



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**Análisis de las concentraciones de partículas en una atmosfera
urbana**

Autor: Adrián de los Ríos Curieses

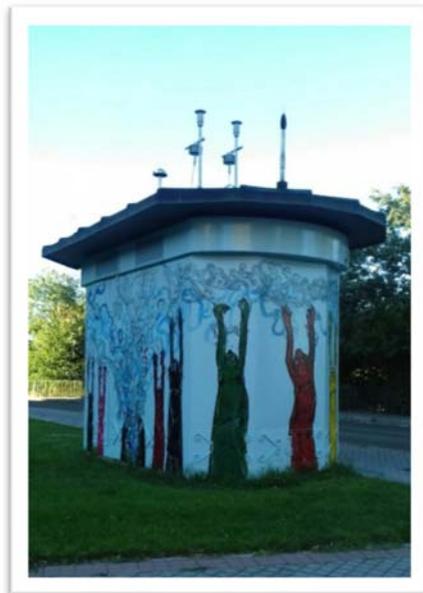
Tutoras: María Ángeles García Pérez

María Luisa Sánchez Gómez

Agradecimientos

Al Ayuntamiento de Valladolid por la disponibilidad de los datos utilizados en este trabajo.

A mis tutoras que me han ayudado en el desarrollo del mismo y a la Universidad de Valladolid por los recursos prestados.



ÍNDICE

RESUMEN/ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. DEFINICIÓN	3
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO	5
1.3.1. FUENTES	5
1.3.2. COMPOSICIÓN	6
1.3.3. TAMAÑO	8
1.3.4. EFECTOS	9
1.4. NORMATIVA REFERENTE A PARTÍCULAS	11
2. OBJETIVOS	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1. ÁREA DE MUESTREO	15
3.2. BASE DE DATOS	19
3.3. MÉTODOS DE MEDIDA	20
3.4. CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	21
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	23
3.6. METODOLOGÍA APLICADA A LAS MASAS DE AIRE	26
4. RESULTADOS	31
4.1. VARIACIÓN TEMPORAL Y RELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS PM ₁₀ Y PM _{2,5}	31
4.1.1. EVOLUCIÓN ESTACIONAL	34
4.1.2. EVOLUCIÓN DIARIA	36
4.1.3. EVOLUCIÓN SEMANAL	39
4.1.4. RELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS CON OTROS CONTAMINANTES	40
4.1.5. RELACIÓN ENTRE PM _{2,5} Y PM ₁₀	42
4.1.6. RELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS ENTRE ESTACIONES	43
4.2. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS	44
4.2.1. CONTRIBUCIÓN DE INTRUSIONES SAHARIANAS	47
4.2.2. CASO DE ESTUDIO: EPISODIO 21-22 FEBRERO 2016	50
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE FONDO	56
CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	63
Glosario de Tablas y Figuras	70

RESUMEN

La atmósfera contiene muchos tipos de contaminantes, entre ellos, partículas de diferentes tamaños, que tienen una especial importancia por sus efectos adversos sobre los seres vivos, la vegetación, los materiales y la propia atmósfera. Este trabajo analiza los niveles de PM10 y PM2,5 registrados en diferentes estaciones de muestreo localizadas en la zona urbana de Valladolid durante 2015-2016. Para ello, se determinó la evolución de las concentraciones de partículas a diferentes escalas temporales. Además, se analizó el impacto del transporte a larga distancia mediante la aplicación de un modelo de trayectorias, HYSPLIT, teniendo en cuenta retrotrayectorias de masas de aire de orígenes europeo, africano, atlántico y condiciones locales. Específicamente, se muestra un episodio de concentraciones altas debido a las intrusiones de polvo sahariano. Finalmente, se estimaron los niveles de fondo de las concentraciones de PM10 y PM2,5 en el área de muestreo.

ABSTRACT

The atmosphere contains many types of pollutants, including particles of different sizes, which are especially important because of their adverse effects on human beings, animals, plants, materials and the atmosphere itself. This work analyses the levels of PM10 and PM2,5 registered in different sampling stations located in the urban area of Valladolid during 2015-2016. For this, the evolution of particle concentrations at different time scales was determined. In addition, the impact of long distance transport was analysed by the application of a trajectory model, HYSPLIT, taking into account backtrajectories of air masses of European, African, Atlantic origins and local conditions. Specifically, an event of high concentrations due to the Saharan dust intrusions is shown. Finally, background levels of PM10 and PM2.5 concentrations were estimated in the sampling area.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIÓN

De forma representativa, se puede definir la contaminación atmosférica como la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza (BOE, 2007). La contaminación atmosférica por material particulado considera la alteración de la composición natural de la atmósfera debido a la entrada de partículas por causas naturales o antropogénicas.

Se denomina material particulado atmosférico al conjunto de partículas sólidas y líquidas (excepto el agua) que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Engloba tanto las partículas en suspensión como las sedimentables (diámetro > 20 μm) con poco tiempo de residencia en la atmósfera (IPCC, 2001; Puigcerver y Carrascal, 2008). También se emplea otro término como aerosol, pero, en general, este último término hace referencia a suspensiones relativamente estables de partículas sólidas y líquidas en un gas. Por tanto, la diferenciación entre dichos términos se refiere al medio gaseoso en el que se encuentran las partículas (Salvador y Artiñano, 2000).

Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

1.2. ANTECEDENTES

Las investigaciones sobre el material particulado atmosférico han aumentado en las últimas dos décadas debido a su impacto en la salud humana (Karagulian et al., 2015; Harrison y Yin, 2000), en los diferentes ecosistemas y en el cambio climático (IPCC, 2001). Con objeto de minimizar dichos impactos es necesario realizar medidas de concentración de este complejo grupo de contaminantes, evaluar su comportamiento espacial y temporal, así como relacionarlo con parámetros meteorológicos, composición química y origen para que las autoridades puedan realizar su seguimiento, establecer estrategias de control y reducir las emisiones del material particulado y de los gases precursores. En este sentido, los enormes avances tecnológicos utilizados en la medida de los niveles de partículas han permitido que se entienda de forma más precisa su composición química y sus propiedades físicas (Fuzzi et al., 2015).

Existen datos históricos sobre la contaminación atmosférica por partículas en China debida a polvo desértico (Zhang, 1984). También, se encuentran registros históricos de hace dos siglos por intrusiones de polvo en Corea (Chun et al., 2001; Alonso, 2007). La influencia del polvo africano sobre Europa es conocida desde antiguo (Querol et al., 2008a). Además, desde 1960 se mostró una gran preocupación respecto a la contaminación atmosférica y sus efectos adversos a partir de los eventos de alta mortalidad de Londres (Querol, 2008b).

Es en la década de 1970 cuando se hacen estudios detallados sobre transporte y efectos del polvo en varias zonas del planeta. Estudios realizados en algunas ciudades de España y Europa han demostrado que el tráfico contribuye de forma notable en los niveles de concentración de las partículas (50% de los niveles medios anuales) (Amato et al., 2009; Querol et al., 2012). Además, un amplio análisis con registros de diferentes puntos del planeta sugiere que, junto con el tráfico, la industria y la biomasa contribuyen especialmente a los niveles de partículas en las ciudades (Karagulian et al., 2015).

Algunas investigaciones han demostrado que han aumentado los niveles de aerosoles antropogénicos en Asia y revelan un gran impacto de los flujos de contaminantes asiáticos en la circulación general y el clima global (Wang et al., 2014). También se observan niveles altos de partículas en el norte de África, más altas que las de Europa, el este de Estados Unidos y el oeste de América del Sur (WHO, 2016; Naidja et al., 2017). Sin embargo, entre 1990 y 2011, la emisión total de material particulado se ha reducido considerablemente en la Unión europea (EEA, 2015) destacando el sector de producción y distribución de energía debido a factores como el cambio de combustible del carbón al gas natural para la generación de electricidad y mejoras en el rendimiento de los equipos de eliminación de contaminación instalados en instalaciones industriales, así como reducción en el transporte por carretera.

Para el estudio del comportamiento histórico de los contaminantes en el aire y pronosticar sus niveles a un futuro cercano, se pueden utilizar los modelos de calidad del aire y comparar los resultados con los registros de las concentraciones de cada uno de ellos. El impacto de las emisiones antropogénicas o de origen natural en las concentraciones de partículas en los lugares donde se realizan medidas de concentración se puede también estudiar teniendo en cuenta el transporte a larga distancia de las masas de aire ya que una vez en suspensión en la atmósfera pueden ser transportados a miles de kilómetros y llegar a afectar regiones muy alejadas de las zonas donde se originaron.

De este modo, en la Península Ibérica destacan las intrusiones de masas de aire de origen sahariano y el transporte de aerosoles de origen antropogénico que puede representar un aporte externo cuantitativamente importante, especialmente desde el Centro de Europa y el Mediterráneo (Rua et al., 1998; Artíñano et al., 2001; Rodríguez et al., 2001; Escudero et al., 2005; Sánchez et al., 2007; Querol et al., 2008; Toledano et al., 2009; Cachorro et al., 2016). Para interpretar los aportes de contaminantes y su influencia en los niveles de calidad del aire se analizan los recorridos que realizan las masas de aire antes de afectar a un lugar determinado, lo que se denominan retrotrayectorias. Otras herramientas complementarias para el análisis de las masas de aire la proporcionan los datos satelitales y las observaciones meteorológicas, entre otras.

1.3. MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

1.3.1. FUENTES

El material particulado consta de una mezcla de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes tamaños y composición química influenciada por la composición de los gases que las rodean, la variabilidad de las fuentes y las transformaciones químicas implicadas. Las partículas pueden ser emitidas por fuentes de origen natural o antropogénico. Las emisiones de origen natural se refieren a emisiones de la propia naturaleza, representando globalmente, alrededor de un 80% de las partículas que se encuentran en la atmósfera (Orozco et al., 2008). Las de origen antropogénico son las ocasionadas por las actividades del hombre. Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser vertidas directamente a la atmósfera, primarias, o generadas como resultado de reacciones químicas a partir de la presencia de los precursores gaseosos, secundarias.

Las principales fuentes de partículas primarias naturales son: emisiones de los suelos que originan partículas minerales; la superficie de mares y océanos contribuye al aerosol marino; fuentes biogénicas formadas por restos vegetales y microorganismos y emisiones volcánicas (Negral et al., 2008; Inza, 2010).

El transporte a larga distancia de partículas gruesas de polvo desde zonas africanas contribuye de forma importante (Sánchez et al., 2007; Querol et al., 2009; Kassomenos et al., 2012).

Las principales fuentes naturales de gases precursores de partículas secundarias son: las emisiones de SO₂ volcánicas, el dimetil sulfuro de origen biogénico marino, la transpiración de los suelos, los rayos y las extensas zonas forestales con emisión de vapores orgánicos debido a la transpiración de las plantas (Inza, 2010).

Las fuentes emisoras de origen antropogénico de material particulado son diversas. El tráfico rodado constituye la fuente más importante de partículas primarias las cuales pueden proceder de las emisiones de los motores de los vehículos, del desgaste del firme de rodadura, los neumáticos y frenos, así como de la resuspensión del material depositado en el suelo. El tamaño de las partículas depende del combustible utilizado y del propio proceso de combustión. (Charron y Harrison, 2005).

Otras fuentes antropogénicas importantes son los procesos de combustión que tienen lugar en centrales térmicas y otros sectores industriales, o bien con el transporte marítimo y el sector residencial, las pérdidas en procesos industriales como en industrias cementeras, canteras, minería, entre otras.

