tabla 7. Precipitación mensual y anual acumulada, entre 2014 - 2018, para las estaciones de Zaragoza - Aeropuerto y Zaragoza - Valdespartera.

Precipitación acumulada mensual [L/m <sup>2</sup> ] para cada año de estudio					
Meses/Año	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Estación Zaragoza – Aeropuerto</b>					
<b>Enero</b>	28,4	12,5	49,3	16,3	46,9
<b>Febrero</b>	16,5	15,8	50,1	25,2	30
<b>Marzo</b>	14,8	60,1	43,3	40,8	36,7
<b>Abril</b>	28,4	23,2	34,4	3,0	107,5
<b>Mayo</b>	28,4	4,0	29,4	14,4	80,4
<b>Junio</b>	29,6	81,6	1,5	98,9	8,5
<b>Julio</b>	12,9	11,7	18,0	21,6	45,6
<b>Agosto</b>	26,3	29,9	3,1	17,3	65,2
<b>Septiembre</b>	25,3	11,0	1,9	12,0	17,7
<b>Octubre</b>	3,9	15,4	40,1	3,9	44,5
<b>Noviembre</b>	83,6	60,8	82,4	0,4	32,6
<b>Diciembre</b>	24,4	0,6	1,7	6,9	10,7
<b>Precipitación total anual [L/m<sup>2</sup>]</b>	322,5	326,6	355,2	260,7	526,30
<b>Estación Zaragoza – Valdespartera</b>					

<b>Enero</b>	27,6	13,4	48,0	13,2	51,8
<b>Febrero</b>	15,0	14,6	53,0	25,0	28,6
<b>Marzo</b>	12,8	69,6	43,2	38,0	32,2
<b>Abril</b>	29,6	22,8	42,0	5,8	114,2
<b>Mayo</b>	20,8	4,8	36,6	24,4	74,0
<b>Junio</b>	15,6	18,8	9,0	61,0	21,8
<b>Julio</b>	8,6	13,4	26,8	24,8	43,2
<b>Agosto</b>	34,6	27,6	3,2	12,2	38,8
<b>Septiembre</b>	13,0	12,4	3,2	4,2	5,8
<b>Octubre</b>	5,4	27,6	31,0	5,0	64,2
<b>Noviembre</b>	79,0	49,6	85,0	6,2	21,4
<b>Diciembre</b>	20,0	0,2	3,0	7,8	9,6
<b>Precipitación total anual [L/m<sup>2</sup>]</b>	282,00	274,8	384,0	227,6	505,60

Con el objeto de dar respuesta a la hipótesis formulada, se elaboran las figuras 30 y 31, que se han mostrado antes, donde se representa la precipitación acumulada, en L/m<sup>2</sup>, y la velocidad media del viento, en km/h, de forma mensual entre 2014 y 2018, para cada estación de medida, Aeropuerto y Valdespartera. Cuando el suelo se encuentra seco y, sopla viento fuerte, pueden levantarse grandes cantidades de partículas que dan lugar a la suspensión de polvo mineral. Esta emisión de partículas a la atmósfera tiene lugar debido, tal y como indica Gomes, Bergametti, Coudé-Gaussen, y Rognon (1990), a la acción conjunta de dos procesos, la saltación de las partículas del medio en el que se encontraban en reposo y, su posterior suspensión y fragmentación tras el impacto entre sí.

Se puede apreciar que la mayor parte del periodo de estudio presenta más meses enmarcados dentro del periodo seco que húmedo (tabla 8), a excepción de 2018, en el que 9 meses fueron claramente húmedos. Es decir, si se cumplen las hipótesis planteadas 2018 apenas registraría episodios de emisión de polvo.

Tabla 8. Número de meses que supera o no el umbral (> 30 mm), para su catalogación como periodo húmedo o seco, en las estaciones de Zaragoza - Aeropuerto y Zaragoza - Valdespartera.

Año	Nº meses que se supera o no el umbral (30 L/m <sup>2</sup> ) en la estación Zaragoza – Aeropuerto		Nº meses que se supera o no el umbral (30 L/m <sup>2</sup> ) en la estación Zaragoza – Valdespartera	
	Periodo húmedo	Periodo seco	Periodo húmedo	Periodo seco
<b>2014</b>	2	10	3	9
<b>2015</b>	4	8	2	10
<b>2016</b>	7	5	7	5
<b>2017</b>	2	10	2	10
<b>2018</b>	9	3	8	4

### 4.3 IDENTIFICACIÓN DE EPISODIOS DE POLVO MINERAL REGIONAL

Como consecuencia del análisis del conjunto de datos 2014 – 2018 de  $PM_{10}$ , valores fotométricos del CIMEL CE318 y, los datos meteorológicos (viento y precipitación), se ha obtenido un inventario de episodios de polvo mineral que se encuentra recogido en el Anexo 2. En él se encuentran especificados los episodios de emisión de polvo mineral regional, siendo un total de 24. El inventario consta de los días de inicio y fin del episodio, los valores medios de AOD para una longitud de onda de 500 nm, del parámetro alfa entre 500 – 870 nm, y de  $PM_{10}$  para tres estaciones de medida (Renovales, Roger de Flor y J. Ferrán), además de la caracterización del aerosol y, el promedio de la racha máxima de viento durante el episodio.

En la tabla 9, se presenta, de forma sintética, la información por años y teniendo en cuenta todo el conjunto de datos, sobre los episodios identificados. Aquí se incluyen el número de episodios y días que componen cada uno, y el promedio de los valores de AOD y parámetro alfa. Además, se indican el número de episodios que superan los 4 días, es decir, episodios considerados de larga duración que afectan a la ciudad de Zaragoza de manera continua durante 4 o más días, en contraposición a los eventos más esporádicos.

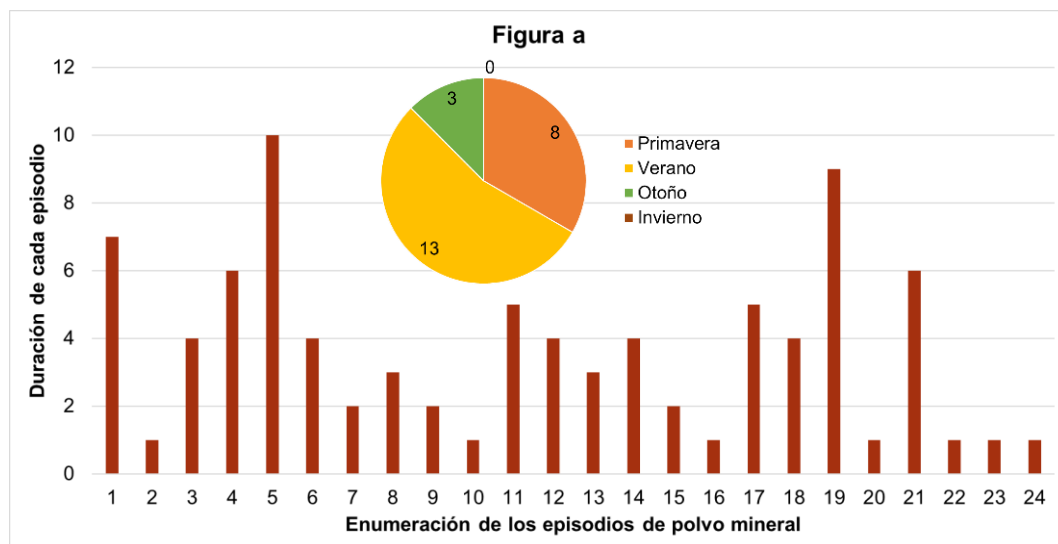
Pese a las similitudes en el número de episodios que se producen al año de este fenómeno, el número de días y su magnitud difieren. Por ejemplo, 2014 y 2018 presentan el mismo número de episodios, sin embargo, el número de días en los que tuvieron lugar es considerablemente desigual, 19 días en el caso de 2014 frente a los 8 días en 2018. Por otra parte, la intensidad de dichos eventos (representados por los valores de AOD y  $\alpha$ ) son similares entre unos años y otros, a excepción de 2016, con un AOD aproximado de 0,15 y un valor de  $\alpha$  de 1,3. Respecto al año 2016, esta diferencia puede estar influenciada por el hecho de que, en 2 de los 8 episodios, no se encuentran las medidas realizadas por el fotómetro solar, que quizás se vieron interrumpidas por la presencia de nubes, por lo que no se contabilizó ningún parámetro.



Tabla 9. Resumen del número de episodios y días de polvo mineral de origen regional en el periodo comprendido entre 2014 - 2018, y el promedio anual de AOD y  $\alpha$ .

	2014	2015	2016	2017	2018	Total
<b>Nº episodios</b>	4	3	8	6	4	24
<b>Nº días</b>	19	21	23	23	8	94
<b>Nº episodios &gt; 4 días</b>	3	2	3	3	1	12
<b>Promedio AOD_500</b>	0,153	0,148	0,365	0,148	0,166	0,196
<b>Promedio alfa 500 – 870</b>	1,372	1,289	0,771	1,170	1,584	1,237

El análisis del número de episodios para cada mes del año (figura 33) deja claro el máximo del verano, con 13 episodios en total, siendo el mes de agosto aquel que registra mayor número. Se observa una tendencia de los episodios a disminuir hacia el otoño, siendo nulos durante el invierno. En cuanto a los episodios largos, de más de 4 días, se concentran sobre todo en los meses de verano, con un total de 6 de los 12 episodios. Aunque el episodio más prolongado, episodio 5, del 14 al 23 de mayo de 2015, con una duración de 10 días, se registró en primavera. Y, siguiendo la misma tendencia, los episodios más eventuales, se registran sobre todo en los meses de julio y agosto.



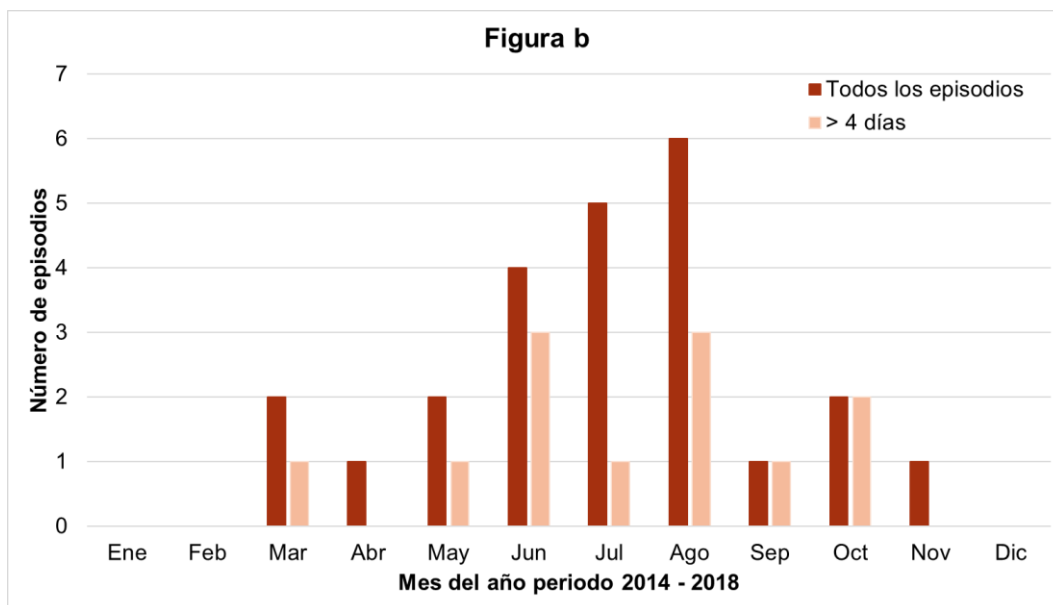


Figura 33. (a) Duración, en días, de cada uno de los eventos de polvo mineral. (b) Distribución mensual del número de episodios en el periodo de estudio 2014 – 2018.

#### 4.3.1 Casos de estudio

Con la finalidad de realizar un análisis más detallado de los casos de polvo mineral emitido en el Valle del Ebro, se han seleccionado 3 casos de los contenidos en el Anexo 2. Se trata de eventos excepcionales y con diferentes características entre sí, que explican la posible evolución de este evento. En este caso, se han analizado 3 episodios que tienen lugar entre junio – agosto, dos de ellos en agosto y otro en junio. El primer episodio, de agosto de 2014 englobado dentro de episodios de larga duración, de más de 4 días y, el segundo y tercero, de 2018 y 2015, respectivamente.

##### 4.3.1.1 Episodio 3, del 15 al 18 de agosto de 2014

A mediados del mes de agosto de 2014 se produjo un evento de emisión de polvo mineral en el Valle del Ebro, donde la concentración de  $PM_{10}$  se encontraba en torno a los  $18 \mu g/m^3$ , con oscilaciones a lo largo del periodo y, con una racha máxima media de viento de  $54,5 \text{ km/h}$ , siendo el día 18 aquel que registra el mayor valor con  $87 \text{ km/h}$ . Es decir, las propiedades son óptimas para detectar polvo, ya que se tiene un periodo de viento intenso y ausencia de precipitaciones previas. Si se observa la evolución del AOD a lo largo del periodo, figura 34, al principio, los datos toman valores alrededor de  $0,07 - 0,1$ , sin embargo, al final de éste se llega a  $0,2 - 0,3$ . Según los rangos que aparecen en la tabla 5 para los valores del exponente de Ångström en relación al tipo de aerosol, los correspondientes a este episodios (entre 1,4 y 1,6 estarían dentro del tipo continental o mezcla, cuando las medidas de AOD

están en torno a 0,3. Estos resultados parecen indicar que el viento intenso del día 18 da lugar a la emisión de partículas minerales desde el Valle del Ebro que alcanza una entidad espacial suficiente como para ser detectadas por el fotómetro solar CIMEL.