Algunas actividades agrícolas, como la quema de biomasa y la preparación de las tierras también son emisoras considerables de partículas. Las actividades agropecuarias generan también amonio que reacciona con gases ácidos para dar lugar a partículas secundarias. Además, zonas extensas de cultivo emiten vapores orgánicos que también dan lugar a partículas orgánicas secundarias.

1.3.2. COMPOSICIÓN

Las principales clases de partículas atmosféricas respecto a su composición química son: materia mineral, aerosol marino, compuestos de carbono, compuestos de nitrógeno y compuestos de carbono (Puigcerver y Carrascal, 2008).

Materia mineral: Representa la fracción mayoritaria de partículas de origen natural en la atmósfera a escala mundial, aunque a escalas inferiores, la proporción pueden ser inferior. De este modo, el material particulado en los países mediterráneos tiene una alta composición de polvo mineral, aunque también presenta metales pesados (Querol et al., 2008b; Amato et al., 2009; Paraskevopoulou et al., 2015; Fernandez-Camacho et al., 2016).

Las emisiones de materia mineral pueden ser generadas por la acción del viento sobre la superficie terrestre y por volcanes. La mayor área de emisiones se encuentra en el hemisferio norte en zonas áridas o semiáridas.

También existen fuentes de origen antropogénico de partículas minerales como las que se originan en la construcción, minería, fabricación de cerámicas o cementos y en el tráfico (Querol et al., 2001).

Aerosol marino: Es el segundo componente más abundante de las emisiones de material particulado a nivel global. Son en su mayoría partículas de origen natural y emitidas directamente a la atmósfera principalmente por la acción del viento sobre la superficie de los océanos. Se pueden formar pequeñas burbujas que descargan en el aire partículas líquidas con restos de residuos orgánicos procedentes de la descomposición de algas y plancton, así como cloruro de sodio. También, se originan por la agitación de la superficie de mares y océanos (Pérez, 2010).

Compuestos de azufre: Los sulfatos son de origen secundario originados por oxidación de los precursores gaseosos, SO₂. Junto al nitrato y amoníaco suelen ser los principales componentes inorgánicos secundarios del material particulado antropogénico. Los procesos de combustión de carburantes fósiles con elevado contenido en S en centrales térmicas e industrias constituyen una fuente importante de gases precursores de estos componentes (Viana et al., 2003). Una fuente natural importante de SO₂ lo constituyen las emisiones volcánicas.

Compuestos de nitrógeno: En general son de origen secundario como los nitratos y amonio. Los suelos, los incendios forestales, las descargas eléctricas y emisiones biogénicas contribuyen a la emisión natural de este tipo de partículas. Entre las fuentes emisoras de gases precursores de nitratos de origen antropogénico destacan la combustión eléctrica, procesos de combustión a elevada temperatura y quema de biomasa (Puigcerver y Carrascal, 2008).

Compuestos de carbono: Existe una gran variedad de compuestos con C tanto de origen natural como antropogénico. En las zonas urbanas es una de las fracciones más abundantes del material particulado. Las partículas consisten en carbono elemental y orgánico. El carbono elemental, carbono negro, carbono grafitico o hollín, es principalmente primario y producido por la combustión incompleta de combustibles orgánicos. Las principales fuentes son el tráfico rodado (principalmente los motores diesel), generación de energía, procesos industriales específicos, combustión de biomasa y emisiones domésticas.

Los compuestos de carbono orgánico pueden emitirse directamente o puede formarse por condensación de compuestos orgánicos volátiles, como a partir de procesos de combustión de origen antropogénico. En menor proporción, algunos

compuestos orgánicos de origen natural son emitidos por la vegetación, la superficie de los océanos y los suelos como partículas primarias o secundarias. Como partículas primarias destacan compuestos vegetales como esporas, polen, microorganismos, hongos y ácidos húmicos (Pöschl, 2005).

1.3.3. TAMAÑO

Las partículas pueden tener diferentes formas (las líquidas son esféricas y las sólidas pueden ser de forma poliédrica, laminar...) pero para su estudio se consideran a todas esféricas. El tamaño de las partículas condiciona su comportamiento tanto en lo que se refiere al destino de las mismas como a sus efectos, pudiendo oscilar entre radios menores de 10^{-3} μm a radios mayores a 10^3 μm . Se pueden clasificar en tres grupos (Querol et al., 2001; Orozco et al., 2008; Inza, 2010).

Partículas de Aitken o finas: de tamaño inferior a 0,1 μm de diámetro.

Partículas medias: se encuentran en suspensión y con diámetro comprendido entre 0,1 y 10 μm .

Partículas sedimentables o gruesas: con diámetro superior a 10 μm , permanecen en el aire períodos cortos y sufren procesos de coagulación.

En cuanto a la calidad del aire se distinguen cuatro parámetros atendiendo al tamaño de corte de los sistemas de captación: TPS es el total de partículas en suspensión; PM_{10} se define como el conjunto de partículas que atraviesa un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro de 10 μm ; $\text{PM}_{2.5}$ para tamaños de 2,5 μm y PM_{10} para las de 1 μm . El tamaño de las partículas que permanecen en suspensión en el aire está comprendido entre 0,1 y 10 μm .

Todas las partículas que hay en la atmósfera acaban depositándose en el suelo o superficies mediante dos procesos, la deposición seca y la deposición húmeda. Las más pequeñas experimentarán primero un proceso de coagulación antes de depositarse y las más grandes no lo requieren.

Deposición seca: por sedimentación, sin intervención del agua de la atmósfera (se eliminan el 20%).

Deposición húmeda: arrastradas por el agua de lluvia, eliminándose del aire la mayor parte de las partículas grandes.

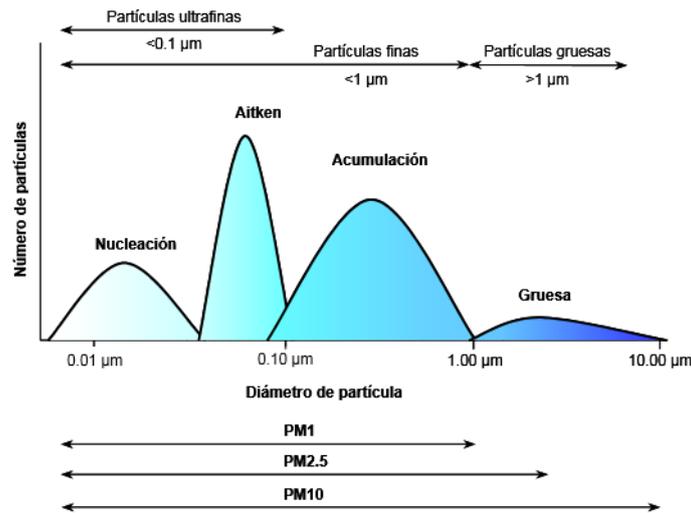


Figura 1. Clasificación de las partículas en función de su tamaño (Tomada de Inza, 2010).

1.3.4. EFECTOS

Efectos sobre el ser humano

Estudios toxicológicos y epidemiológicos han encontrado los efectos adversos de la exposición a partículas en la salud humana en función del tamaño, concentración y toxicidad (Anderson et al., 2012).

Los efectos que las partículas causan en la salud de las personas han estado asociados a enfermedades de tipo respiratorio y más recientemente se han relacionado también con dolencias cardiovasculares (Pope and Dockery, 2006). Algunos estudios sugieren que estos compuestos están asociados con el aumento de la mortalidad de la población expuesta y otros efectos adversos relacionados con el neurodesarrollo, la función cognitiva y algunas enfermedades crónicas como la diabetes (Brook et al., 2010; Samoli et al., 2013; WHO, 2013; Fernández-Camacho et al, 2016).

La fracción de partículas atmosféricas que son inhaladas por el cuerpo humano depende de las propiedades de las partículas y de las condiciones del aire alrededor del cuerpo. Sin embargo, se puede considerar su nivel de depósito en el tracto respiratorio atendiendo a su diámetro.

Según los criterios de la norma europea UNE EN 12341:1999, se puede clasificar el material particulado en fracción inhalable (< 30 µm), fracción extratorácica (>10 µm), fracción torácica (<10 µm), fracción traqueobronquial (10-2.5 µm) y fracción alveolar (<2.5 µm). Las partículas inferiores a 10 µm son consideradas como indicador de

calidad del aire. Las partículas gruesas no alcanzan los pulmones, aunque pueden causar alergias u otras afecciones. Las partículas finas penetran en los pulmones, pero por su tamaño similar al de las moléculas pueden ser eliminadas. Las partículas más nocivas tienen un diámetro medio comprendido entre 0,1 y 2,5 μm ya que son difíciles de eliminar. Incluso las partículas de tamaño inferior a 0,5 μm se pueden depositar en los alvéolos pulmonares ocasionando graves lesiones.

La mayor parte de las partículas procedentes de fuentes antropogénicas tienen un tamaño entre 0,1 y 4 μm por lo que se encuentran dentro de las más nocivas (Orozco et al., 2008).

Efectos sobre la vegetación

Al depositarse las partículas sobre las hojas de las plantas pueden obstruir las estomas influyendo en la fotosíntesis y por consiguiente en el desarrollo normal de la planta, alterando su crecimiento (Grantz et al., 2003; Orozco et al., 2008). Estas partículas pueden contener sustancias químicas nocivas para los animales que las coman. Las partículas finas, debido a su menor tamaño, pueden quedar suspendidas en el aire períodos más largos de tiempo y viajar largas distancias depositándose sobre zonas diferentes a las que han sido originadas como lagos, ríos, suelos cultivados, provocando acidificación, cambiando del balance de nutrientes y dañando bosques y cultivos, lo que afecta a los diferentes ecosistemas.

Efectos sobre los materiales

El efecto más importante de las partículas sobre los materiales es el aumento de su velocidad de corrosión y la degradación con el paso del tiempo. Además, las superficies sobre las que se depositan se ensucian y como consecuencia se derivan otros efectos estéticos y económicos no deseados. La conjunción de otros factores meteorológicos, bacteriológicos y fisicoquímicos condicionan el proceso de degradación (Seoáñez, 2002).

Otros efectos

El material particulado tiene otros efectos derivados de su capacidad de absorber, dispersar y reflejar radiación solar (Satheesh y Ramanathan, 2000; IPCC 2013). Estos

efectos atmosféricos dependen de la altitud a la que se encuentren las partículas. Las que están a baja altura disminuyen el flujo solar, difunden la luz incidente y absorben parte de la radiación, lo que conlleva un calentamiento de las mismas y emisión de radiación infrarroja, pudiendo aumentar el efecto invernadero. Las que se encuentran a más altura no dejan pasar la luz solar y pueden producir enfriamiento en la parte inferior de la atmósfera y calentamiento de la estratosfera. Los cambios que ocurren en las concentraciones de los gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera, en la superficie terrestre y en la radiación solar modifican el balance de energía del sistema climático e intervienen en el cambio climático (Fuzzi et al., 2015).

Las partículas causan la disminución de la visibilidad o la llamada turbiedad atmosférica provocada por los fenómenos de absorción originados a causa de su presencia en la atmósfera en forma de dispersiones coloidales (una fase líquida y otra en forma de partículas, sólida). Cuando la humedad relativa es grande se produce condensación sobre su superficie y la formación de nieblas y brumas que disminuyen la visibilidad.

Indirectamente influyen en la formación de nubes actuando como núcleos de condensación y llegando a modificar el tamaño de la gota de agua en las nubes, así como otras propiedades (tiempo de vida, albedo, precipitación y composición química) (Andreae y Rosenfeld, 2008; Li et al., 2011; IPCC, 2013).

1.4. NORMATIVA REFERENTE A PARTÍCULAS

Desde los años 70, en la Europa Comunitaria se ha ido implantando un amplio marco legislativo relacionado con el medio ambiente. En los últimos años, este plan normativo ha ido evolucionando en respuesta a un mayor entendimiento de los problemas medioambientales y su relación con la contaminación atmosférica. Se han establecido normas de calidad del aire para contaminantes específicos y para sectores que constituyen una fuente de contaminación atmosférica.

La Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 referente a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa modificó la normativa comunitaria previa actualizando los datos y revisando los criterios establecidos. En ella se introducen regulaciones referentes a las partículas PM_{2,5} y otros requisitos para la evaluación y gestión de la calidad del aire.

El marco normativo en España sustituyó la antigua Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico por la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Además, la Directiva Europea fue traspuesta a la legislación española en el Real Decreto 102/2011 de 28 de enero donde se recoge y simplifica la normativa nacional relativa a la mejora de la calidad del aire para contaminantes con más incidencia en la salud de las personas y en el medio ambiente.

Este Real Decreto fue posteriormente modificado en el Real Decreto 678/2014, de 1 de agosto en relación a los objetivos calidad del aire de ciertos contaminantes como cloruros y sulfuros y los métodos de referencia para su medida.

Los niveles de material particulado en el aire ambiente se encuentran regulados por el Real Decreto de 2011 mencionado, en el que se establecen los valores límite de las partículas PM10 y PM2,5 en condiciones ambientales para la protección de la salud y que se muestran en las Tablas I-II.

Tabla 1. Valores límite de las partículas PM10 para la protección de la salud.

	Período de promedio	Valor límite
Valor límite diario	24 horas	50 $\mu\text{g m}^{-3}$ que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año
Valor límite anual	1 año civil	40 $\mu\text{g m}^{-3}$

Tabla 2. Valores límite de las partículas PM2,5 para la protección de la salud.

	Período de promedio	Valor límite	Fecha cumplimiento valor límite
Valor objetivo anual	1 año civil	25 $\mu\text{g m}^{-3}$	En vigor desde 1 enero 2010
Valor límite anual (Fase I)	1 año civil	25 $\mu\text{g m}^{-3}$	En vigor desde 1 enero 2015
Valor límite anual (Fase II)	1 año civil	20 $\mu\text{g m}^{-3}$	1 enero 2020

Aunque el valor límite anual de partículas PM10 que se recoge en el Real Decreto es $40 \mu\text{g m}^{-3}$, la Organización Mundial de la Salud es más restrictiva considerando un valor límite de $20 \mu\text{g m}^{-3}$. Respecto al valor límite anual de partículas PM2,5, considera $10 \mu\text{g m}^{-3}$ y $25 \mu\text{g/m}^3$ media de 24 horas (WHO, 2006).

El grado de cumplimiento de los valores límite puede estar condicionado en ciertas regiones europeas a la influencia de aportes de determinados fenómenos naturales como erupciones volcánicas, movimientos sísmicos, focos geotérmicos, incendios de zonas silvestres, fuertes vientos, aerosoles marinos y resuspensión atmosférica o transporte de partículas naturales procedentes de regiones áridas.

En el Real Decreto también están recogidos los métodos de referencia para la toma de muestras y la medición para cada tipo de partículas.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es analizar los niveles de partículas, fracción PM10 y PM2,5, de una atmósfera urbana, Valladolid, a partir de los datos de inmisión registrados en 4 estaciones de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid, Arco Ladrillo, La Rubia, Vega Sicilia y Puente del Poniente-M.^a Luisa Sánchez, distribuidas en la ciudad, durante el período 2015-2016.

Los objetivos específicos son:

1. Interpretar la variabilidad temporal de los niveles del material particulado, PM10 y PM2,5 en las estaciones de muestreo de una zona urbana: evolución estacional, semanal y horaria.
2. Analizar las correlaciones existentes entre las concentraciones de partículas y otros contaminantes atmosféricos.
3. Interpretar la relación entre los componentes PM2,5 y PM10 del material particulado.
4. Caracterizar los movimientos de las masas de aire que llegan al lugar de muestreo.
5. Evaluar el impacto de las intrusiones de masas de aire africano en los niveles de las partículas atmosféricas en la baja troposfera.
6. Determinar los niveles de fondo de la zona de estudio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE MUESTREO

El área de muestreo para la realización de este estudio será Valladolid, una localidad española situada al noroeste de la Península Ibérica, en la Comunidad Autónoma de Castilla y León (Figura 2). Este municipio es la capital de la provincia de Valladolid y es sede de la Junta y las Cortes. Su parte metropolitana está compuesta por 23 municipios.

Tabla 3. Información municipal, informe del Ayuntamiento de Valladolid.

Superficie municipal (km^2)	197,7
Altitud (m)	691
Latitud	41° 39' Norte
Longitud	4° 43' Oeste
Entidades de Población	5
Núcleos de Población	7

Se encuentra localizado en el centro de la meseta norte y presenta por tanto un paisaje llano y con poca vegetación. Su relieve lo forma una gran llanura interrumpida por diversas colinas que dan lugar a un paisaje montañoso, situado en su centro, a 690 m de altitud respecto del nivel del mar, y una altitud máxima en algunos municipios del noreste, de 843 m.



Figura 2. Localización de la zona de muestreo (Tomada de Wikimedia HansenBCN, Google map).

La población de la localidad, en los últimos años, ha sido de 303 905 en 2015 y de 301 876 en 2016, periodo de tiempo empleado para el muestreo en el que se ha realizado el estudio. Por otro lado, según los datos obtenidos por la Junta de Castilla y León, uno de cada dos habitantes aproximadamente (47%), tiene vehículo propio, lo cual afectará al tráfico de la ciudad y a la contaminación de fondo de la misma.

Este estudio se realizó utilizando los datos de la Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid (RCCAVA), disponibles a través de su página web. La Red cuenta en la capital con 5 estaciones: Arco de Ladrillo II (Arco de Ladrillo), La Rubia II (La Rubia), Vega Sicilia, Valladolid Sur y Puente Regueral (Figura 3). Esta última estación, Puente Regueral, ha pasado a denominarse este año Puente del Poniente-M.^a Luisa Sánchez, por cumplimiento de la Ley 52/2007, de 26 de diciembre de 2007, en reconocimiento a la labor tanto docente como investigadora de la Profesora M.^a Luisa Sánchez, Catedrática del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valladolid. La estación Valladolid Sur no dispone de datos de concentración de partículas. Todas las estaciones son de tipo tráfico, y de áreas consideradas urbanas o suburbanas (Valladolid Sur).



Figura 3. Situación de las estaciones RCCAVA (Tomada de la página web del Ayuntamiento de Valladolid).

Tabla 4. Caracterización de las estaciones RCCAVA.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Tipo	Tipo área	Zona
Arco de Ladrillo	41,64556	-4,73028	700	Tráfico	Urbana	Residencial
La Rubia	41,63000	-4,74056	683	Tráfico	Urbana	Residencial/Comercial
Vega Sicilia	41,62056	-4,74667	690	Tráfico	Urbana	Residencial/Comercial
Puente Poniente-	41,65611	-4,73389	691	Tráfico	Urbana	Residencial
Valladolid Sur	41,61417	-4,77222	675	Tráfico	Urbana	Residencial

Las estaciones disponen de analizadores automáticos que realizan las medidas de forma continua. Los equipos están conectados a un sistema de adquisición de datos, que permite registrarlos en una base de datos, obteniendo a una frecuencia de 15 minutos, el valor medio de las medidas previas realizadas, almacenándolos y transmitiéndolos al centro de proceso de datos del Ayuntamiento, para su validación. El sistema de comunicación entre las estaciones y el centro de proceso de datos se realiza mediante una red de fibra óptica. En cada estación se dispone de una serie de sensores que permiten monitorizar los contaminantes atmosféricos (Tabla 5).

Tabla 5. Contaminantes analizados en cada estación.

ESTACIÓN	SO2	PM10 / PM2,5	NO/NO2	CO	O3	BTX
Arco Ladrillo		X	X	X		X
Rubia	X	X	X			
Vega Sicilia		X	X		X	X
Puente del Poniente		X	X		X	X
Valladolid Sur			X		X	

Las estaciones de medida son sencillamente laboratorios controlados de forma remota, por lo que deben de reunir una serie de condiciones para proteger los dispositivos y equipos y asegurar la calidad de las medidas. En el interior de estos laboratorios prima la funcionalidad, además de la estabilidad térmica. Por ello, disponen de climatizadores automáticos en su interior que les otorgan una temperatura de unos $20 \pm 5^\circ \text{C}$ para respetar las especificaciones de funcionamiento de los dispositivos de su interior. En la Figura 4 se muestran el aspecto exterior de una estación de contaminación y un esquema de la disposición de los equipos de medida en su interior.



Figura 4. Imagen exterior y plano interior de una estación de medida (Tomada de informes del Ayuntamiento de Valladolid y de la Junta de Castilla y León).

3.2. BASE DE DATOS

Los datos utilizados para este estudio corresponden a las concentraciones de las fracciones de partículas PM10 y PM2,5 facilitados por la Red de Control de la Contaminación Atmosférica, RCCAVA, ya mencionada anteriormente, en el periodo 2015-2016. Los valores disponibles corresponden a promedios horarios (GMT) que son exportados en formato EXCEL. Cada valor está identificado con una etiqueta para asegurarse de que son datos válidos, o datos no válidos o sometidos a control debido a un mantenimiento de la estación, fallo de tensión o equipo, entre otros. En la Tabla 6 se muestran los porcentajes de datos válidos para cada fracción de partículas.

Tabla 6. Porcentaje de datos válidos en 2015-2016.

Estaciones de medida	Porcentaje válidos PM10 (%)	Porcentaje válidos PM2,5 (%)
Arco Ladrillo	96	94
Rubia	99	86
Vega Sicilia	95	89
Puente Poniente	98	97

También, se analizó el comportamiento de otros contaminantes con el material particulado dependiendo de la estación de muestreo: óxidos de nitrógeno (NO y NO₂)

que proceden principalmente del tráfico rodado; CO, formado principalmente por una combustión incompleta de combustibles; O₃, es el principal oxidante fotoquímico secundario; SO₂, producido en el quemado de combustibles fósiles y otros procesos naturales.

3.3. MÉTODOS DE MEDIDA

Los sensores de medida de las estaciones realizan el análisis del aire siguiendo la técnica oficial establecida en las normas reguladoras o métodos de referencia. Son analizadores automáticos y realizan la medida de forma continuada en el tiempo, excepto los captadores secuenciales para la medida de partículas de la estación Arco de Ladrillo. De este modo, la técnica de medida utilizada en el sensor de SO₂ es la fluorescencia ultravioleta, para el NO/NO₂, la quimioluminiscencia; la técnica aplicada para el CO es la espectrometría infrarroja no dispersiva y para el O₃, la fotometría ultravioleta.

A continuación, se explican con más detalle los dos métodos de medida y muestreo utilizados en las estaciones de muestreo para las partículas PM₁₀ y PM_{2,5} el primero de ellos automático, y el segundo manual de gran utilidad para la comprobación de que las medidas son realizadas de forma correcta por el anterior.