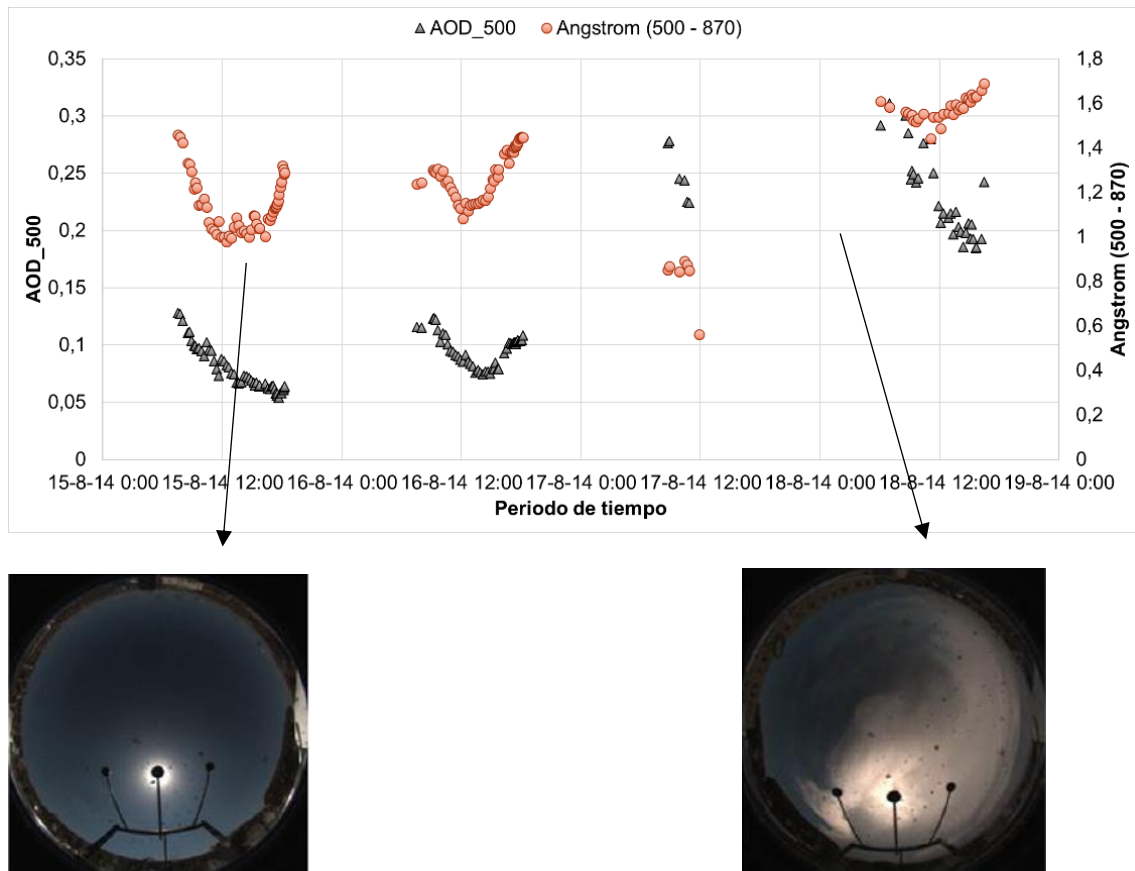


Figura 34. Evolución del AOD a  $\lambda = 500 \text{ nm}$  y del exponente de Ångström (500 - 870), junto con dos imágenes de muestra de la cámara Full Sky muestran cielo despejado y nubes cirrus, respectivamente. Fuente: Sánchez-Romero, González, Calbó, Sanchez-Lorenzo, y Michalsky (2016).

Cuando se representan en conjunto los valores (figura 35) de velocidad media del viento a escala horaria junto con los valores de AOD y las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  se observa que, cuando el viento es moderado, los valores de partículas y AOD se mantienen en consonancia y relativamente bajos. Al final del día 17 y primeras horas del día 18 se observa un periodo de calma en el viento que ocasiona un ascenso en la concentración de  $\text{PM}_{10}$  que sin embargo no regresa a valores tan bajos como en días previos pese a que el viento volvió a soplar con cierta intensidad. Puede inferirse, por tanto, que el viento del día 18 de agosto de 2014 originó la emisión de partículas minerales a escala regional. Este tipo de situaciones son las más frecuentes: tras un periodo inicial de “limpieza de la atmósfera”, el viento acaba provocando un fenómeno de contaminación de ésta a escala regional.

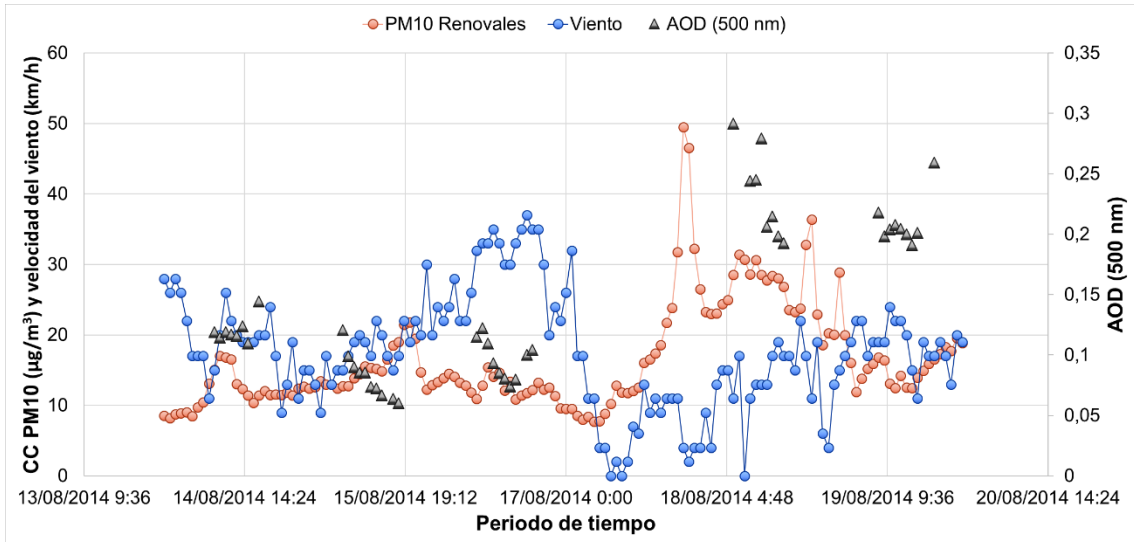


Figura 35. Evolución del material particulado en la estación de Renovales,  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la velocidad del viento ( $\text{km}/\text{h}$ ) y el AOD (500 nm) del 14 al 19 de agosto de 2014.

#### 4.3.1.2 Episodio 24, 12 de agosto de 2018

Este evento de aerosol mineral regional posee una particularidad que ha permitido destacarlo como caso de estudio. Este episodio tiene un nexo con una tormenta muy fuerte que se produjo el día 12 de agosto a las 16:40 h, de duración aproximada de 10 minutos, y que a su paso por Zaragoza vino acompañada de un posible frente (figura 36) que dejó rachas de viento de hasta 109 km/h en la estación de AEMET en Valdespartera.

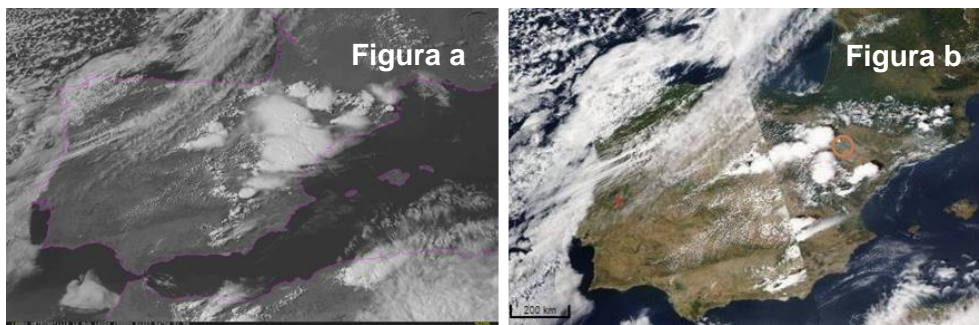


Figura 36. (a) Imagen satélite HRVIS 15:00 h UTC del 12 de agosto de 2018. Fuente: SINOBAS (b) Imagen satélite del sensor MODIS - Aqua del 12 de agosto de 2018. Fuente: NASA (2020).

Es decir, se produjo un episodio de emisión de polvo mineral en condiciones de viento intenso y precipitación abundante posterior, en un periodo de tiempo breve, esto se puede apreciar gráficamente en la figura 37, donde se observa que a lo largo del día 12 la evolución de la concentración de  $PM_{10}$  y la velocidad del viento se mantienen constantes. A las 17:00h, momento que coincide con la ocurrencia de la tormenta y la

racha máxima de viento, se produce un súbito ascenso de la concentración de  $PM_{10}$  de los  $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta los  $191 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación de calidad del aire El Picarral, y de los valores de AOD que asciende hasta 0,15. La concentración de  $PM_{10}$  se mantiene elevada durante, aproximadamente, las tres siguientes horas, hasta que tras el cese de la tormenta y la racha de viento vuelve a unos valores aceptables por el RD 102/2011. En cuanto al AOD, el CIMEL deja de tomar medidas a las 18:18 h siendo el último dato registrado del día.

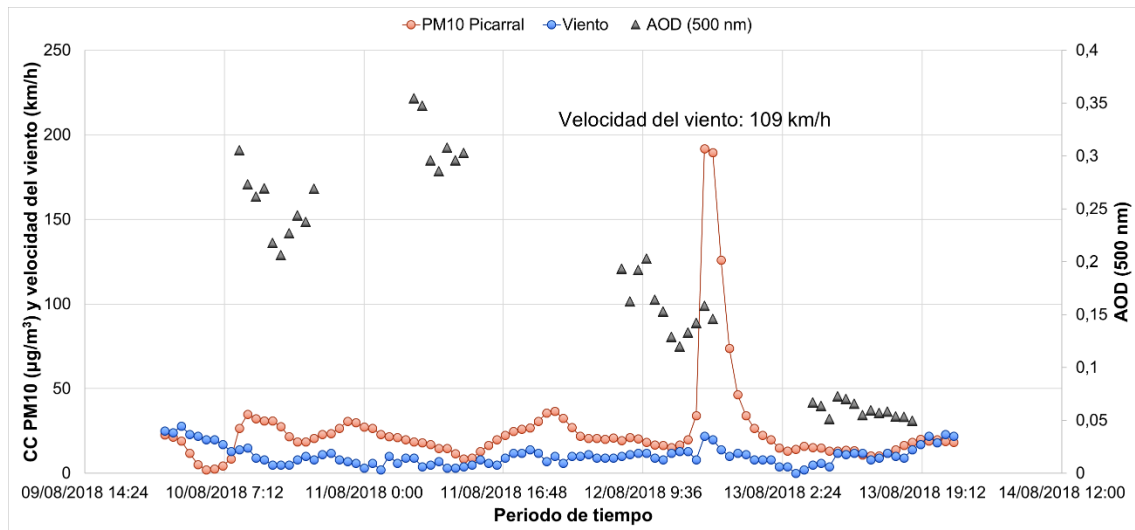


Figura 37. Evolución del material particulado en la estación de El Picarral,  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la velocidad del viento ( $\text{km}/\text{h}$ ) y el AOD (500 nm) del 10 al 13 de agosto de 2018.

Este episodio afectó a prácticamente toda la ciudad de Zaragoza, aunque las zonas más afectadas fueron la margen izquierda del Ebro, debido a que el viento tenía una componente direccional suroeste a noreste. Se trata de un episodio de emisión de polvo muy localizado en el tiempo y circunscrito al área geográfica afectada por la tormenta. Dentro de los episodios descritos en el Anexo 2, el episodio 10, que tuvo lugar el 28 de mayo de 2016, presenta las mismas características que el que se ha descrito, sin embargo, no se puede observar la evolución de éste debido a que no existen datos de AOD para este periodo. Cabe destacar que ambos episodios, 24 y 10, se encuentran recogidos en SINOBAS, no obstante, catalogan el episodio como la entrada de un frente de racha, sin tener en cuenta la emisión de polvo. En el caso del episodio 10, la velocidad del viento alcanza los 97 y 80  $\text{km}/\text{h}$  en la estación de AEMET de Valdespartera y en el Aeropuerto, respectivamente. Ambos episodios presentan como resultado la emisión de aerosol mineral regional a la atmósfera en un periodo rápido, pero sí evidente, porque trae consigo consecuencias como la reducción de visibilidad en determinadas zonas (figura 38).



Figura 38. Reducción de la visibilidad por la resuspensión de polvo mineral a las 18:15h el 28 de mayo de 2016. Fuente: AEMET (2020).

#### 4.3.1.3 Episodio 6, del 6 al 9 de junio de 2015

Este episodio de aerosol mineral desarrollado durante los días 6 al 9 de junio de 2015 se ha escogido ya que es un episodio con una duración de 4 días, es decir, catalogado como persistente. Además, las condiciones del medio eran óptimas para la emisión de polvo regional debido a que no se registraban precipitaciones significativas desde el mes de febrero. Durante todo el evento, el AOD, en la longitud de onda de 500 nm, mantiene unos valores en torno a 0.2 al comienzo del periodo, oscilando hasta 0.1, por tanto, es elevado durante los 4 días, al igual que los valores del exponente de Ångström, entre 0,8 y 1,4, en general. Sin embargo, tal y como muestra la figura 39, no existe una serie de datos completa de AOD y  $\alpha$  para dicho periodo, es decir, que el fotómetro deja de realizar medidas, teniendo así solamente una medida durante el día 9. No obstante la evolución temporal indica una situación de cierta “turbiedad” durante estos días de junio.

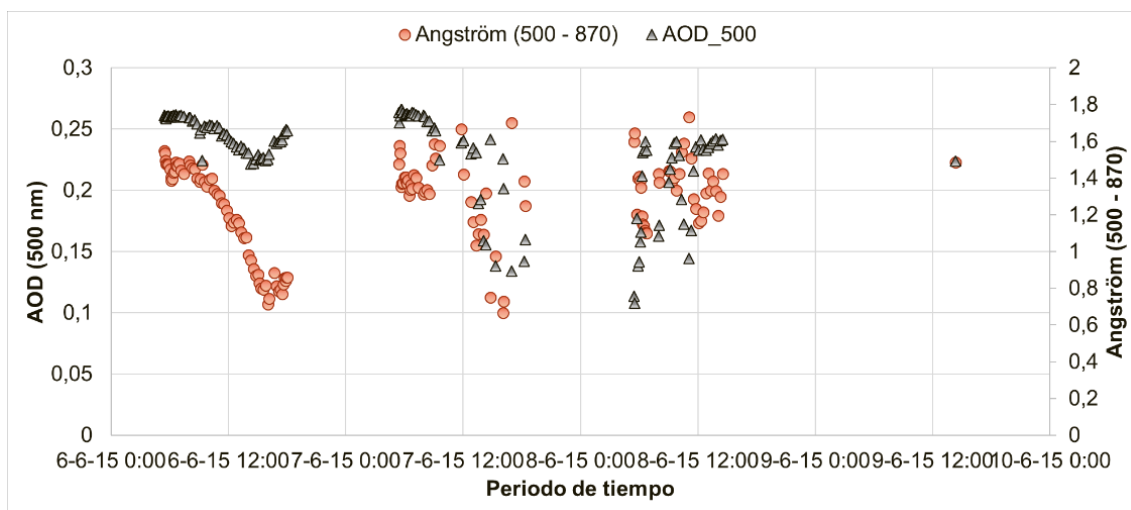


Figura 39. Evolución del AOD a  $\lambda = 500 \text{ nm}$  y del exponente de Ångström (500 - 870) durante el episodio 6.

A lo largo del evento la velocidad del viento se encuentra por encima de los 50 km/h, manteniéndose una concentración de PM<sub>10</sub> y AOD elevada, superando incluso una vez el límite de concentración diaria impuesto por el RD102/2011 y, en la mayor parte del episodio el recomendado por la OMS, como puede observarse en la figura 40. Se observa que las concentraciones de partículas y la velocidad media del viento varían en paralelo en muchas ocasiones y, por tanto, inferir en que este episodio favoreció la emisión de polvo mineral a escala regional.

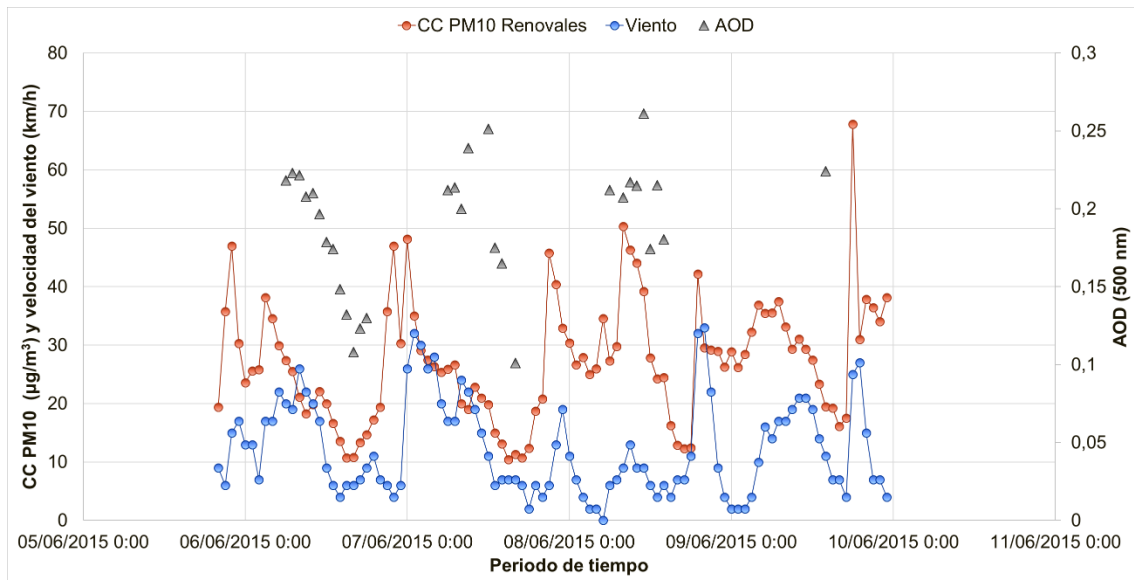


Figura 40. Evolución del material particulado en la estación de Renovalles, PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>), la velocidad del viento (km/h) y el AOD (500 nm) del 6 al 9 de junio de 2015.

#### 4.3.2 Otros episodios de partículas en suspensión

En el análisis de los distintos parámetros de estudio, como son la concentración de partículas de tamaño inferior a 10 micras, o la meteorología singular (periodo de cierzo y ausencia/presencia de precipitaciones), se han encontrado otros fenómenos más usuales con relación a la presencia de aerosoles en la atmósfera, como pueden ser episodios de contaminación local en la ciudad de Zaragoza asociado principalmente a la actividad antropogénica, o la intrusión de masas de aire africano, que aparecen de forma detallada en la tabla del Anexo 3. En la mayor parte del periodo de estudio, los eventos que se producen con mayor frecuencia son los episodios de polvo sahariano (figura 41), estos datos han sido obtenidos de los informes de históricos de episodios naturales que elabora el Gobierno de España. Seguidos de los episodios de combustión de biomasa/incendios, que engloban tanto la ocurrencia de incendios forestales, quemadas intencionadas o periodos de quemadas controladas o prescritas. En el caso de los incendios, los episodios se podrían obtener

del mismo histórico que los de polvo sahariano dispuesto por el Gobierno de España. Sin embargo, como dentro de esos episodios no sólo aparecen los que se han producido en Aragón, sino también en toda la parte noreste de la Península Ibérica, se ha optado por buscar una alternativa a esta identificación, por ser menos representativa de la zona de estudio. Por lo que los episodios que aparecen en el Anexo 3 se han extraído de los informes anuales de incendios forestales del Gobierno de Aragón (2020) y, dentro de los incendios que se recogen en dichos documentos, sólo se han tenido en cuenta los incendios ocurridos en la provincia de Zaragoza en las que se han visto afectadas más de 10 ha de superficie, ya que son aquellos que tienen mayor repercusión sobre la posible variación de la concentración de PM<sub>10</sub> y AOD de la zona de estudio. En cuanto a los casos de contaminación urbana, la mayor parte de ellos tienen cierta sinergia con la entrada de aerosol desértico, es decir, la contaminación de fondo de la ciudad de Zaragoza se ve afectada por estos eventos. A continuación, se detallan algunos de estos episodios.

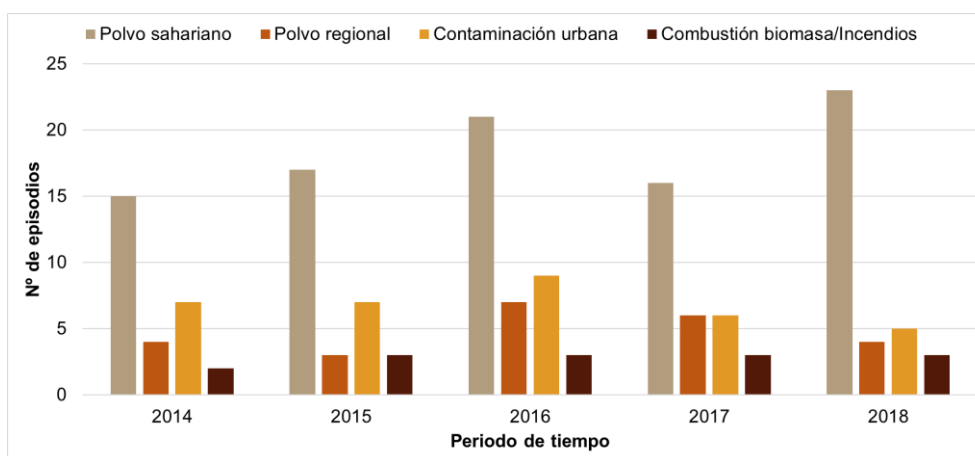


Figura 41. Número de episodios de cada fenómeno atmosférico que se ha producido en la ciudad de Zaragoza entre 2014 - 2018.

#### 4.3.2.1 Episodio de intrusión de polvo sahariano

En el mes de febrero de 2016 se produjo un episodio severo de transporte de aerosol desértico, entre el 21 y el 23 de febrero, aunque la intrusión de polvo se notificó el día 22. Estas intrusiones de aire sahariano se deben a procesos de advección desde el norte de África (Querol *et al.*, 2003), en las áreas del noreste, donde situamos Aragón. La mayor parte de estos episodios, de duración más prolongada, tienen lugar en verano, aunque otros eventos, más cortos e intensos, pueden ocurrir a lo largo del año, en otoño y principios de primavera. La duración de estos eventos en el norte de España suele ser <4 días cada uno (Querol *et al.*, 2004).



En la figura 42 queda representada la situación atmosférica de la mencionada intrusión de aerosol desértico en la Península Ibérica.

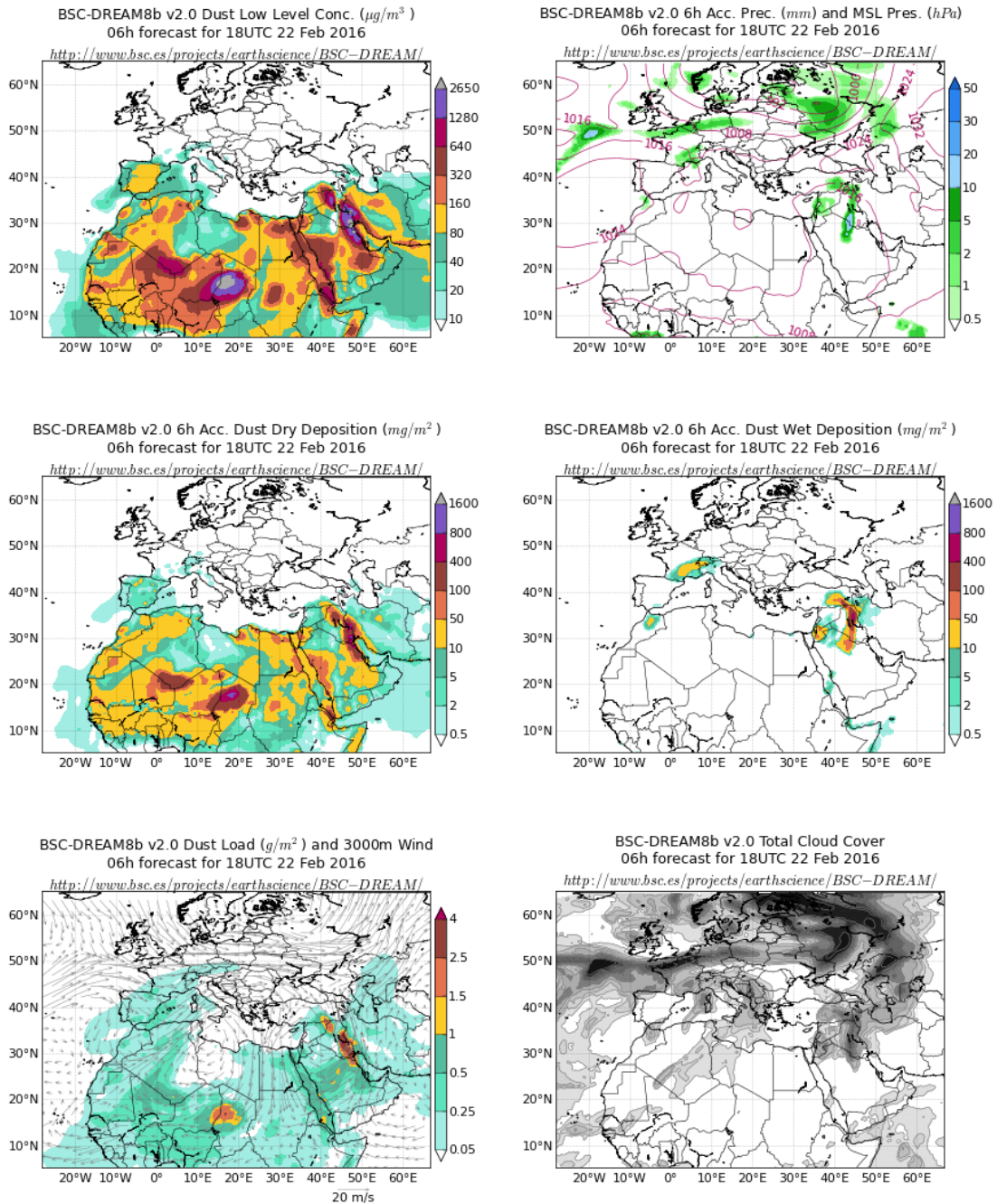


Figura 42. Evento de intrusión de aerosol desértico, el 22 de febrero de 2016: a la izquierda, de arriba abajo, concentración de polvo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), deposición seca ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ), carga de polvo ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), y sentido del viento a 3000 m; a la derecha, de arriba abajo, precipitación acumulada (mm) y presiones atmosféricas (hPa), deposición húmeda ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) y cubierta de nubes. Fuente: BSC (2020).