ATENUACIÓN POR RADIACIÓN BETA

Es empleado para obtener la concentración del material particulado (PM₁₀, PM_{2,5}) (UNE-ISO 10473). Se utiliza para ello un elemento radiactivo, como, por ejemplo, el carbono 14, que irradia electrones con una alta energía (radiación beta). Esta radiación se hace pasar por un vidrio y es detectada y cuantificada por un detector de tipo centelleo para dar la lectura inicial, tras ello una bomba de vacío (u otros métodos de succión) toman una cantidad de aire-polvo del ambiente a examinar y lo conducen al vidrio inicialmente limpio “ensuciándolo”.

Esta muestra se vuelve a irradiar con los rayos beta y se realiza una lectura de la radiación, que será menor por la cantidad de polvo que exista en el vidrio. A través de esta atenuación de la señal se puede hallar la masa de las partículas depositadas en el vidrio, así como saber la concentración volumétrica a partir del flujo, presión y temperatura del área de muestreo.

GRAVIMETRÍA

El método gravimétrico es el usado de referencia para hallar los niveles de PM10 y PM2,5 del ambiente (UNE-EN 12341:2015). Para ello se muestrea durante 24h a caudal fijo utilizando un captador secuencial. Consiste en exponer un filtro en el área de muestreo donde se retiene el material particulado, PM, con diferentes cabezales de corte seleccionando solamente el material con las medidas deseadas para el estudio en cuestión y tras ello por un método relativamente sencillo a través de conocer el peso antes y después del filtro de muestreo y dividiendo por el volumen total, se encontrará la concentración del material deseado.

3.4. CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El clima de la localidad es típicamente mediterráneo, como veremos en más detalle a continuación; con una temperatura media mensual en julio y agosto que supera ligeramente los 22 °C de forma habitual en la parte urbana, y otras más tenues en los municipios más alejados y de mayor altitud, obteniendo un clima de veranos suaves.

Estas temperaturas están reguladas en gran medida por su ubicación, el centro de la cuenca sedimental del Duero, donde la localidad está prácticamente rodeada por montañas que la aíslan del mar, ocasionando un ambiente extremo y seco, lo que cabría esperar para dicha altitud y con un mar tan próximo, como es el Cantábrico. El rango de temperaturas oscila entre los -4,3° C de mínima del día 1 de enero de 2015 hasta los 39,2° C de máxima del día 29 de junio de ese mismo año, mientras que las medias mensuales oscilan entre 4 ° C en invierno y 24-25 ° C en los meses de verano. Los datos meteorológicos han sido obtenidos de [Meteomanz.com](http://meteomanz.com), siendo su principal fuente de datos el servidor de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). En la Figura 5 están representadas la temperatura y la precipitación de Valladolid para el período de muestreo.

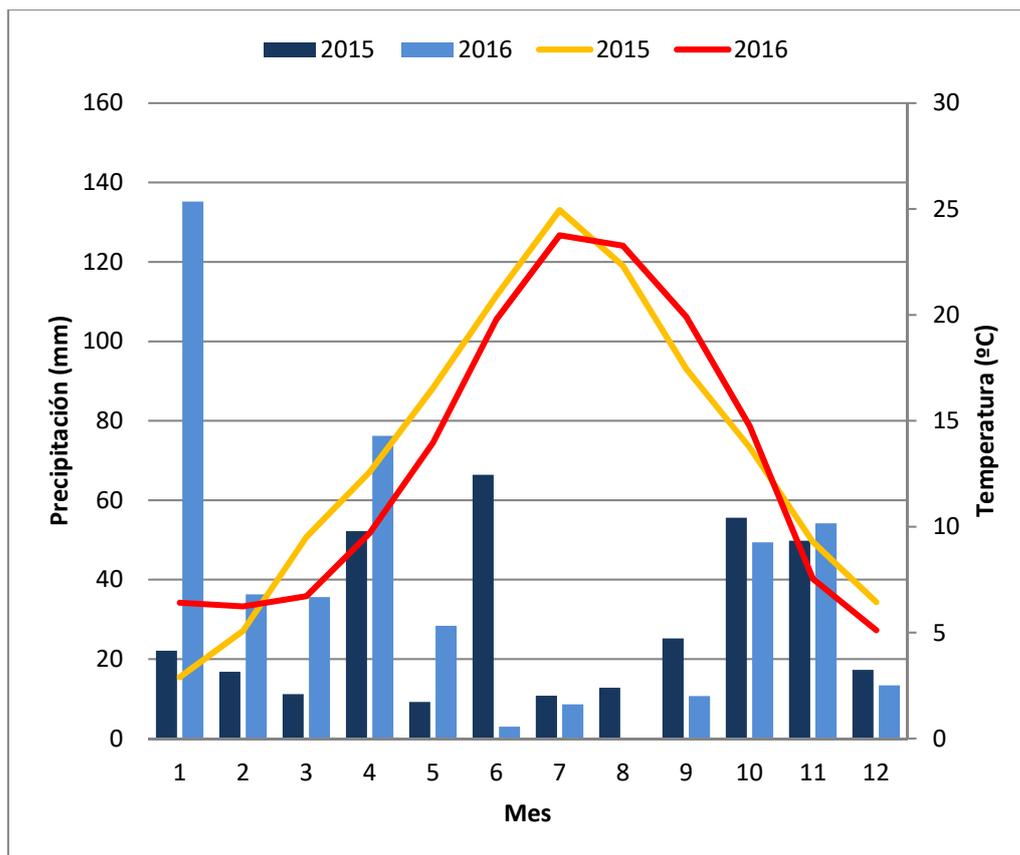


Figura 5. Climograma de Valladolid en el período 2015-2016.

Como se puede observar, las precipitaciones están bastante distribuidas a lo largo de todo el año, exceptuando una temporada algo más seca durante los meses de verano junio-julio-agosto en 2016 y mucho más abundante en enero de ese mismo año, donde supera los 130 mm. De la misma forma, durante el 2015, están algo más distribuidas, sin que ninguna supere los 70 mm, pese a que algunos meses sean más secos, como es el caso de marzo-mayo-julio. La precipitación acumulada para cada año de estudio es 349,2 y 451 mm para 2015 y 2016, respectivamente, lo que se encuentra muy cerca del promedio de la serie histórica de 30 años de la localidad, que ronda los 430 mm, siendo 2015 un año algo menos lluvioso de lo habitual.

Analizando la rosa de los vientos de 8 sectores obtenida para el periodo de estudio en Valladolid (Figura 6), se puede observar que los vientos más fuertes proceden del oeste. El porcentaje obtenido para cada uno de los sectores de la dirección del viento (Figura 7) indica que el norte es el más común, 29% en 2015 y 32% en 2016, seguida de la oeste para el año 2015 con un valor de 19% y de la entrada suroeste para 2016 alcanzando el 17%. El resto de direcciones van perdiendo importancia hasta llegar a la este, con solo un 1,37% en 2015 y un 0,82% en 2016.

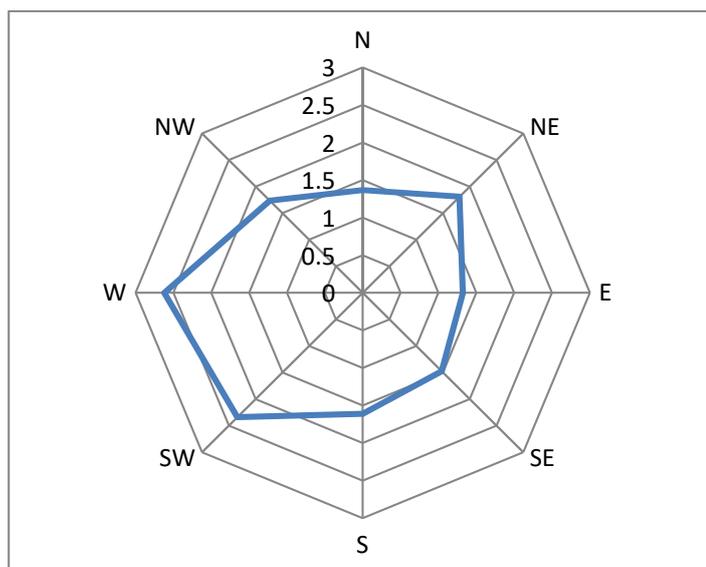


Figura 6. Rosa de los vientos Valladolid, 2015-2016.

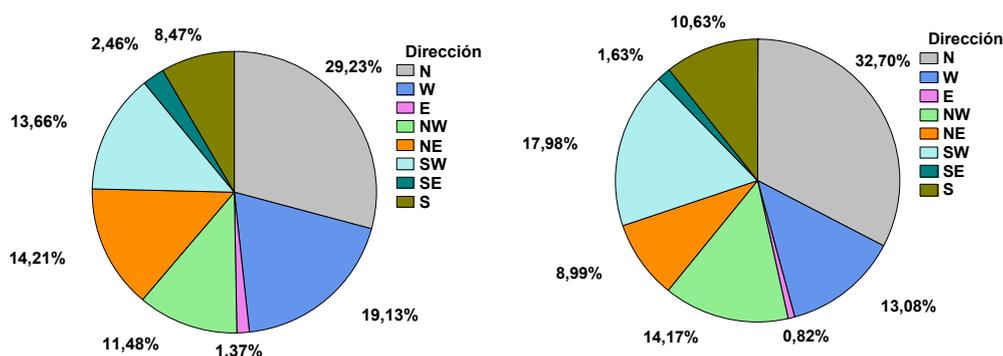


Figura 7. Porcentajes de viento en función de la dirección. Gráfico de sectores del año 2015 (izquierda), gráfico de sectores año 2016 (derecha).

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico expuesto más adelante (Sección 4) se ha utilizado el software STATGRAPHICS, que es una plataforma de análisis gráfico y estadístico. Con ello se han calculado media, mediana, desviación típica, error estándar, cuartiles, análisis de varianza (ANOVA), y se ha utilizado como exposición gráfica los gráficos de cajas y bigotes (box and whisker plot) para una visualización de los resultados.

A continuación, se definen los siguientes estadísticos de posición, centralización y dispersión utilizados para caracterizar la distribución de los datos analizados y su interpretación (Spiegel y Stephens, 2014; Devore, 2015).

- **Media:** La media (promedio o media aritmética) de un conjunto de datos (x_1, x_2, \dots, x_n) es una medida de posición central de estos. La definimos como el valor característico de la serie de datos resultado de la suma de todas las observaciones dividido por el número total de datos.

$$\text{Media } (\bar{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Siendo x cada factor de nuestra serie de datos que contiene n valores.

- **Mediana:** Es el valor que ocupa el lugar central de todos los datos cuando estos están ordenados de menor a mayor. Es una medida robusta de la tendencia central de la distribución de los datos. No se ve afectada por valores extremos.
- **Desviación típica:** Es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Siendo \bar{x} la media aritmética, x_i cada uno de los datos del muestreo y n la cantidad de datos.

- **Error estándar:** El error estándar de la media es el valor que muestra las oscilaciones de la media muestral (media de los datos) alrededor de la media poblacional (verdadero valor de la media). Se suele estimar de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Siendo n el tamaño de la muestra, y s la desviación típica.

- **Cuartiles:** Son valores que dividen una muestra de datos (ordenada) en cuatro partes iguales. Utilizando cuartiles se puede evaluar rápidamente la dispersión y la tendencia central de un conjunto de datos.