Siguiendo el ejemplo de Herrero (2019), para realizar una primera caracterización del tipo de episodio registrado, se ha elaborado un gráfico de

dispersión para los datos de AOD a diferentes longitudes de onda junto al AE a lo largo del evento (figura 43).

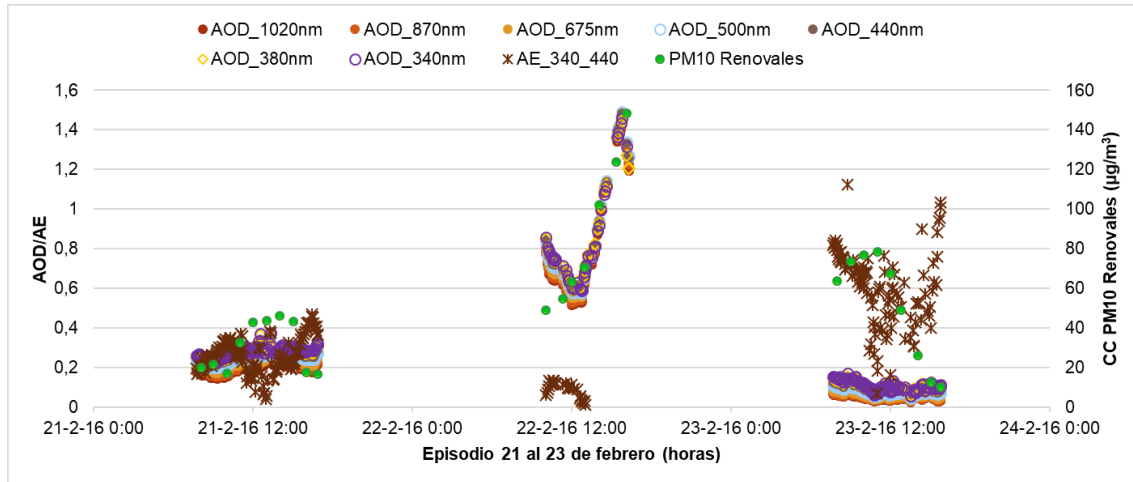


Figura 43. Episodio de polvo sahariano: datos AOD y AE en función de la hora a la que son registrados los valores para el nivel 1.5 y, evolución de la concentración de PM<sub>10</sub> en la estación de Renovales.

Para identificar el evento de polvo sahariano se ha utilizado los valores estipulados por Toledano Olmeda (2005) y Schuster, Dubovik, y Holben (2006), en los que el AOD a 440 nm presenta valores  $> 0.153$  y, el exponente de Ångström oscila entre 0 y 1.02. Normalmente, cuando se produce la entrada de una masa de aire con aerosol desértico se produce una subida del AOD similar en todas las longitudes de onda. Esta subida del AOD viene acompañada por un descenso del parámetro alfa, desde los valores promedio en torno a 1 hasta valores por debajo de 0.5 una vez que el episodio ha entrado completamente. Sin embargo, no existe un patrón determinado para la caracterización de este tipo de eventos (Toledano Olmeda, 2005). Según este criterio, se observa que el día 22 de febrero, en torno a las 10:03 h, se produce una intrusión de polvo sahariano, que se prolonga durante todo el día, pero que va disminuyendo de intensidad al entrar el día 23, pasando de unos valores de AOD (500 nm) en torno a 0,8 – 1, hasta 0,1 el 23 a las 7:40 h, reduciendo sus valores paulatinamente hasta 0,07 al final del periodo. No obstante, aunque en la figura 43 los valores de concentración de PM<sub>10</sub> sólo llegan hasta aproximadamente 150 µg/m<sup>3</sup>, en la realidad, se registraron durante el día 22 en las estaciones de calidad del aire, en torno a las 21h, valores entre 215 a 303 µg/m<sup>3</sup>, siendo Renovales aquella con mayor concentración.

#### 4.3.2.2 Episodios de combustión de biomasa (incendio): emisión de compuestos carbonosos

El 4 de julio de 2015, a las 16:34 h, se originó un incendio forestal (figura 44) en la localidad de Luna (Aragón) y, se propagó por los municipios de Orés, Asín, Uncastillo, Ejea de los Caballeros y Biota, afectando a un total de 13.889 ha (Gobierno de Aragón, 2015). El aerosol medio de este episodio se registró como típico de la combustión de biomasa. Las características de este tipo de aerosol dependen de diferentes variables, como el tipo de combustible, la edad del aerosol, la temperatura ambiente, la intensidad del fuego, etc.



Figura 44. Incendio forestal en Luna (Aragón). Fuente: Gobierno de Aragón (2015)

A continuación, se presenta, en la figura 45, un mapa de NAAPS en el que se puede observar la presencia de humo en la parte de la derecha, situado aproximadamente en el foco del incendio el día 5. Y, para caracterizar el episodio, se ha elaborado una gráfica de dispersión (figura 46) que ha permitido comparar los datos de estudio con los valores de AOD y AE estipulados por Toledano Olmeda (2005), obteniendo así que el evento sigue un patrón parecido al estipulado como quema de biomasa, con valores de AOD > 0.38 y AE > 1.5;

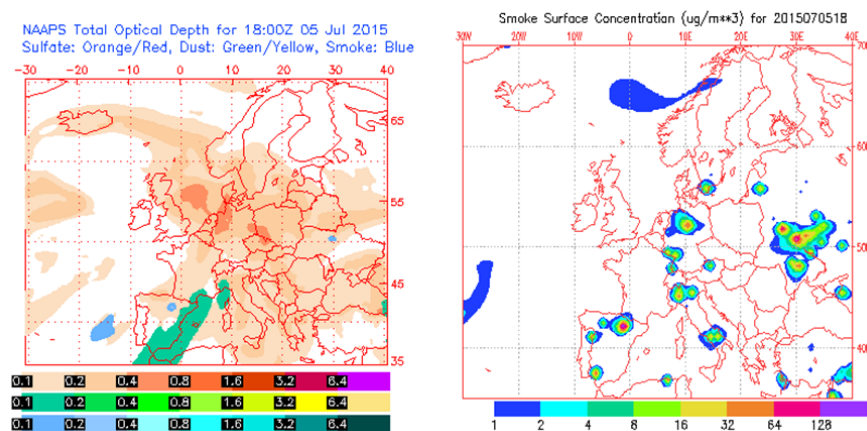


Figura 45. Episodio de incendio forestal en Luna (Aragón), a la izquierda la concentración del espesor óptico total ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y, a la derecha la concentración de humo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) detectado por el modelo NAAPS.

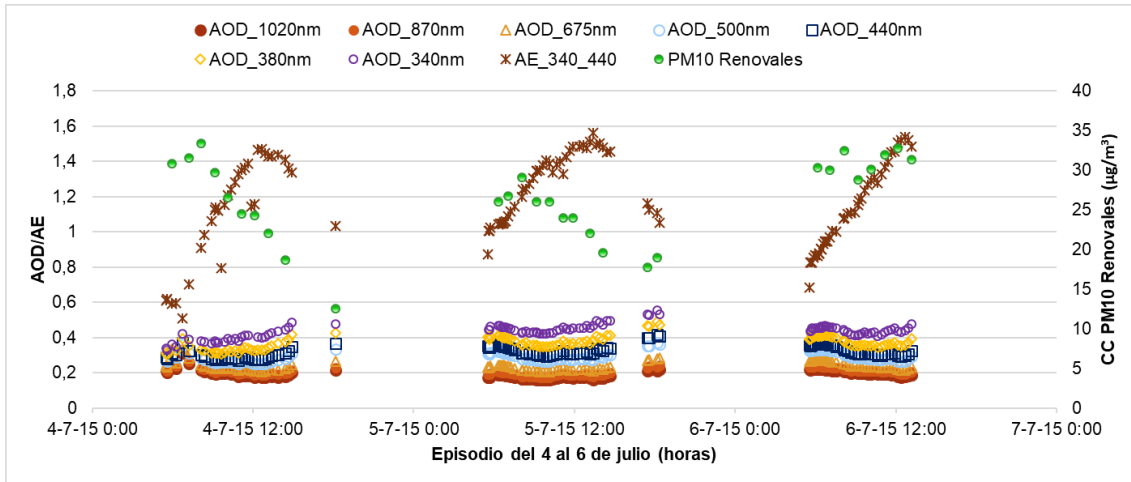


Figura 46. Episodio de incendio forestal en Luna (Aragón): datos de AOD y AE en función de la hora a la que son registrados los valores para el nivel 1.5 y, evolución de la concentración de PM<sub>10</sub> en la estación de Renovales.

#### 4.3.2.3 Episodios de contaminación urbana

Entre el 16 al 20 de diciembre de 2015 se registró un episodio de contaminación urbana. Entendiendo por episodio de contaminación a aquel periodo durante el cual existe una situación meteorológica desfavorable, en lo que a la contaminación atmosférica se refiere, y el nivel de partículas, PM<sub>10</sub>, registrado supera los niveles de estipulados por el RD 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Este episodio se catalogaría dentro de declaración de *episodio ambiental por alta concentración en la atmosfera de PM<sub>10</sub> sin restricción de tráfico*, tal y como aplican algunas ciudades como Madrid o Barcelona.

Como se observa en la figura 47, desde el día 16 en todas las estaciones de calidad del aire del Ayuntamiento de Zaragoza se registran valores diarios de concentración de PM<sub>10</sub> superiores a los estipulados por ley, 50 µg/m<sup>3</sup>, alcanzando su máximo el día 18 en la estación Picarral con 82,1 µg/m<sup>3</sup>. Normalmente, estos episodios se producen en situaciones con ausencia de lluvias abundantes o la presencia de anticiclones, que dificultan la dispersión del material particulado y favorecen su concentración, por lo que suelen ser los detonantes de estos episodios de contaminación atmosférica donde se registran niveles medios elevados.

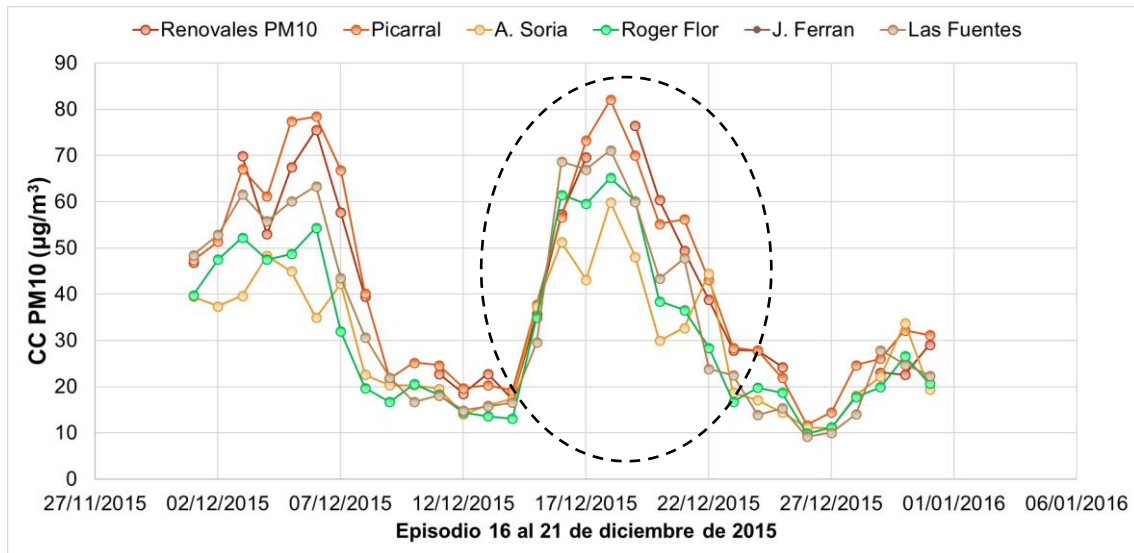


Figura 47. Evolución de la concentración de  $PM_{10}$  en las estaciones de calidad del aire del Ayuntamiento de Zaragoza desde el día 14 hasta el 23 de diciembre de 2015.

#### 4.4 CUANTIFICACIÓN DEL APORTE DE POLVO SAHARIANO Y POLVO MINERAL DE ORIGEN REGIONAL

Una vez identificados los diferentes episodios de polvo mineral regional y, complementariamente, de polvo sahariano, se ha hallado el alcance de dichos fenómenos sobre la calidad del aire de la ciudad de Zaragoza. Para ello, se ha seguido la metodología que se muestra en el apartado 3.6.

Cabe desatacar que, esta metodología presenta algunas limitaciones, tal y como muestra Pey (2007) en su tesis. En algunos episodios se han dado casos en que los valores calculados para el aporte de polvo, tanto sahariano como mineral, son números negativos. Esto puede deberse a varios motivos:

- El episodio de polvo mineral o africano no se ha producido, aunque las diferentes herramientas indican lo contrario.
- Se ha registrado precipitación durante el episodio, lo que ha originado el descenso abrupto de los niveles de  $PM_{10}$ .
- Diferentes factores meteorológicos, unidos a un episodio africano o mineral poco intenso, y unos niveles de  $PM_{10}$  elevados.

En estos casos se asume que el aporte, o bien no ha existido, o bien es mínimo, y, por tanto, se le asigna el valor de 0. A la hora de calcular la contribución de polvo mineral en cada una de las estaciones de calidad del aire, cuyos resultados aparecen en el Anexo 5, en aquellos episodios en los que los valores eran negativos o inexistentes por la falta de datos de CC  $PM_{10}$ , no se han expuesto en la tabla.

En el Anexo 4, se presentan los resultados obtenidos, en el que se encuentra, por un lado, el valor de concentración  $PM_{10}$  ( $PM_{10}$  – *no sah dust*), que se ha estimado a partir de la diferencia entre la concentración de material particulado y, la cantidad de polvo Monagrega (polvo sahariano y polvo regional), registrada en la ciudad de Zaragoza durante dichos episodios. Y, por otro lado, la última columna muestra el aporte de polvo regional para aquellos días en los que se produce resuspensión. En la tabla 10, se recoge a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el episodio 1.

Tabla 10. Resultados obtenidos para el episodio 1, que se encuentra recogido en el Anexo 4.

Episodio	Duración del episodio	Promedio $PM_{10}$ (todas las estaciones)	$PM_{10}$ ( <i>no sah dust</i> )	Polvo Monagrega	Polvo Regional
1	10/06/2014	26,8	17,8	9	7,8
	11/06/2014	20,8	20,8		10,8
	12/06/2014	22,8	22,8		12,8
	13/06/2014	21,3	21,3		11,3
	14/06/2014	21,1	21,0		11,1
	15/06/2014	16,5	16,5		6,5
	16/06/2014	17,4	17,4		7,4
	17/06/2014	20,7	20,7		10,7

De entre los 88 días en los que se ha producido resuspensión de polvo a escala regional, 19 registraron también aportes de polvo sahariano, siendo el 14 de mayo de 2015 el día en el que se alcanzó la mayor concentración,  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por lo que algunos días, la calidad del aire se ha visto modificada por la acción conjunta de los dos fenómenos, las intrusiones de polvo sahariano y la emisión de polvo mineral a escala regional. Para tratar de tener esto en cuenta, se ha introducido una ligera modificación en la metodología: en aquellos días en los que se registran las dos contribuciones, el método para calcular el polvo sahariano considera que todo el incremento sobre la concentración de  $PM_{10}$  calculada por el método del percentil 40 se debe al polvo sahariano, pero en realidad no es así. Por tanto, se ha considerado que los valores que aporta la estación de fondo regional de Monagrega son una mezcla de ambos aerosoles, desértico y regional, aunque no se conoce con exactitud el porcentaje que aporta cada episodio.

La figura 48 muestra como diagrama de barras la evolución temporal de la concentración diaria de  $PM_{10}$  (*no sah dust*) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), el aporte de las intrusiones de aerosol en la estación de Monagrega (polvo sahariano), teniendo en cuenta que es

una mezcla de aerosol desértico y aerosol mineral regional, y, la contribución de la resuspensión de polvo regional, que aparece de color amarillo en la figura, para el periodo de estudio 2014 – 2018.

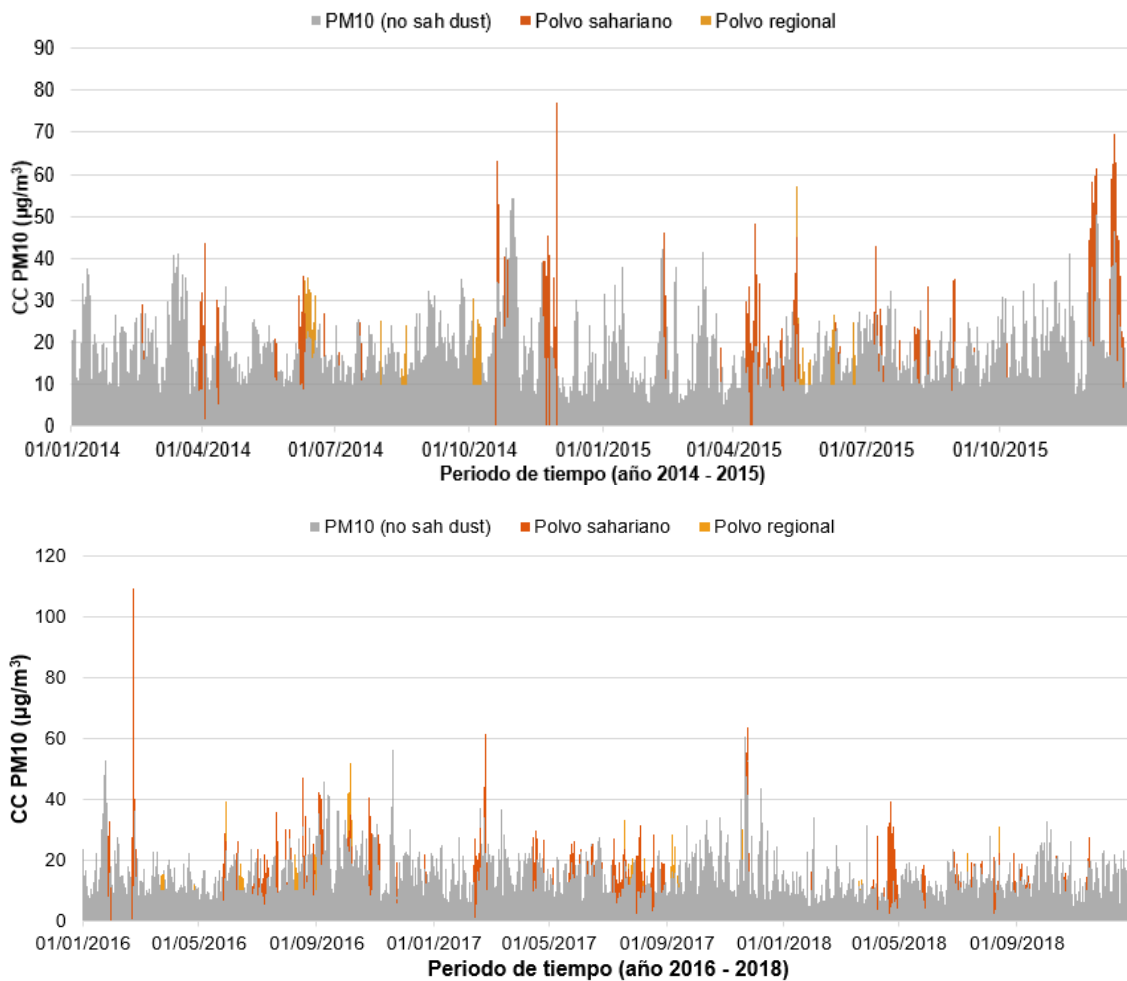


Figura 48. Contribución del aporte de polvo regional y desértico sobre la concentración de  $PM_{10}$  de la ciudad de Zaragoza, (arriba) entre 2014 y 2015 y (debajo) entre 2016 y 2018.

Para cada estación de calidad del aire, se ha hallado cuál es el alcance diario de polvo mineral a la concentración de  $PM_{10}$  esperada en Zaragoza cuyos resultados se muestran en la figura 49. Para ello, a partir de los datos de concentración de polvo mineral que aparecen en el Anexo 5, se ha calculado para cada estación de calidad del aire la concentración total de polvo mineral regional ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y, posteriormente, se ha tenido en cuenta la frecuencia a lo largo de un año de estos episodios y, el número de días de un año. De esta forma, hay que tener en cuenta que las estaciones de Avda. Soria y J. Ferrán no presentaban datos de concentración para todo el intervalo de tiempo de dicho estudio, y quizás puede haber modificado los resultados en la cuantificación del aporte de polvo mineral.

En cuanto a los resultados, *a priori*, se puede apreciar que la incidencia de estos episodios en la media anual apenas llega a 0,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , menos de un 3% de la concentración de  $\text{PM}_{10}$ . Sin embargo, este valor sí que puede marcar un punto de inflexión en el cumplimiento legislativo de manera puntual, o de manera conjunta con otros episodios mencionados con anterioridad, como la contaminación urbana o la intrusión de aerosoles desérticos, etc. puede intensificar las consecuencias sobre la salud de la población.

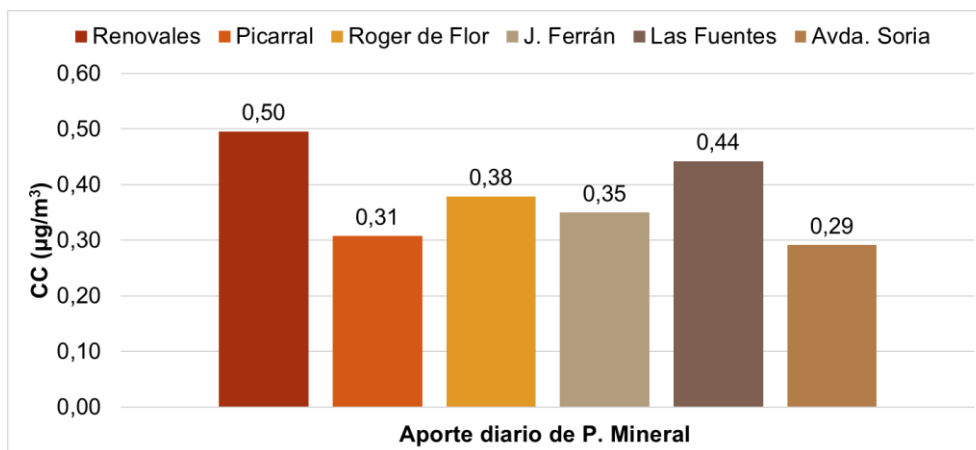


Figura 49. Aporte medio diario de polvo mineral de origen regional sobre la concentración de  $\text{PM}_{10}$  en las estaciones de calidad del aire de Zaragoza.

Con la finalidad de representar de forma más minuciosa la cantidad de polvo mineral regional que aporta el fenómeno de estudio, se ha hallado el porcentaje de anual de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  de la ciudad de Zaragoza, el aporte de polvo sahariano y, el polvo mineral. Para ello, se ha calculado la cantidad anual total de las dos contribuciones de aerosol mineral sobre el total de  $\text{PM}_{10}$  de la ciudad de Zaragoza (tabla 11) y, posteriormente se ha ido calculando su porcentaje individual, para llegar a los resultados que aparecen en la figura 50.

Tabla 11. Media anual (M.A) en % y  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$ , polvo sahariano y polvo mineral.

	2014	2015	2016	2017	2018
<b>M.A - <math>\text{PM}_{10}</math> (con polvo sahariano)</b>	21,0	20,8	18,0	18,0	13,0
<b>M.A - <math>\text{PM}_{10}</math> (sin polvo sahariano)</b>	19,6	18,3	16,6	16,1	12,0
<b>M.A - Polvo sahariano</b>	1,4	2,5	1,4	1,9	1,0



<b>M.A - Polvo mineral</b>	0,55	0,3	0,62	0,39	0,11
<b>% Polvo Sahariano</b>	6,7	12,0	7,8	10,6	7,7
<b>% Polvo Mineral</b>	2,6	1,4	3,4	2,2	0,8
<b>%PM<sub>10</sub></b>	90,7	86,5	88,8	87,3	91,5

Aunque los episodios de intrusión de aerosol desértico son más frecuentes que los de polvo mineral regional, como se ha observado a lo largo del trabajo, ambos representan un porcentaje bajo en el conjunto de la concentración de PM<sub>10</sub> de la ciudad de Zaragoza. El aporte de polvo mineral, sólo representa cómo máximo un 3,4% de forma anual y, el polvo sahariano un 12%, sin embargo son un aporte natural de partículas llamativo y, su ocurrencia pueden ocasionar problemas y/o efectos puntuales; que se deben considerar en conjunto con los episodios de contaminación urbana, ya que su sinergia conlleva efectos más severos. A partir de los datos que se prestan en la tabla 11, se puede concluir que la concentración de partículas que se registra en la zona de estudio son, principalmente, de origen antrópico, bien por actividad industrial o por presencia de tráfico rodado. Y, por ello, el mayor hincapié existente en aportar medidas para su disminución como son el proyecto vigente ECAZ 3.0 en la ciudad de Zaragoza.

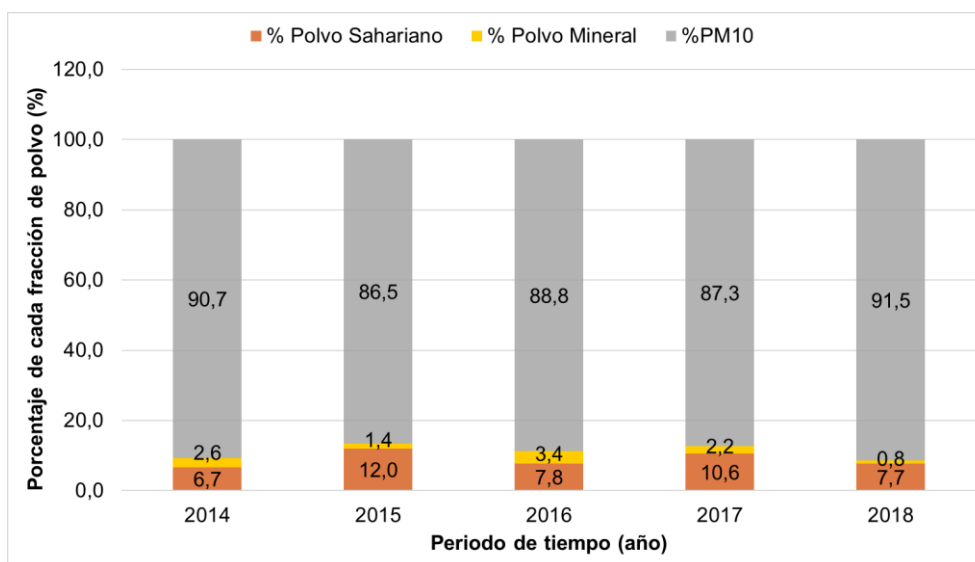


Figura 50. Porcentaje anual del aporte de PM<sub>10</sub>, polvo sahariano y polvo mineral de origen regional.