Tabla 7. Definición cuartiles y rango intercuartílico.

Cuartil	Descripción
1ºcuartil (Q1)	25% de los datos es menor que o igual a este valor.
2ºcuartil (Q2)	La mediana, 50% de los datos es menor que o igual a este valor.
3ºcuartil (Q3)	75% de los datos es menor que o igual a este valor.
Rango intercuartílico	La distancia entre el primer 1er cuartil y el 3er cuartil (Q3-Q1); de esta manera, abarca el 50% central de los datos.

- **Percentiles:** Son aquellos valores P_k (con $k = 1, 2, \dots, 99$) que dividen la muestra en 100 partes iguales. Es decir, el percentil P_k deja por debajo de él al k por ciento de la muestra de datos ordenada.
- **Análisis de la varianza (ANOVA):** El análisis de varianza (ANOVA) de un factor nos sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. Esta prueba es una generalización del contraste de igualdad de medias para dos muestras independientes. Supuestas k poblaciones independientes, las hipótesis del contraste son siguientes:
 1. $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$ Las medias poblacionales son iguales.
 2. $H_1 \neq H_2$ Al menos dos medias poblacionales son distintas.

Para realizar el contraste ANOVA, se requieren k muestras independientes de la variable de interés. Una variable de agrupación denominada Factor clasifica las observaciones de la variable en las distintas muestras.

- **Gráficos de cajas y bigotes:** es un gráfico que está basado en cuartiles y mediante el cual se puede ver la distribución de un conjunto de datos (Figura 8). Está compuesto por un rectángulo (la caja) y dos brazos (los «bigotes»). Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y

máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución.

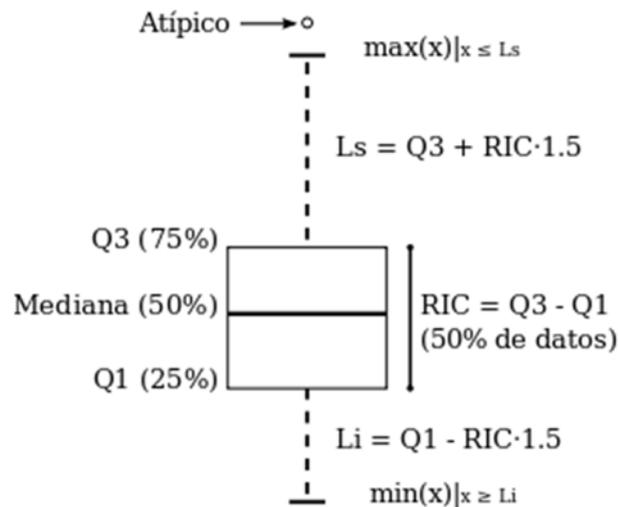


Figura 8. Muestra el esquema de un box and whisker plot, señalando la mediana, el primer y tercer cuartil, el rango intercuartílico (RIC) y los límites superior e inferior con la fórmula que les define.

3.6. METODOLOGÍA APLICADA A LAS MASAS DE AIRE

El método usado para analizar las masas de aire en las que residen las partículas en suspensión a estudiar en este muestreo será un análisis de trayectorias realizado mediante el modelo HYSPLIT, así como una valoración cualitativa utilizando mapas de satélite del Índice de Aerosoles y de polvo en superficie. Además, el análisis de las situaciones meteorológicas sinópticas permite identificar determinadas condiciones para la dispersión o no del material particulado.

1. Análisis de trayectorias

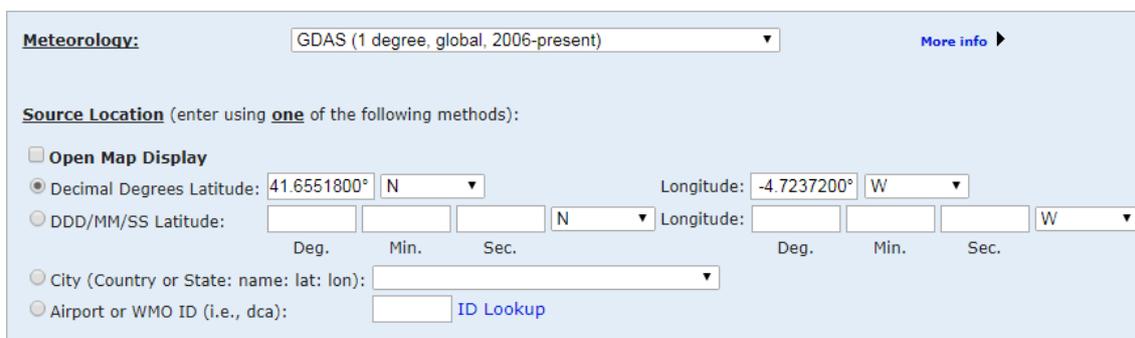
El movimiento de las masas de aire fue analizado utilizando el Modelo HYSPLIT 4 (Hybrid Single-ParticlesLagrangian Integrated Trajectories (Draxler and Rolph, 2003; Rolph et al., 2017)). Este modelo de trayectorias es un sistema completo de computación que divide la atmosfera en pequeñas parcelas para poder estudiar su transporte, dispersión, transformación química, etc., y crear así pequeñas simulaciones de estos fenómenos. HYSPLIT sigue siendo uno de los métodos más utilizados por la comunidad científica de la atmósfera, tanto para analizar los modelos de transporte

como los de dispersión. Una aplicación común de este método es la realización de retrotrayectorias para determinar el origen de las masas de aire y establecer posibles vínculos entre fuente-receptor. Este modelo ha sido utilizado satisfactoriamente en muchos estudios para valorar la influencia del transporte a larga distancia en los niveles de concentraciones de partículas (Querol et al., 2013), así como de otros contaminantes atmosféricos (García et al., 2016).

El método de cálculo del modelo es un híbrido entre el enfoque Lagrangiano, utilizando un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y difusión a medida que las trayectorias o paquetes de aire se mueven desde su localización inicial, y la metodología Euleriana que utiliza una cuadrícula tridimensional fija como marco de referencia para calcular las concentraciones de aire contaminante

HYSPLIT muestra la trayectoria seguida por diversas masas de aire por el paso del tiempo según el interés y los parámetros utilizados, por lo que se puede seguir las masas de aire hasta su procedencia varios días atrás y confirmar si pudieron o no arrastrar contaminantes a nuestro entorno elevando así las concentraciones de PM10 Y PM2,5.

A continuación, se muestra el procedimiento utilizado con el modelo. En primera instancia debemos introducir las coordenadas de nuestra localización:



The image shows a web-based interface for the HYSPLIT model. At the top, there is a 'Meteorology' dropdown menu currently set to 'GDAS (1 degree, global, 2006-present)'. Below this, the 'Source Location' section is active, with a note to 'enter using one of the following methods'. There are four radio button options: 'Open Map Display' (unchecked), 'Decimal Degrees Latitude' (selected), 'DDD/MM/SS Latitude', and 'City (Country or State: name: lat: lon):'. The 'Decimal Degrees Latitude' option has input fields for '41.6551800°' and a dropdown for 'N'. The 'Longitude' field has input for '-4.7237200°' and a dropdown for 'W'. The 'DDD/MM/SS Latitude' option has three input fields for 'Deg.', 'Min.', and 'Sec.', followed by a dropdown for 'N'. The 'Longitude' option has three input fields for 'Deg.', 'Min.', and 'Sec.', followed by a dropdown for 'W'. There is also a dropdown for 'City (Country or State: name: lat: lon):' and an 'Airport or WMO ID (i.e., dca):' field with an 'ID Lookup' button.

Figura 9. Selección de coordenadas a estudio en HYSPLIT.

Posteriormente, se selecciona el periodo de estudio en el que se quiere seguir la trayectoria, la semana y día que queremos analizar, así como la duración de la retrotrayectoria (ya que son trayectorias hacia el pasado de la masa a estudio como indicaremos en el panel) y las alturas a las que se quiere analizar las masas de aire “a” o “sobre” el nivel del mar. A mayores existen diversos parámetros que se pueden aplicar dependiendo de la intención del usuario, así como la finalidad del proyecto.

2. Mapas de Índices de Aerosoles

Constituyen una herramienta muy útil para evaluar los aerosoles absorbentes en la región espectral ultravioleta detectando su presencia (hollín, polvo) y un complemento a los modelos de transporte de las masas de aire. Los mapas de índices de aerosoles OMI consultados se pueden obtener en: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. El OMI (Ozone Monitoring Instrument) es uno de los sensores de que dispone el satélite EOS-Aura de la NASA, lanzado en julio de 2004 y cuyo objetivo es el estudio de la química y dinámica atmosférica, con especial dedicación al ozono, la calidad del aire y el clima. El índice de aerosoles está basado en un método de contraste espectral en una región del ultravioleta (UV) donde la absorción del ozono es muy pequeña. El software permite seleccionar la fecha, la zona y las variables de interés.

3. Mapas de polvo en superficie

Otra herramienta utilizada para el análisis de los aerosoles son los mapas de polvo en superficie que representan espesor óptico de polvo o la concentración del mismo. Estos mapas se pueden obtener a partir de simulaciones con un modelo en la página sds-was.aemet.es/forecast-products/dust-forecasts/sds-was-and-icap-ensemble-forecasts. Pertenece al Sistema de Asesoramiento y Evaluación de Advertencias de Tormentas de Arena y Polvo (SDS-WAS). Existe cooperación entre diferentes centros, como el Barcelona Dust Forecast Center, gestionado conjuntamente por AEMET y por el Barcelona Supercomputing Center, que produce y distribuye diariamente predicciones del contenido de polvo en la atmósfera para el Norte de África, Oriente Medio y Europa. Se selecciona la fecha de interés y se pueden obtener animaciones correspondientes a la evolución del polvo en superficie.

4. Situaciones meteorológicas sinópticas

Los mapas meteorológicos sinópticos disponibles en el Centro Meteorológico Alemán (www.wetterzentrale.de) y del Centro para el diagnóstico del clima de la NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov>) fueron útiles para caracterizar el estado de la atmósfera y discernir los patrones atmosféricos que afectan la zona de estudio,

principalmente en situaciones que condicionan el movimiento de las masas de aire y que contribuyen al aumento de las fracciones de partículas. De esta forma se pueden identificar situaciones que dificultan la dispersión de las partículas y otras situaciones de aporte natural.

4. RESULTADOS

4.1. VARIACIÓN TEMPORAL Y RELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS PM10 Y PM2,5

Se realizó un análisis de la concentración de partículas PM10 y PM2,5 en las cuatro estaciones de muestreo de La Red de Control de la Contaminación Atmosférica de Valladolid, así como de diferentes variaciones temporales y relaciones con otros contaminantes atmosféricos y entre ellas. La Tabla 8 muestra los principales estadísticos para el periodo de estudio, 2015-2016.

Tabla 8. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de Arco de Ladrillo en el período 2015-2016.

Arco de Ladrillo	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Media	17,63	10,49
Mediana	15,00	8,00
Desviación Típica	13,61	9,43
Error estándar	0,10	0,07
Máximo	225,00	97,00
Mínimo	1,00	1,00
Primer cuartil	9,00	4,00
Tercer cuartil	23,00	14,00
Rango intercuartílico	14,00	10,00
Percentil 95	41,00	28,00

Tabla 9. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de La Rubia en el período 2015-2016.

La Rubia	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Media	17,49	14,81
Mediana	15,00	12,00
Desviación Típica	13,88	9,34
Error estándar	0,11	0,08
Máximo	227,00	131,00
Mínimo	1,00	1,00
Primer cuartil	8,00	9,00
Tercer cuartil	23,00	19,00
Rango intercuartílico	15,00	10,00
Percentil 95	40,00	32,00

Tabla 10. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de Vega Sicilia en el período 2015-2016.

Vega Sicilia	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Media	15,32	9,44
Mediana	13,00	7,00
Desviación Típica	11,94	8,63
Error estándar	0,09	0,07
Máximo	191,00	108,00
Mínimo	2,00	1,00
Primer cuartil	7,00	4,00
Tercer cuartil	20,00	12,00
Rango intercuartílico.	13,00	8,00
Percentil 95	35,00	26,00

Tabla 11. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de Puente del Poniente en el período 2015-2016.

Puente Poniente	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2,5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Media	17,33	8,93
Mediana	14,00	6,00
Desviación Típica	13,25	9,02
Error estándar	0,10	0,07
Máximo	206	104,00
Mínimo	1,00	1,00
Primer cuartil	8,00	2,00
Tercer cuartil	22,00	12,00
Rango intercuartílico	14,00	10,00
Percentil 95	41,00	27,00

Mediante estos datos podemos incluir el valor medio de cada año para cada estación y su desviación típica (Tablas 12 y 13).

Tabla 12. Concentración media anual de PM10.

Año	Arco Ladrillo	La Rubia	Vega Sicilia	Puente Poniente
2015	18,16±10,42	17,78±10,12	16,72±9,69	18,94±10,21
2016	17,06±10,56	17,22±11,14	13,87±8,42	15,82±10,04

Tabla 13: Concentración media anual de PM2,5.

Año	Arco Ladrillo	La Rubia	Vega Sicilia	Puente Poniente
2015	10,73±8,18	15,19±8,39	10,24±7,57	9,75±7,68
2016	10,80±6,59	15,21±6,97	8,84±4,95	8,33±6,36

Se observa que en todas las estaciones el rango de concentración para PM10 es alto. El valor medio de las concentraciones es aproximadamente $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto en Vega Sicilia, $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ inferior. El percentil 95 es alrededor de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto en La Rubia, $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Si se considera la fracción PM2,5 los valores medios varían en mayor medida, oscilando entre $8,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenido en Puente del Poniente y $14,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia. El percentil 95 obtenido es mayor en La Rubia, $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ comparado con el resto de estaciones, $26-28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, poniendo atención a los máximos estadísticos del estudio vemos que sobrepasan en gran medida el límite establecido, por lo que debemos prestarles especial atención y proceder a estudiar si son consecuencia de alguna actividad antropogénica o si es algo natural, como intrusiones consecuencias del transporte a larga distancia de partículas en suspensión desde África o Europa.

Además, como podemos observar en la comparativa interanual, en todas las estaciones no se superó el valor límite anual recomendado por la normativa, $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5. En 2015 hubo mayores niveles de PM10 en todas las estaciones llegando a diferenciarse en $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de las obtenidas en 2016, como es el caso de Puente del Poniente. Así mismo, las concentraciones de PM2,5 son prácticamente idénticas en ambos años para Arco Ladrillo y La Rubia y superan en $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las del 2016 para Vega Sicilia y Puente del Poniente. También, cabe destacar que los resultados obtenidos pueden estar relacionados con las intrusiones de aire anuales y su intensidad, así como las condiciones meteorológicas, actividades humanas, lo que puede inducir esa variación en la media anual del material particulado atmosférico más grueso.

4.1.1. EVOLUCIÓN ESTACIONAL

Se ha realizado el análisis estacional de las concentraciones de partículas mediante un análisis de la varianza y así, poder obtener algunas conclusiones de cómo varían las concentraciones en función de los meses durante el período de estudio (Figuras 12 y 13).

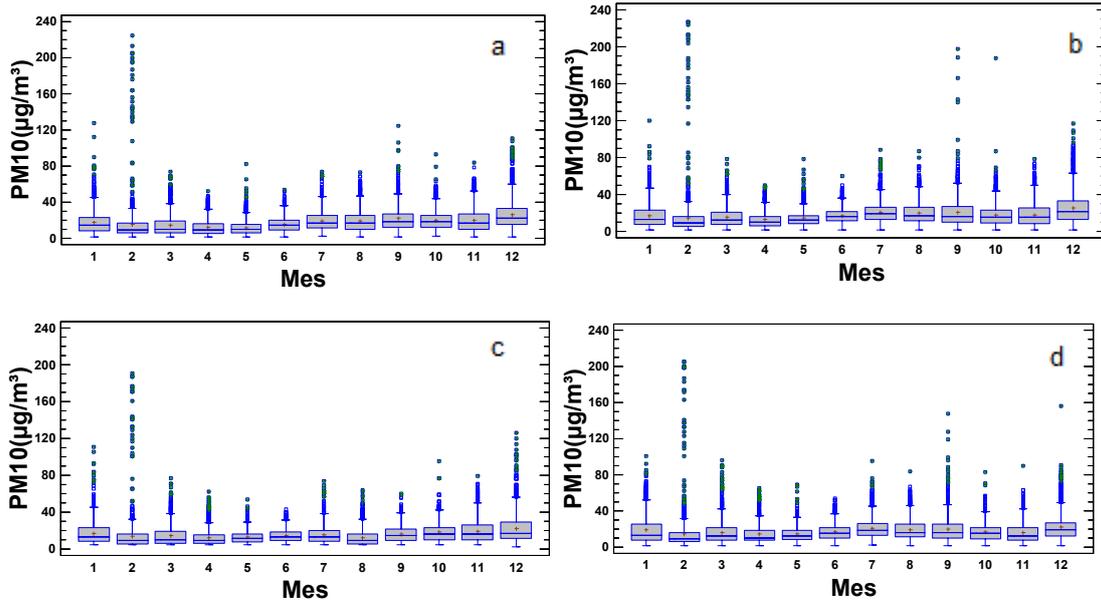


Figura 12. Evolución anual de las concentraciones de PM10 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.

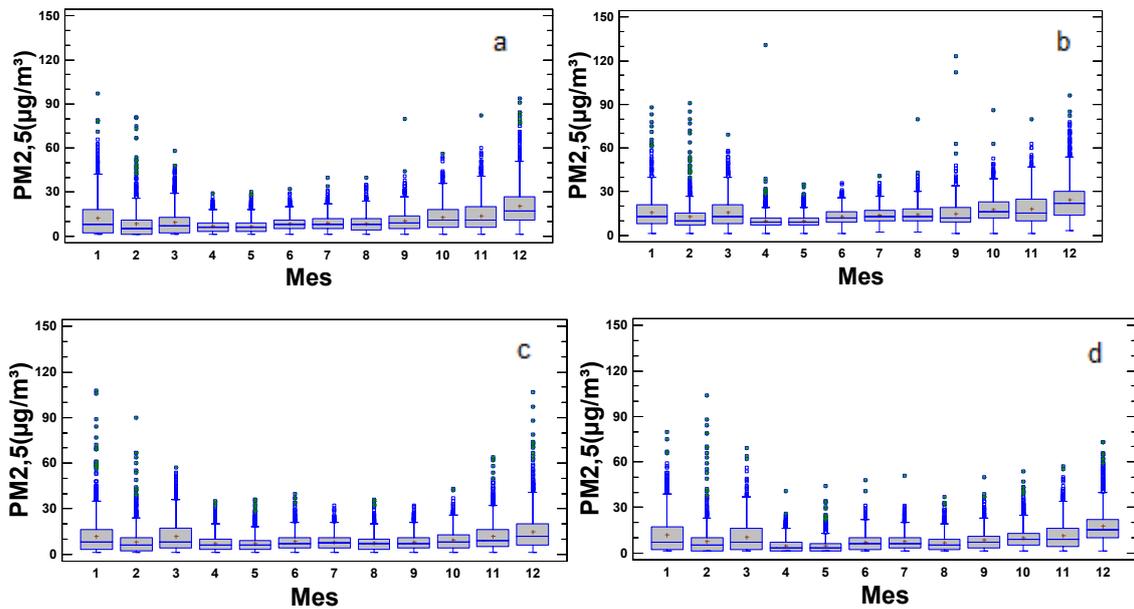


Figura 13. Evolución anual de las concentraciones de PM2,5 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.

La evolución anual de las partículas de PM10 muestra en todas las estaciones que los valores medios más altos se registran en los meses de otoño e invierno, con valores en diciembre de 26,2 y 24,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo y La Rubia, así como alrededor

de $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y Puente del Poniente. Las condiciones típicas estacionales del invierno se caracterizan por unas fuertes inversiones térmicas en la superficie y una reducción considerable de la capa de mezcla contribuyendo al estancamiento atmosférico. Como consecuencia hay una menor capacidad dispersiva en la atmósfera (Artiñano et al., 2001; Viana et al., 2003). Se produce una mayor acumulación y concentración de contaminantes en las estaciones urbanas o suburbanas (por tráfico, calefacciones), así como en las industriales, creando un máximo invernal y dando concentraciones más altas que el resto de estaciones del año. Se observa en febrero muchos valores atípicos como consecuencia del aporte natural de polvo africano. Los mínimos valores medios se obtuvieron en primavera, abril y mayo. Se puede destacar los $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en todas las estaciones de muestreo, excepto en Puente del Poniente con $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de abril. Esto puede estar relacionado con la inestabilidad atmosférica y con la mayor precipitación registrada este mes en los dos años. Existe una relación inversa entre la concentración de partículas y la precipitación ya que se produce un lavado atmosférico, siendo un proceso eficiente de eliminación de partículas. Además, períodos de lluvia dan lugar a bajos niveles de partículas, no solo durante la lluvia, sino también en un periodo tras ella ya que se inhiben procesos como la resuspensión. Por otra parte, la menor precipitación, la mayor resuspensión de las partículas y la formación mediante procesos fotoquímicos de partículas secundarias contribuyeron a un aumento de las concentraciones de la fracción PM10 en los meses de verano. Significativo es el aumento en su valor medio, hasta $4\text{-}5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en todas las estaciones, excepto en Vega Sicilia, $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La fracción de partículas PM2,5 muestra una evolución similar al de PM10. El valor medio máximo obtenido en diciembre varía entre las estaciones., aproximadamente $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia, $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo, $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente y alrededor de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia. Respecto al valor mínimo de los meses abril-mayo, La Rubia presenta el valor mayor, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, similar el de Arco de Ladrillo y Vega Sicilia, $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente.

4.1.2. EVOLUCIÓN DIARIA

A continuación, se ha realizado un estudio sobre la evolución temporal en función de las horas del día de las concentraciones en el período de estudio. En las Figuras 14 y 15 se muestra en un gráfico de cajas y bigotes la evolución diaria de las concentraciones

de partículas en cada estación. Así, se puede observar de forma más detallada los datos estadísticos de estas concentraciones, así como la media, la mediana, los tres cuartiles, y permite visualizar la dispersión y simetría de los datos. También, se observan ciertos puntos extremos atípicos.