## 5 CONCLUSIONES

---

Tras el análisis de los resultados que pretendían dar respuesta a los objetivos propuestos del presente estudio, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Se ha verificado que la meteorología es fundamental para explicar los fenómenos de emisión de polvo mineral en el Valle del Ebro. La variabilidad de las precipitaciones y de los episodios de viento intenso crean las condiciones óptimas para que este fenómeno se produzca. Por ello, se puede decir que un elevado flujo turbulento del viento y la continuidad de periodos secos son condiciones fundamentales, aunque no únicas, para que este proceso tenga lugar.
- Se han estudiado, además, otros 3 tipos de episodios de aerosoles, relacionado con contaminación urbana, combustión de biomasa/incendios y, polvo sahariano, siendo las intrusiones de polvo sahariano aquellos con mayor recurrencia durante 2014 – 2018, con un 56%, frente al 15% de los episodios de polvo mineral de origen regional.
- Es la primera vez que se describe y cuantifica el fenómeno de la resuspensión de polvo mineral regional en la zona de estudio, el Valle del Ebro.
- La estacionalidad del fenómeno es relativamente variable, aunque no se han observado episodios en invierno. La mayor incidencia de este fenómeno se registra en los meses de verano, aunque los episodios de mayor duración suelen registrarse también en primavera.
- Se ha formulado una metodología sencilla para poder cuantificar el aporte de polvo mineral regional, de manera que sea de fácil aplicación, al igual que la que ya se encontraba desarrollada para la cuantificación del aerosol desértico. La aplicación de la metodología ha sido satisfactoria en general y se ha estimado una concentración anual en torno a  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No obstante, hay aspectos de la metodología que son susceptibles de mejora. En concreto, los episodios de emisión de polvo a escala regional que acontecen de manera simultánea a eventos de polvo sahariano no se han podido discriminar siguiendo las pautas mostradas en este trabajo.
- El aporte neto de polvo mineral de estos episodios sobre la concentración media anual de  $\text{PM}_{10}$  de la ciudad de Zaragoza es bajo,

no obstante, su impacto a escala diaria puede ser significativo en determinadas ocasiones.

A la vista de los resultados del presente trabajo fin de grado, y al haber alcanzado unos datos justificables sobre la relación entre la concentración de  $PM_{10}$  y el espesor óptico de aerosoles obtenidos de la ciudad de Zaragoza, se puede considerar como una primera aproximación como estudio sobre la emisión de polvo mineral a escala regional. Así, este trabajo puede ser el primer paso para iniciar una línea de investigación en este sentido, que permita estudiar en detalle estos procesos y, por tanto, mejorar los resultados alcanzados.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- AEMET. (2020a). Rosa de los vientos (2014 - 2018) por dirección. Zaragoza: AEMET.
- AEMET. (2020b). SINOBAS. Recuperado el 4 de febrero de 2020, de <https://sinobas.aemet.es/>
- Alastuey, A., Querol, X., Castillo, S., Escudero, M., Ávila, A., Cuevas, E., ... García, O. (2005). Characterisation of TSP and PM<sub>2.5</sub> at Izaña and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain-9 during a Saharan Dust Episode (Julio 2002). *Atmospheric Environment*, 39, 4715–4728.
- Alcántara, A. (2013). *Caracterización de las propiedades radiativas y microfísicas del aerosol atmosférico en la campaña Veleta 2002*. Universidad de Granada.
- Alegría, D. L. (2015). Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas del fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá. Medellín.
- Alonso, S. (2007). *Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias*. Universidad de La Laguna.
- Ayuntamiento de Zaragoza. (2020). Calidad del aire. Recuperado el 21 de diciembre de 2019, de <https://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/atmosfera/redconta/red.htm>
- Boadhaine, B. (1999). On rayleigh Optical Depth Calculations. *Journal Atmospheric and Oceanic Technology*, 16 (11), 1854–1864.
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., ... Zhang, X. Y. (2013). Climate Change 2013: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Clouds and Aerosols* (pp. 571–658). U.K.
- Brook, R. D., Brook, J. R., Urch, B., Vicent, R., Rajagopala, S., y Silverman, F. (2002). Inhalation of fine particulate air pollution and ozone causes acute arterial vasoconstriction in healthy adults. *Circulation*, 105, 1534–1536.
- BSC. (2020). Dust Visor. Recuperado el 19 de septiembre de 2019, de <http://www.bsc.es/projects/earthscience/visor/dust/med8/sfc/archive/>
- Burgos, M. A. (2016). *Estudio de las propiedades en columna y superficie del aerosol atmosférico en la zona centro-norte de la Península Ibérica: énfasis en aerosol desértico*. Universidad de Valladolid.

- Calderón Mateo, P. E. (2018). *Influencia del transporte de concentración de  $PM_{10}$  en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 - 2016*. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental (Universidad Continental).
- Chaparro, G. (2020). La imagen que evidencia la reducción de la contaminación gracias a la cuarentena. *El Comodorensense*. Recuperado el 24 de abril de 2020, de <https://elcomodorensense.net/la-imagen-que-evidencia-la-reduccion-de-la-contaminacion-gracias-a-la-cuarentena/>
- Cimel Advanced Monitoring. (2015). CE318 Photometer User's Operation Manual.
- Corbin, K. C., Kreidenweis, S. M., y Vonder Haar, T. H. (2002). Comparison of aerosol properties derived from Sun photometer data and ground-based chemical measurements. *Geophysical Research Letters*, 29 (10), 1–3.
- Cuadrat, J.M. (2004). El clima de Aragón. *Geografía Física de Aragón. Aspectos Generales y Temáticos*, 15–26.
- Cuadrat, José M, Saz, M. Á., Serrano, R., y Tejedor, E. (2015). *Patrones temporales y espaciales de la temperatura urbana de Zaragoza*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., ... Slutsker, I. (2002). Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59 (ii), 590–608.
- Dubovik, O., y King, M. (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105 (August), 20673–20696.
- Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Pérez, N., Ferreira, F., ... Cuevas, E. (2007). A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment*, pp. 5516–5524.
- Estellés, V. (2006). *Caracterización de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante fotometría solar*. Universidad de Valencia.
- European Environment Agency. (2019). *Air quality in Europe — 2019 report*.
- Fernández García, A. J. (2017). *Caracterización higroscópica del aerosol atmosférico mediante la técnica lidar Raman*. Universidad Complutense de Madrid.

- Gobierno de Aragón. (2012). SiCLIMA: Sistema Básico de Información Climática de Aragón. Apuntes metodológicos para la elaboración de los informes trimestrales sobre el estado del clima de Aragón.
- Gobierno de Aragón. (2015). Informe incendio Luna 2015. Recuperado el 7 de marzo de 2020, de [https://www.aragon.es/documents/20127/674325/INFORME\\_INCENDIO\\_LUNA-2015.pdf/d2a4f6ca-d012-6fec-bc77-f6b3d04eb1d8](https://www.aragon.es/documents/20127/674325/INFORME_INCENDIO_LUNA-2015.pdf/d2a4f6ca-d012-6fec-bc77-f6b3d04eb1d8)
- Gobierno de Aragón. (2020a). ¿Cómo se mide? Método gravimétrico de referencia y equipos automáticos. Recuperado el 20 de marzo de 2020, de [http://www.aragonaire.es/particulatematter.php?n\\_action=measure](http://www.aragonaire.es/particulatematter.php?n_action=measure)
- Gobierno de Aragón. (2020b). Estadísticas de incendios forestales en Aragón. Recuperado el 7 de marzo de 2020, de <https://www.aragon.es/-/estadisticas-de-incendios>
- Gobierno de Cantabria. (2020). Calidad del aire de Cantabria. Analizadores. Recuperado el 19 de febrero de 2020, de <https://www.airecantabria.com/analizadores.php>
- Gobierno de España. (2020). Histórico de Informes de Episodios Naturales. Recuperado el 25 de octubre de 2019, de <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>
- Gobierno de México. (n.d.). 6. Equipos para la medición de la calidad del aire. In N. G. Mexicanas (Ed.) (pp. 50–72). Recuperado el 20 de marzo de 2020, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/623/equipos.pdf>
- Gobierno de México. (2020). Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. Técnicas de Medición. Recuperado el 20 de marzo de 2020, de [https://rama.edomex.gob.mx/tecnicas\\_medicion](https://rama.edomex.gob.mx/tecnicas_medicion)
- Gomes, L., Bergametti, G., Coudé-Gaussen, G., y Rognon, P. (1990). Submicron desert dusts: A sandblasting process. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 95, 13927–13935.
- Guirado, C. (2015). *Caracterización de las propiedades de los aerosoles en columna en la región subtropical*. Universidad de Valladolid.
- Gutiérrez, D., Riesco, J., Díez, E., Martín, F., Núñez, J. Á., Sánchez-Laulhé, J. M., y Ferri, M. (2020). Breve guía descriptiva de los fenómenos meteorológicos recogidos en el Sistema de notificación de observaciones atmosféricas singulares

- (SINOBAS). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Herrero, S. (2019). *Caracterización de las propiedades ópticas y microfísicas de tres tipos de aerosoles atmosféricos durante tres eventos de alta turbiedad en Castilla y León*. Universidad de Valladolid.
- Hess, M., Koepke, P., y Schult, I. (1998). Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 831–844.
- Holben, B. ., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., ... Jankowiak, I. (1998, October). AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66 (1), 1–16.
- Holben, N., Tanr, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Newcomb, W. W., ... Zibordi, G. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology : Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106 (D11), 12067–12097.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2014). Elementos para conformar el Proyecto de Actualización de la Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993. Para establecer los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas fracción PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y el pro. México D.F.: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*.
- Knippertz, P., y W.Stuut, J.-B. (2014). *Mineral dust. A key player in Earth System*. Springer Netherlands.
- López, F., Cabrera, M., Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Martyín, S. (2007). *Atlas climático de Aragón*. Zaragoza: Gobierno de Aragón.
- Losada, N. (2016). *Diseño de un sistema de aseguramiento de la calidad de ensayos de inmisión en aire ambiente*. Universidad del País Vasco.
- Mészáros, E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. (Akadémiai Kiado, Ed.). Budapest.

- Met One Instruments Inc. (2008). Manual de Operación E-BAM.
- Moreta, J. R., Montero, J., San Atanasio, J. M., Moreno, D., y Roa, A. (2016). El episodio de polvo de febrero de 2016: una mirada a través de la radiación solar. *Tiempo y Clima*, 5(53), 40–45.
- NASA. (2020). AERONET - AEROSOL ROBOTIC NETWORK. Recuperado el 21 de febrero de 2020, de <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Negral, L. (2010). *Variabilidad de niveles y composición del material particulado en suspensión en el sudeste de la Península Ibérica*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Obregón Muñoz, M. Á. (2012). *Estudio de los aerosoles en columna sobre Cáceres a partir de medidas radiométricas*. Universidad de Extremadura.
- OMS. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.
- Palacios, L. (2014). Estudio del efecto directo de los aerosoles atmosféricos sobre Europa. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- Palomares, C. O. (2018). *La contaminación atmosférica en Zaragoza y su importancia en prensa digital*. Universidad de Zaragoza.
- Pey, J. (2007). *Caracterización físico-química de los aerosoles atmosféricos en el Mediterráneo occidental*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Piñas Sumalave, P. R. (2015). Modelos e instrumentos para estudios sobre espesor óptico de aerosoles y su relación con el forzamiento radiativo terrestre. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5 (2), 205–210.
- Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Escudero, M., Castillo, S., Orío, A., ... de la Rosa, J. (2013). *Procedimiento para la identificación de episodios naturales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM<sub>10</sub>*.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. BOE. Núm. 25, Madrid, 29 de enero de 2011. Sec. I: pp. 9574 - 9626. Recuperado de <https://www.boe.es/boe/dias/2011/01/29/pdfs/BOE-A-2011-1645.pdf>
- Represa, N. S., Fernández-Sarría, A., Porta, A., y Palomar Vázquez, J. (2018). Assessment of satellite aerosol optical depth to estimate particulate matter distribution in Valencia city. In *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International*



- Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 9141–9144). Valencia: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Salas, J. (2020). El episodio de calima de Canarias bate récords de temperatura. Recuperado el 12 de enero de 2020, de [https://elpais.com/politica/2020/02/24/actualidad/1582540389\\_562154.html](https://elpais.com/politica/2020/02/24/actualidad/1582540389_562154.html)
- Salvador, P. (2005). *Caracterización de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en Madrid*. Universidad Complutense de Madrid.
- San Atanasio, J. M. (2016). Red CIMEL. Medida del espesor óptico de aerosoles. Servicio de Redes Especiales y Vigilancia Atmosférica, AEMET.
- Sánchez-Romero, A., González, J. A., Calbó, J., Sanchez-Lorenzo, A., y Michalsky, J. (2016). Aerosol optical depth in a western Mediterranean site: An assessment of different methods. *Atmospheric Research*, 174–175, 70–84.
- Schulte, J., y Friedman, B. (2019). PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Beta Attenuation Monitor Operating Procedure. Washington State Department of Ecology.
- Schuster, G. L., Dubovik, O., y Holben, B. . (2006). Angstrom exponent and bimodal aerosol size contributions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111.
- SERVIR (2009). Modelo NAAPS para pronosticar aerosoles. Recuperado el 17 de diciembre de 2019, de <https://www.servir.net/haiti-earthquake-2010/69-smog-blog-help-files/395-modelo-naaps-para-pronosticar-aerosoles.html#>
- Sharma, A., Maind Sandip, D., Kelkar, T., Knox, J., y Satish, B. (2013). Influence of atmospheric aerosols on health and environment-climate change. *International Journal of Life Sciences*, 1, 115–120.
- Sierra-Vargas, M., y Teran, L. (2012). Air pollution: impact and prevention. *Respirology*, 17, 1440–1843.
- Stromatas, S. (2013). *Contributions relatives des aérosols minéraux et de feux sur la qualité de l'air en Euro-Méditerranée . 16 de julio de 2013*. École Polytechnique.
- Sunyer, J., Esnaola, M., Alvarez-pedreros, M., Forns, J., Rivas, I., López-Vicente, M., ... Querol, X. (2015). Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. *PLOS Medicine*, 12(3), 1–24.
- Toledano Olmeda, C. (2005). *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET*. Universidad de Valladolid.

- Toledano Olmeda, C. (2008). Los aerosoles atmosféricos y su influencia en la Península Ibérica. *Manuales Formativos de ACTA*, 48, 9–20.
- Tomasi, C., y Vitale, V. (1997). Calculation of the relative optical mass functions for air, water vapor, ozone and nitrogen dioxide in the Antarctic and Arctic Atmospheres. In *7th Workshop Italian Research on Antarctic Atmosphere* (pp. 22–24). Bologne.
- TROPOSFERA. (2019). NAAPS: Mapa predictivo de partículas-smoke-sulfatos. Recuperado el 17 de diciembre de 2019, de <http://www.troposfera.org/>
- Westphal, D. L. (2014). NAAPS Aerosol Analyses and Forecasts for Air Quality Applications. Texas: Naval Research Laboratory Monterey. Recuperado el 21 de febrero de 2020, de [https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/workshops/texas\\_2014/day2/TX\\_h13.pdf](https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/workshops/texas_2014/day2/TX_h13.pdf)
- Wright, R. F., y Schindler, D. W. (1995). Effects on terrestrial and aquatic ecosystems. *Water Air Soil Pollut*, 85, 88–89.

## ANEXOS

### ANEXO 1. VALORES DE CONCENTRACIÓN DE PM<sub>10</sub> DE LA CIUDAD DE ZARAGOZA (2014 – 2018)

PM <sub>10</sub>	2014					
	RD 102/2011					
	Sin descuento de episodios africanos			Descontando episodios africanos		
	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )
<b>El Picarral</b>	50	0	20	50	0	18
<b>Las Fuentes</b>	72	19	26	71	17	24
<b>Renovales</b>	68	10	21	68	8	20
<b>Roger de Flor</b>	69	2	19	49	0	18
<b>J. Ferrán</b>	69	5	20	56	3	18
<b>Media Zaragoza</b>	21,0 µg/m <sup>3</sup>			19,6 µg/m <sup>3</sup>		

PM <sub>10</sub>	2015					
	RD 102/2011					
	Sin descuento de episodios africanos			Descontando episodios africanos		
	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )
<b>El Picarral</b>	82	15	22	64	9	19
<b>Las Fuentes</b>	71	9	19	57	2	17
<b>Renovales</b>	76	10	22	63	7	20
<b>Roger de Flor</b>	65	6	20	48	0	17
<b>J. Ferrán</b>	49	0	18	49	0	16
<b>Avd. Soria</b>	73	5	24	41	0	21
<b>Media Zaragoza</b>	20,8 µg/m <sup>3</sup>			18,3 µg/m <sup>3</sup>		

2016						
RD 102/2011						
Sin descuento de episodios africanos				Descontando episodios africanos		
PM <sub>10</sub>	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )
El Picarral	104	5	20	82	4	18
Las Fuentes	115	9	19	62	3	18
Renovales	123	12	20	85	10	18
Roger de Flor	113	1	19	44	0	17
J. Ferrán	86	2	15	64	1	13
Avd. Soria	115	3	17	70	2	16
Media Zaragoza	18 µg/m <sup>3</sup>			16,6 µg/m <sup>3</sup>		

2017						
RD 102/2011						
Sin descuento de episodios africanos				Descontando episodios africanos		
PM <sub>10</sub>	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )
El Picarral	83	4	17	70	4	15
Las Fuentes	85	7	19	74	7	17
Renovales	96	12	23	88	12	21
Roger de Flor	70	4	19	70	1	17
J. Ferrán	73	1	17	34	0	15
Avd. Soria	67	1	13	48	0	12
Media Zaragoza	18 µg/m <sup>3</sup>			16,1 µg/m <sup>3</sup>		

2018						
RD 102/2011						
PM <sub>10</sub>	Sin descuento de episodios africanos			Descontando episodios africanos		
	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )	V. Límite diario (50 µg/m <sup>3</sup> )	Nº superación V.L.D. (35 veces año civil)	V. Límite anual (40 µg/m <sup>3</sup> )
<b>El Picarral</b>	78	2	17	78	2	15
<b>Las Fuentes</b>	51	1	12	51	1	11
<b>Renovales</b>	75	3	20	75	2	19
<b>Roger de Flor</b>	38	0	14	38	0	13
<b>Avd. Soria</b>	94	1	7	94	1	6
<b>Media Zaragoza</b>	13 µg/m <sup>3</sup>			12 µg/m <sup>3</sup>		

## ANEXO 2. INVENTARIO DE EPISODIOS DE POLVO MINERAL

2014									
Episodio	Requisitos	$\overline{AOD}$ 500 nm	$\bar{\alpha}$ 500 – 870 nm	Tipo de aerosol	$\overline{PM10}$ Renovales $\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	$\overline{PM10}$ Roger de Flor $\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	$\overline{PM10}$ J. Ferran $\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	Última lluvia significativa	Racha máx. viento (km/h)
1 Del 10 al 17 de junio	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> oscilante, acorde con el AOD 👍 AOD (400 nm) con oscilaciones, pero significativo ❓	0,1608	1,6236	Contaminando	17,6	16,3	16,7	No hay	57,9
2 1 de agosto	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> alta 👍 AOD (500 nm) elevado 👍	0,3028	1,7511	Contaminando	21,2	25,2	35,0	1 mes antes	83,0
3 Del 15 al 18 de agosto	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> se mantiene alta	0,1453	1,9296	Continental – Biomasa	17,9	17,5	19,6	Último día del episodio	54,5



	durante el periodo  AOD (500 nm) va en aumento durante el periodo								
<b>4</b> <b>Del 4 al 9 de octubre</b>	Periodo de viento intenso  CC PM <sub>10</sub> se mantiene alta durante el periodo (pico el día 9)  AOD (500 nm) acorde a los valores de PM <sub>10</sub>	0,1234	1,9150	Continental	25,2	21,3	24,9	12 días antes	36,8
<b>2015</b>									
<b>5</b> <b>Del 14 al 23 de mayo</b>	Periodo de viento intenso  CC PM <sub>10</sub> no significativa  AOD (500 nm) con oscilaciones, pero significativo	0,0895	1,0016	Marino	20,0	16,4	–	2 meses antes	67,8

<b>6</b> <b>Del 6 al 9</b> <b>de junio</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> significativo 👍 AOD (500 nm) elevado todo el periodo 👍	0,2347	1,8456	Contaminado	27,0	21,6	–	No hay	50,9
<b>7</b> <b>Del 22 al 23</b> <b>de junio</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> no significativa 🚫 AOD (500 nm) significativo (va disminuyendo a lo largo del periodo) 👍	0,2225	2,0234	Contaminado	21,5	18,5	–	Una semana antes	60,5
<b>2016</b>									
<b>8</b> <b>Del 22 al 24</b> <b>de marzo</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> se mantiene alta durante el periodo 👍 AOD (500 nm) no es muy significativo 🚫	0,1977	0,8215	Polvo (Sáhara)	21,6	14,6	12,4	3 días antes	72,9





<b>9</b> <b>Del 23 al 25</b> <b>de abril</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> se mantiene alta durante el periodo 👍 AOD (500 nm) bajo 🟢	0,0793	0,7976	Marino	13,1	12,7	3,1	18 días antes	65,0
<b>10</b> <b>28 de mayo</b>	Periodo de viento intenso (85 km/h) 👍 CC PM <sub>10</sub> tiene un pico significativo debido a un caso muy localizado de polvo regional 👍 AOD (500 nm) no hay datos 🟡	No hay datos	No hay datos	No hay datos	27,2	25,6	–	No hay	91,0
<b>11</b> <b>Del 11 al 15</b> <b>de junio</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> se mantiene alta durante el periodo 👍 AOD (500 nm) no hay datos 🟡	0,2821	1,1805	Mezcla	17,9	16,9	16,7	No hay	50,2

<b>12</b> <b>Del 8 al 11</b> <b>de agosto</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> se mantiene alta durante el periodo (pico el día 9) 👍 AOD (500 nm) significativo 👍	0,0982	0,8132	Marino	7,0	22,0	18,8	4 días antes	64,0
<b>13</b> <b>Del 28 al 30</b> <b>de agosto</b>	Cierzo 👍 CC PM <sub>10</sub> (alto el 28 y 30, pero bajo el 29) ❓ AOD (500 nm) significativo 👍	0,2529	0,7620	Polvo (Sáhara)	13,5	12,1	18,9	No hay	57,4
<b>14</b> <b>Del 3 al 6</b> <b>de octubre</b>	Cierzo 👍 CC PM <sub>10</sub> alto 👍 AOD (500 nm) significativo 👍	0,2522	0,9183	Polvo (Sáhara)	33,4	28,0	10,7	No hay	40,9
<b>2017</b>									
<b>15</b> <b>Del 13 al 14</b> <b>de julio</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> no significativa 🚫 AOD (500 nm) significativo 👍	0,1325	1,7850	Continental	19,2	15,6	14,5	4 días antes	55,5

<p><b>16</b> <b>18 de julio</b></p>	<p>Periodo de viento intenso 👍 CC PM<sub>10</sub> significativo 👍 AOD (500 nm) significativo 👍</p>	<p>0,3455</p>	<p>1,0498</p>	<p>Mezcla</p>	<p>26,9</p>	<p>26,9</p>	<p>26,4</p>	<p>No hay</p>	<p>63,5</p>
<p><b>17</b> <b>Del 22 al 26 de julio</b></p>	<p>Periodo de viento intenso 👍 CC PM<sub>10</sub> no significativo, pero en aumento durante el periodo 👍 AOD (500 nm) al comienzo elevado, y va disminuyendo con el paso de los días 👍</p>	<p>0,1195</p>	<p>2,0823</p>	<p>Continental</p>	<p>22,1</p>	<p>14,3</p>	<p>12,9</p>	<p>No hay</p>	<p>60,7</p>
<p><b>18</b> <b>Del 5 al 8 de agosto</b></p>	<p>Periodo de viento intenso 👍 CC PM<sub>10</sub> se mantiene alta durante el periodo (pico el día 5 y 7) 👍</p>	<p>0,1290</p>	<p>1,9561</p>	<p>Continental</p>	<p>18,7</p>	<p>19,4</p>	<p>2,0</p>	<p>No hay</p>	<p>61,8</p>

	AOD (500 nm) significativo, el día 7 disminuye en comparación con el resto del periodo 👍								
<b>19</b> <b>Del 4 al 12</b> <b>de</b> <b>septiembre</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> no significativo (picos el 5 y el 11) 🚫 AOD (500 nm) significativo, pero oscilante a lo largo del periodo 👍	0,2285	1,4194	Mezcla	18,1	16,2	–	1 semana antes	49,7
<b>20</b> <b>Del 18 al 19</b> <b>de</b> <b>noviembre</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> alto 👍 AOD (500 nm) no significativo 🚫	0,0419	1,5564	Continental	43,6	9,8	–	No hay	40,3
<b>2018</b>									
<b>21</b> <b>Del 18 al 22</b> <b>de marzo</b>	Periodo de viento intenso 👍 CC PM <sub>10</sub> no	0,1098	1,4944	Continental	10,1	8,4	–	No hay	72,5



	significativa								
	AOD (500 nm) significativo								
<b>22 1 de julio</b>	Periodo de viento intenso CC PM <sub>10</sub> significativa AOD (500 nm) significativo	0,1143	1,6838	Continental	16,3	23,6	–		87
<b>23 11 de julio</b>	Periodo de viento intenso CC PM <sub>10</sub> significativo AOD (500 nm) significativo	0,4069	2,1903	Biomasa	18,1	21,7	–	1 semana antes	76,5
<b>24 12 de agosto</b>	Periodo de viento intenso CC PM <sub>10</sub> significativa AOD (500 nm) significativo	0,1968	1,5741	Mezcla	23,3	17,1	–		104