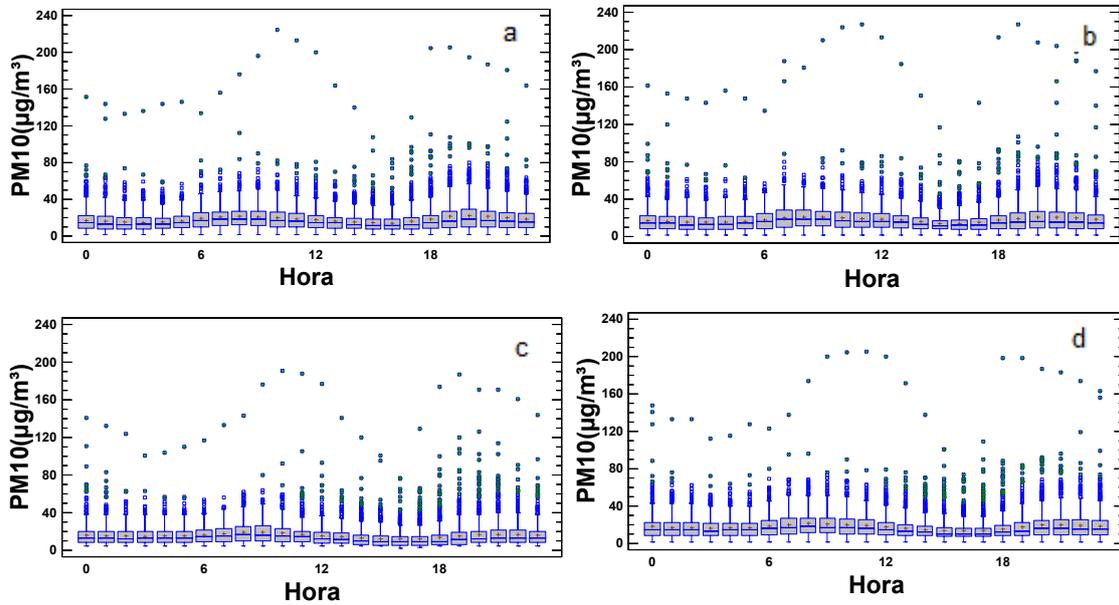


Figura 14. Evolución diaria de las concentraciones de PM10 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.

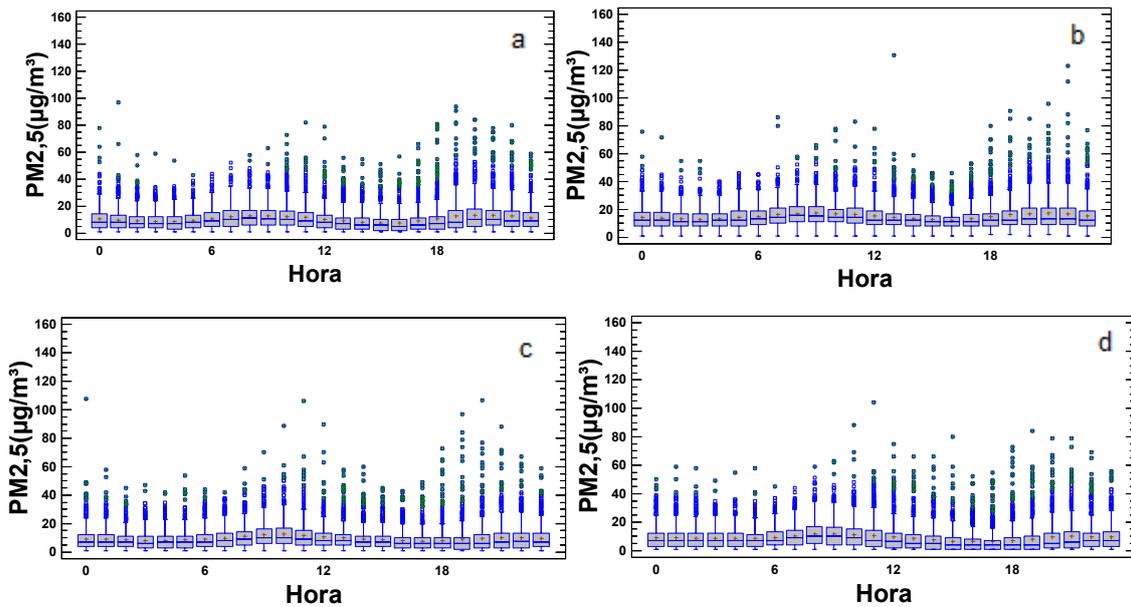


Figura 15. Evolución diaria de las concentraciones de PM2,5 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.

Como se puede observar los valores medios horarios de las concentraciones de PM10 presentan dos máximos bien definidos, uno sobre el intervalo 8:00-9:00 horas por la mañana y el otro a las 20:00-22:00 horas por la noche, principalmente cuando puede influir la actividad de la población y el tráfico, pues son los momentos de inicio de trabajo y final de jornada de muchos habitantes de la localidad. Sin embargo, se pueden apreciar algunas singularidades. En el intervalo de la mañana, el valor medio de la concentración de PM10 es de aproximadamente $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ inferior en Vega Sicilia. Considerando el intervalo nocturno, en Arco de Ladrillo y la Rubia se registra un valor medio de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y alrededor de 17 y $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y Puente del Poniente. Respecto a las concentraciones de PM2,5, los valores medios más altos también se obtienen aproximadamente en las mismas franjas horarias. Por la mañana, la Rubia presenta los valores medios más altos, alrededor de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el resto de estaciones $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el intervalo del máximo nocturno, se registran unos valores medios de 17 y $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia y Arco de Ladrillo y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el resto de estaciones. Los valores medios más bajos se detectaron 3:00-4:00 horas de la mañana y 15:00-16:00 horas por la tarde. El rango de valores medios de PM10 fue entre $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia a las 16:00 horas hasta $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente a las 3.00-4:00 horas de la mañana. Para PM2,5 los valores medios oscilaron entre $6-8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto para La Rubia con valores mucho más altos, $12-13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, se observan valores atípicos que pueden llegar hasta $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10. Por otra parte, los valores extremos de PM2,5 han superado en la Rubia los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en las demás estaciones han llegado hasta $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Si se consideran los valores medios diarios, el número de superaciones en 2015 y 2016 de PM10 y PM2,5 según la normativa vigente de forma diaria para PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y según la OMS para PM2,5 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) son los que se muestran en las Tablas 14 y 15.

Tabla 14. Numero de superaciones de los niveles diarios de PM10.

Año	Arco Ladrillo	La Rubia	Vega Sicilia	Puente P.
2015	7	7	4	5
2016	3	4	2	2

Tabla 15. Numero de superaciones de los niveles diarios de PM2,5.

Año	Arco Ladrillo	La Rubia	Vega Sicilia	Puente P.
2015	27	37	23	18
2016	17	39	4	9

4.1.3. EVOLUCIÓN SEMANAL

Otro de los aspectos importantes en el estudio de la contaminación atmosférica de una zona urbana es la evolución semanal de las concentraciones de PM10 y PM2,5. Se ha diferenciado entre días laborables y fines de semana para poder observar las posibles discrepancias entre ambos por los cambios de actividad de la población en estos dos periodos y se han considerado los valores medios diarios. Se puede apreciar en la Tabla 16 una disminución de los niveles de PM10 en fin de semana respecto al valor medio de los días laborables de la semana principalmente asociado a una reducción de las actividades antropogénicas, en especial del tráfico. El valor medio los días laborables es aproximadamente 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en todas las estaciones, excepto en Vega Sicilia, alrededor de 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante el fin de semana, sobre 16 y 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La mayor variación se produce en la estación de La Rubia, 17%, y la menor en Vega Sicilia y Puente del Poniente, 14%. Considerando la fracción PM2,5, se encuentra mayor variabilidad los días laborables, entre 9,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente hasta 15,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia. El rango de los valores medios de la concentración el fin de semana está comprendido entre 8,3 y 13,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en las mismas estaciones, respectivamente. La mayor reducción, también se observa en La Rubia, 12%, aunque ligeramente superior a la reducción registrada en el resto de las estaciones de muestreo, 11%. Podemos concluir que ciertamente los niveles de partículas decrecen durante el fin de semana debido fundamentalmente a la reducción del tráfico.

Tabla 16. Concentraciones medias y la desviación típica de PM10 y PM2,5 para días laborables y fin de semana.

Estación	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Fin de semana	Días laborables	Fin de semana	Días laborables
Arco de Ladrillo	15.62±9.69	18.42±10.70	9.88±7.07	11.12±7.54
Rubia	15.24±9.49	18.41±10.95	13.83±7.03	15.73±7.91
Vega Sicilia	13.78±8.11	15.98±9.55	8.80±5.94	9.88±6.67
Puente Poniente	15.52±9.19	18.11±10.54	8.33±6.92	9.32±7.12

4.1.4. RELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS CON OTROS CONTAMINANTES

El análisis de los niveles de partículas PM10 y PM2,5 incluye la evaluación de la correlación entre los contaminantes medidos en cada una de las estaciones de muestreo. La Tabla 17 muestra los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos en la aplicación de un modelo de regresión lineal. En este estudio se ha considerado la concentración diaria de PM10 o PM2,5 y de los otros contaminantes. El coeficiente de correlación puede variar entre -1 a +1, y mide la fuerza de la relación lineal entre las variables, así como la dirección de la dependencia prestando atención al signo.

Tabla 17. Relación entre contaminantes para cada estación de muestreo (nivel de confianza del 99%).

Arco de Ladrillo	NO	NO ₂	CO
PM10	0,592	0,640	0,366
PM2,5	0,769	0,644	0,598

Rubia	SO ₂	NO	NO ₂
PM10	0,180	0,515	0,477
PM2,5	0,190	0,740	0,574

Vega Sicilia	NO	NO ₂	O ₃
PM10	0,606	0,564	-0,422
PM2,5	0,720	0,626	-0,499

Puente Poniente	NO	NO ₂	O ₃
PM10	0,499	0,603	-0,228
PM2,5	0,748	0,696	-0,566

Los resultados muestran que en Arco de Ladrillo existe una relación moderadamente fuerte entre las concentraciones de partículas PM10 y los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, esa relación es débil con las de CO. Los resultados para PM2,5 indican una relación moderadamente fuerte para todos los contaminantes. De la misma manera en La Rubia se encuentran relaciones moderadamente fuertes con los óxidos de nitrógeno para los dos tipos de partículas, pero débil con el otro contaminante medido, el SO₂. En Vega Sicilia, las concentraciones de partículas PM10 y PM2,5 presentaron el mismo comportamiento con los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, existe una relación débil e inversa con las concentraciones de O₃. Finalmente, en Puente del Poniente se obtiene unas relaciones estadísticamente significativas y moderadamente fuertes para PM2,5, incluso con las concentraciones de O₃, aunque esta relación es débil con las concentraciones de PM10.

Los resultados obtenidos nos indican que las concentraciones de la fracción de partículas PM10 no solamente puede ser debido a la contribución local antropogénica, como el tráfico, sino también a otras fuentes, posiblemente alguna industrial, además de

las de origen natural en determinadas épocas del año por el transporte a larga distancia. Los mejores coeficientes de correlación que se obtienen para las partículas PM_{2,5}, más finas, indicarían que su origen son las fuentes antropogénicas, tráfico. Una parte de estas partículas finas tienen un origen secundario y se forman en la atmósfera a partir de los precursores gaseosos mediante procesos químicos.