## ANEXO 3. INVENTARIO DE DIFERENTES EPISODIOS DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

	<b>Polvo sahariano</b>	<b>Polvo regional</b>	<b>Contaminación urbana</b>	<b>Combustión biomasa/Incendios</b>
<b>2014</b>	18 -19 feb	10 - 17 jul	7 - 12 ene	15 - 20 mar
	29 - 31 mar	1 ago	22 - 25 feb	25 ago
	11 - 17 abr	15 - 18 ago	10 - 11 sep	
	20 - 21 may	4 - 9 oct	24 - 31 oct	
	6 - 10 jun		1 - 2 nov	
	21 - 23 jun		12 - 14 dic	
	3 - 4 jul		22 - 24 dic	
	18 - 19 jul			
	22 ago			
	17 - 18 sep			
	12 oct			
	19 - 21 oct			
	21 - 25 nov			
28 - 30 nov				
<b>2015</b>	12 - 13 feb	14 - 23 may	13 - 14 ene	12 feb
	22 - 23 mar	6 - 9 jun	10 - 15 mar	4 jul
	9 - 18 abr	22 - 23 jun	6 - 9 mayo	31 ago
	23 - 26 abr		15 - 19 jul	
	3 - 5 may		21 - 24 jul	
	12 - 15 may		17 - 18 nov	
	10 - 13 jun		27 - 30 dic	
	5 - 12 jul			
	24 jul			
	3 - 8 ago			
	12 - 14 ago			
	29 - 31 ago			
	1 sep			
	13 sep			
5 oct				
1 - 6 dic				
15 -24 dic				
<b>2016</b>	27 - 30 ene	22 - 24 mar	21 - 24 ene	21 ago
	21 - 24 feb	23 - 25 abr	12 - 18 mar	5 sep
	31 mar	28 may	16 - 20 abr	4 oct
	6 - 7 abr	11 - 15 jun	22 - 23 sep	
	26 - 28 may	8 - 11 ago	16 - 17 oct	
	8 - 10 jun	28 - 30 ago	26 - 27 oct	
	25 - 26 jun	3 - 6 oct	18 nov	
	29 - 30 jun		7 dic	
1 - 2 jul		19 - 24 dic		

	5 - 12 jul			
	20 - 22 jul			
	30 - 31 jul			
	3 - 4 ago			
	16 - 20 ago			
	28 - 29 ago			
	2 - 6 sep			
	24 - 28 oct			
	3 - 4 nov			
	22 - 23 nov			
	27 - 28 nov			
<b>2017</b>	11 - 13 feb	13 - 14 jul	11 mar	25 may
	15 - 17 feb	18 jul	2 - 3 ago	22 ago
	23 - 24 feb	22 - 26 jul	21 sep	6 oct
	14 - 18 abr	5 - 8 ago	10 - 11 oct	
	25 abr	4 -12 sep	26 oct	
	5 may	18 nov	7 dic	
	21 - 27 may			
	1 - 2 jun			
	10 jun			
	14 - 16 jun			
	25 - 27 jun			
	6 - 22 jul			
	31 jul			
	15 - 18 ago			
	26 - 31 ago			
22 - 24 nov				
<b>2018</b>	6 - 7 ene	18 - 22 mar	24 feb	25 -27 ene
	29 ene	1 jul	28 mar	3 abr
	2 - 3 abril	11 jul	3 ago	14 may
	7 abr	12 ago	1 oct	
	14 - 15 abr		20 - 21 dic	
	18 - 28 abr			
	25 - 30 may			
	3 jun			
	10 - 11 jun			
	27 - 30 jun			
	14 - 20 jul			
	24 - 27 jul			
	7 - 10 ago			
	28 - 29 ago			
	4 - 5 sep			
9 - 10 sep				
12 - 13 sep				

	18 sep			
	11 - 13 sep			
	19 - 21 sep			
	31 sep			
	12 - 14 nov			

## ANEXO 4. CUANTIFICACIÓN DEL APORTE DE POLVO MINERAL

Episodio	Duración del episodio	Promedio PM <sub>10</sub> (todas las estaciones)	PM <sub>10</sub> (no sah dust)	Polvo Monagrega	Polvo Regional
1	10/06/2014	26,84	17,84	9	7,84
	11/06/2014	20,80	20,80		10,80
	12/06/2014	22,84	22,84		12,84
	13/06/2014	21,34	21,34		11,34
	14/06/2014	21,06	21,06		11,06
	15/06/2014	16,46	16,46		6,46
	16/06/2014	17,45	17,45		7,45
	17/06/2014	20,68	20,68		10,68
2	01/08/2014	25,08	25,08		15,08
3	15/08/2014	13,96	13,96		3,96
	16/08/2014	11,98	11,98		1,98
	17/08/2014	17,54	17,54		7,54
	18/08/2014	24,08	24,08		14,08
4	04/10/2014	30,70	30,70		20,70
	05/10/2014	16,44	16,44		6,44
	06/10/2014	21,16	21,16		11,16
	07/10/2014	25,72	25,72		15,72
	08/10/2014	24,50	24,50		14,50
	09/10/2014	23,66	23,66		13,66
5	14/05/2015	45,12	22,12	23	12,12
	15/05/2015	24,54	11,54	13	1,54
	16/05/2015	14,78	14,78		4,78
	17/05/2015	11,48	11,48		1,48
	18/05/2015	18,83	18,83		8,83
	19/05/2015	13,22	13,22		3,22
	20/05/2015	7,98	7,98		0,00
	21/05/2015	8,26	8,26		0,00
	22/05/2015	15,40	15,40		5,40
	23/05/2015	15,84	15,84		5,84
6	06/06/2015	18,98	18,98		8,98
	07/06/2015	16,40	16,40		6,40



	08/06/2015	23,14	23,14		13,14
	09/06/2015	26,70	26,70		16,70
7	22/06/2015	24,93	24,93		14,93
	23/06/2015	17,15	17,15		7,15
8	22/03/2016	14,95	14,95		4,95
	23/03/2016	15,40	15,40		5,40
	24/03/2016	15,43	15,43		5,43
9	23/04/2016	9,33	9,33		0,00
	24/04/2016	10,00	10,00		0,00
	25/04/2016	11,97	11,97		1,97
10	28/05/2016	26,20	23,20	3	13,20
11	11/06/2016	14,77	14,77		4,77
	12/06/2016	15,02	15,02		5,02
	13/06/2016	18,75	18,75		8,75
	14/06/2016	14,46	14,46		4,46
	15/06/2016	14,10	14,10		4,10
12	08/08/2016	21,90	21,90		11,90
	09/08/2016	17,57	17,57		7,57
	10/08/2016	17,00	17,00		7,00
	11/08/2016	15,74	15,74		5,74
13	28/08/2016	25,36	8,36	17	0
	29/08/2016	16,53	15,53	1	6,53
	30/08/2016	21,20	21,20		11,20
14	03/10/2016	27,38	24,38	3	14,38
	04/10/2016	29,78	22,78	7	12,78
	05/10/2016	35,03	27,03	8	17,03
	06/10/2016	24,70	18,70	6	8,70
15	13/07/2017	16,51	9,51	7	0
	14/07/2017	12,95	7,95	5	0
16	18/07/2017	23,69	19,69	4	9,69
17	22/07/2017	17,05	12,05	5	2,05
	23/07/2017	12,19	12,19		2,19
	24/07/2017	11,77	11,77		1,77
	25/07/2017	14,18	14,18		4,18
	26/07/2017	15,28	15,28		5,28
18	05/08/2017	16,38	9,38	7	0
	06/08/2017	11,59	11,59	0	1,59
	07/08/2017	19,25	9,25	10	0
	08/08/2017	16,76	13,76	3	3,76
19	04/09/2017	13,91	13,91		3,91
	05/09/2017	19,21	19,21		9,21
	06/09/2017	16,36	16,36		6,36
	07/09/2017	14,29	14,29		4,29
	08/09/2017	17,30	17,30		7,30

	09/09/2017	15,72	15,72		5,72
	10/09/2017	9,03	9,03		0,00
	11/09/2017	12,44	12,44		2,44
	12/09/2017	11,13	11,13		1,13
<b>20</b>	18/11/2017	20,10	20,10		10,10
<b>21</b>	18/03/2018	6,12	6,12		0,00
	19/03/2018	11,54	11,54		1,54
	20/03/2018	10,25	10,25		0,25
	21/03/2018	9,88	9,88		0,00
	22/03/2018	11,85	11,85		1,85
<b>22</b>	01/07/2018	15,18	10,18	5	0,18
<b>23</b>	11/07/2018	16,23	16,23		6,23
<b>24</b>	12/08/2018	22,47	18,47	4	8,47

ANEXO 5. CUANTIFICACIÓN DEL APORTE DE POLVO MINERAL PARA CADA ESTACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

Episodio	Duración del episodio	Renovales	Picarral	Avda. Soria	Roger de Flor	J. Ferrán	Las Fuentes
<b>1</b>	10/06/2014	17,20	18,50		13,80	17,30	17,40
	11/06/2014	10,30	8,70		10,30	10,10	14,60
	12/06/2014	11,90	10,10		9,80	11,80	20,60
	13/06/2014	10,80	10,50		9,30	7,90	18,20
	14/06/2014	13,60	12,10		7,40	8,00	14,20
	15/06/2014	11,60	7,40		3,70	2,90	6,70
	16/06/2014		4,40		5,40	6,00	14,00
	17/06/2014	12,60	9,10		7,10	6,70	17,90
<b>2</b>	01/08/2014	11,20	8,90		15,20	25,00	
<b>3</b>	15/08/2014	5,00	1,50		3,80	6,10	3,40
	16/08/2014	2,70	1,80		0,90	3,30	1,20
	17/08/2014	7,30	0,20		12,50	10,10	7,60
	18/08/2014	16,50	7,90		12,90	19,00	
<b>4</b>	04/10/2014	19,30	19,40		20,50	22,00	22,30
	05/10/2014	9,70	6,60		3,00	4,20	8,70
	06/10/2014	9,80	6,60		11,10	14,90	13,40
	07/10/2014	19,00	16,10		9,60	16,10	17,80
	08/10/2014	15,40			11,60	19,20	11,80
	09/10/2014	18,20	14,80		12,00	13,20	10,10
<b>5</b>	14/05/2015	41,90	9,40		30,80		30,90
	15/05/2015	17,60	0,60		10,50		7,10

	16/05/2015	8,30			2,40		3,10
	17/05/2015	5,20					
	18/05/2015	9,80			7,60		5,40
	19/05/2015	5,70	6,30		1,90		1,30
	20/05/2015						
	21/05/2015	0,40			1,00		0,20
	22/05/2015	6,50	3,70		5,60		4,20
	23/05/2015	7,70	4,70		4,80		4,50
<b>6</b>	06/06/2015	13,40	1,50	13,50	9,50		7,00
	07/06/2015	14,10		9,10	5,80		3,80
	08/06/2015	18,90	4,60	12,50	13,70		16,00
	09/06/2015	21,40	13,30		17,50		14,60
<b>7</b>	22/06/2015	16,50		16,90	12,20		14,10
	23/06/2015	6,40		12,50	4,80		4,90
<b>8</b>	22/03/2016	11,30	8,50	2,70	3,60	2,40	1,20
	23/03/2016	9,80	5,20	4,40	5,80	3,10	4,10
	24/03/2016	13,80	6,10	4,00	4,40	1,80	2,50
<b>9</b>	23/04/2016			4,50	2,10		1,00
	24/04/2016	4,80		3,50	1,60		1,50
	25/04/2016	5,80		5,90	4,30		5,20
<b>10</b>	28/05/2016	17,20			15,60		15,80
<b>11</b>	11/06/2016	5,60			5,40		3,30
	12/06/2016	6,10			5,10	17,70	1,40
	13/06/2016	9,60			7,00	14,90	3,50
	14/06/2016	10,90			7,40	5,10	4,70
	15/06/2016	7,10	5,60		9,50	5,60	2,70
<b>12</b>	08/08/2016		10,50	11,70	14,10	12,80	24,90
	09/08/2016		6,90	7,80	13,20	5,50	13,10
	10/08/2016		8,90	9,30	11,40	9,20	
	11/08/2016		9,00	7,40	9,10	7,70	
<b>13</b>	28/08/2016	4,10	21,30	9,70		13,40	28,30
	29/08/2016	1,30	4,00	9,30	5,80	6,30	12,50
	30/08/2016	5,10		14,40	10,40	7,10	19,00
<b>14</b>	03/10/2016	32,20	15,20	10,00	17,80		32,60
	04/10/2016		31,00	14,60	20,90	1,80	30,60
	05/10/2016	40,60	26,60	15,50	22,80	4,50	40,20
	06/10/2016	30,90	15,50	10,20	10,50		21,20
<b>15</b>	13/07/2017	10,17	8,65		7,64	7,01	8,32
	14/07/2017	8,18	2,75		3,47	2,09	4,65
<b>16</b>	18/07/2017	16,86	10,84	0,17	16,87	16,43	20,98
<b>17</b>	22/07/2017	10,34	6,79		9,22	7,59	11,06
	23/07/2017	6,89	1,62		2,66	2,44	3,33
	24/07/2017	4,57	2,81		2,47	1,29	3,70
	25/07/2017	19,39	1,55		2,59	0,97	4,47
	26/07/2017	19,12	0,84		4,58	2,28	7,83

<b>18</b>	05/08/2017	10,16	9,88		10,61		11,89
	06/08/2017	7,04	0,91		2,21		2,44
	07/08/2017	8,00	12,29		15,93		11,77
	08/08/2017	9,61	8,56		8,84		9,78
<b>19</b>	04/09/2017	9,32	4,46		5,12		6,26
	05/09/2017	15,28	11,82		10,51		13,58
	06/09/2017	10,66	18,51		3,50		4,69
	07/09/2017	5,82	6,74		8,23		6,42
	08/09/2017	11,17	7,64		11,18		11,59
	09/09/2017	10,92	8,24		7,81		6,80
	10/09/2017	0,50	0,49				0,28
	11/09/2017	5,29	1,75		4,90		5,96
12/09/2017	4,26	0,53		4,90		1,59	
<b>20</b>	18/11/2017	33,63					10,84
<b>21</b>	18/03/2018						
	19/03/2018		4,11	2,58			5,63
	20/03/2018	2,23					3,22
	21/03/2018	1,12					1,21
	22/03/2018	4,61	1,27	0,46			3,45
<b>22</b>	01/07/2018	6,28	3,98		13,59		
<b>23</b>	11/07/2018	8,06	7,13		11,70		7,23
<b>24</b>	12/08/2018	13,30	33,81		7,12		12,08