4.1.5. RELACIÓN ENTRE PM_{2,5} Y PM₁₀

En esta sección se analiza la relación entre la fracción de partículas finas (PM_{2,5}) y las respirables (PM₁₀). La relación PM_{2,5}/PM₁₀ ha sido previamente investigada con datos de diferentes lugares de la Tierra y es muy variable debido a diferencias geológicas, climatológicas y atmosféricas, así como a las fuentes de contaminación que condicionan el tamaño del material particulado medido en diferentes áreas, incluso dentro de la misma ciudad. En España, se obtienen unos valores promedio comprendidos entre 0,40 y 0,74 (Viana et al., 2003; Rojas, 2005).

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de la relación PM_{2,5}/PM₁₀, en las estaciones de muestreo de Valladolid. Los valores están comprendidos entre 0,49 y 0,95. Una relación superior a 0,6 indica que influyen directamente las fuentes de combustión en las partículas gruesas (Querol et al., 2004) más que a una resuspensión de polvo o por la acción del viento. Arco de Ladrillo y Vega Sicilia presentan un valor de 0,62, similar a la obtenida en zonas del norte, noroeste y centro de España, un rango entre 0,6-0,7. En La Rubia se obtiene el valor más alto 0,95. Esto indica que en esta área predominan las partículas antropogénicas finas, superior al del resto de las estaciones de muestreo. En la estación Puente del Poniente se obtiene un valor ligeramente inferior, alrededor de 0,5, lo que caracteriza el tipo de estación que pueda estar influenciada por partículas de granulometría más gruesa y la menor concentración de partículas finas, como también lo habíamos determinado a partir de los estadísticos de las concentraciones de partículas. La relación PM_{2,5}/PM₁₀ promedio es 0,67 considerando todas las estaciones.

Por otra parte, los coeficientes de correlación de Pearson del ajuste lineal realizado a partir de las concentraciones diarias de las fracciones PM₁₀ y PM_{2,5}, aunque presentan una relación fuerte, no son lo suficientemente buenos, están comprendidos entre 0,792 y 0,831 obtenidos en Arco de Ladrillo y Vega Sicilia, respectivamente. Por lo tanto, no se puede determinar que el aumento o disminución de

las fracciones PM_{2,5} y PM₁₀ pueden ser debidos al mismo fenómeno, ni predecir exactamente las concentraciones de PM_{2,5} a partir de las concentraciones de PM₁₀ en estas estaciones.

Tabla 18. Resultados de la relación PM_{2,5}/PM₁₀ de todos los datos y la correlación entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} (nivel de confianza del 99%).

Estación	Relación PM _{2,5} /PM ₁₀	Coefficiente de correlación
Arco de Ladrillo	0.62±0.23	0.792
Rubia	0.95±0.27	0.804
Vega Sicilia	0.62±0.19	0.831
Puente Poniente	0.49±0.20	0.818

4.1.6. RELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS ENTRE ESTACIONES

En esta sección se analiza la relación entre las concentraciones diarias de las partículas del mismo tipo registradas en las diferentes estaciones de muestreo. Para ello se realiza un ajuste lineal obteniéndose los coeficientes de correlación de Pearson que se muestran en las Tablas 19 y 20.

Tabla 19. Coeficientes de correlación del ajuste lineal entre las concentraciones de PM₁₀ de las estaciones de muestreo (nivel de confianza del 99%)

	Arco Ladrillo	La Rubia	Vega Sicilia	Puente Poniente
Arco Ladrillo	1,0000			
La Rubia	0,9639	1,0000		
Vega Sicilia	0,9008	0,8945	1,0000	
Puente Poniente	0,9213	0,9367	0,8748	1,0000

Tabla 20. Coeficientes de correlación del ajuste lineal entre las concentraciones de PM_{2,5} de las estaciones de muestreo (nivel de confianza del 99%).

	Arco Ladrillo	La Rubia	Vega Sicilia	Puente Poniente
Arco Ladrillo	1,0000			
La Rubia	0,9471	1,0000		
Vega Sicilia	0,9169	0,9031	1,0000	
Puente Poniente	0,9486	0,9352	0,9208	1,0000

Los resultados obtenidos indican que existe una relación relativamente fuerte entre los valores medios de las concentraciones de las diferentes estaciones, con coeficientes de correlación de Pearson superiores a 0,9 en la mayoría de los casos. Solamente, los coeficientes son inferiores en la relación de las concentraciones medias de PM₁₀ entre Vega Sicilia- Puente del Poniente y entre Vega Sicilia-La Rubia. Dado que, en general, los modelos lineales obtenidos explican en un porcentaje muy elevado la variabilidad en las variables consideradas, se podría utilizar para la estimación de las otras variables. Es decir, a partir de las concentraciones de partículas en una estación se podría realizar una buena estimación de las concentraciones en las otras estaciones, excepto para los casos menos favorables relacionados con Vega Sicilia.

4.2. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

El impacto de las emisiones antropogénicas y de los procesos naturales en las concentraciones de partículas fue analizado teniendo en cuenta las trayectorias de las masas de aire.

Entre los procesos naturales destacan las intrusiones saharianas producidas cuando las masas de aire que se encuentran sobre el desierto de Sahara se mueven hacia la Península Ibérica ocasionando un aumento de las concentraciones de partículas totales en suspensión en las estaciones de muestreo por la alta carga mineral que contienen.

Ese movimiento de las masas de aire fue analizado utilizando el Modelo HYSPLIT 4 cuyo fundamento teórico fue explicado en la Sección 3.6. Hemos analizado retrotrayectorias de las masas de aire que llegan a Valladolid (Lat: 4, 65° N; Long: 4,72 W). Para la selección de la altura, se considera que la mayoría de los aerosoles están dentro de la capa límite, alrededor de 1,5 km, siendo una altura representativa de la

parte superior de dicha capa y suele ser comúnmente utilizada como límite entre los vientos de superficie y altura (Katsoulis et al., 1999). Por otra parte, los aerosoles procedentes del desierto pueden moverse en altitudes superiores (hasta 5 km) (Escudero et al, 2007; Toledano et al., 2009). Para tener en cuenta dicha consideración se calcularon retrotrayectorias de 5 días a las 12 h para 750, 1500 y 2500 m.s.n.m., siguiendo la metodología similar a la recogida en el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio ambiente (Querol et al., 2013). Estas alturas corresponden a niveles de presión de aproximadamente 900, 850 y 750 hPa, respectivamente.

Las trayectorias fueron clasificadas según 4 orígenes (García et al., 2016), Figura 16:



Figura 16. Discriminación de masas de aire según su procedencia (Modificada de Google).

- *Atlántico (AT)*: Masas de aire cuyo origen se encuentra entre los sectores noroeste y suroeste del Océano Atlántico.
- *Europeo (EU)*: Masas de aire cuyo origen se encuentra en algún lugar sobre Europa y llegan al lugar de muestreo desde el noreste o sureste.
- *Africano (AF)*: Trayectorias que se originan en el continente africano y entran en la Península Ibérica desde el sur, suroeste o sureste.
- *Condiciones Locales (CL)*: Masas de aire confinadas en la Península o en sus proximidades y recorren distancias cortas

La influencia de las trayectorias de las masas de aire en las concentraciones de material particulado se muestra en las Tablas 21 y 22 para cada estación de muestreo. Considerando las partículas PM10, los resultados reflejan que las trayectorias de origen africano son de frecuencia menor y están asociadas a unos niveles superiores de

concentración de partículas en todas las estaciones, a 2500 m en Arco de Ladrillo se obtuvo un valor medio de 27,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las trayectorias de origen Atlántico son de mayor frecuencia y muestran valores similares con todas las alturas (alrededor de 14,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) siendo Vega Sicilia la que presenta un valor medio de alrededor de 1,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menos que el resto de las estaciones. Para las trayectorias europeas, se obtiene un valor medio de aproximadamente 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 750 m (valores entre 18,6 y 19,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 0,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ inferior en 1500 m y 1,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ más bajo en 2500 m para Arco de Ladrillo y Vega Sicilia, así como 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ inferior para Vega Sicilia y Puente del Poniente. Respecto a las trayectorias asociadas a Condiciones Locales, en alturas inferiores se observan valores superiores en todas las estaciones, 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo Vega Sicilia la que registra un valor medio inferior al de otras estaciones, alrededor de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Un análisis de los valores medios de las partículas PM_{2,5} para cada altura refleja un similar comportamiento al de las partículas PM₁₀. Las trayectorias de origen africano presentan las concentraciones más altas en las alturas superiores. También, en las trayectorias de origen Atlántico se obtuvieron concentraciones similares en todas las alturas, un valor medio comprendido entre 6,8 y 12,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente y La Rubia, respectivamente.

Para las trayectorias europeas, se obtiene un valor medio de aproximadamente 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Arco de Ladrillo y Vega Sicilia, para todas las alturas, 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menos para Puente del Poniente y presenta La Rubia un valor más alto, 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En las trayectorias asociadas a Condiciones Locales, también las alturas más bajas van asociadas a mayor concentración, hasta 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia. En la estación de Vega Sicilia y Puente del Poniente las concentraciones fueron menores que en las otras dos.

Tabla 21. Concentraciones de PM10 en función de las trayectorias a diferentes alturas para cada una de las estaciones.

PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/Altura(m)	AF			AT			EU			CL		
	750	1500	2500	750	1500	2500	750	1500	2500	750	1500	2500
Arco de Ladrillo	21,9	25,3	27,9	14,4	14,7	14,9	18,6	17,8	17,5	24,4	24,2	22,4
La Rubia	20,5	24,4	27,6	14,5	14,7	14,9	18,8	17,8	17,4	24,0	24,1	22,1
Vega Sicilia	19,0	22,2	24,4	12,5	12,9	13,1	17,4	16,7	16,3	20,4	19,1	17,8
Puente Poniente	20,4	23,6	26,9	14,1	14,4	14,6	19,7	18,6	18,3	23,5	23,8	21,8

Tabla 22. Concentraciones de PM2,5 en función de las trayectorias a diferentes alturas para cada una de las estaciones.

PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/Altura(m)	AF			AT			EU			CL		
	750	1500	2500	750	1500	2500	750	1500	2500	750	1500	2500
Arco Ladrillo	13,6	16,1	16,9	8,1	8,5	8,8	12,5	12,3	12,3	15,4	14,4	13,2
La Rubia	16,8	20,0	21,4	12,5	12,8	13,2	17,3	16,9	16,8	20,1	19,5	17,5
Vega Sicilia	10,2	13,0	14,2	7,3	7,6	7,9	12,2	11,7	11,6	13,0	12,4	11,2
Puente Poniente	11,1	13,8	14,8	6,5	6,8	7,1	11,0	10,7	10,7	13,4	12,7	11,3

4.2.1 CONTRIBUCIÓN DE INTRUSIONES SAHARIANAS

Las masas de aire africanas, AF, se pueden considerar intrusiones saharianas porque corresponden a masas de aire sobre el desierto del Sahara que se mueven hacia el norte sobre la Península Ibérica. Como consecuencia se produce un aumento de las partículas PM10 y otras partículas en suspensión en las estaciones de muestreo debido a la alta carga mineral de esas masas de aire saharianas (Rodríguez et al., 2001).

Diversos estudios previos han analizado las intrusiones de polvo sahariano que influyen en la Península Ibérica e Islas Canarias (Rodríguez et al., 2001; Viana et al., 2002; Alonso, 2007; Sánchez et al., 2007; Querol et al., 2009; Toledano et al., 2009; Cachorro et al., 2016). El análisis de la serie de datos de partículas PM10 y PM2,5 registradas durante 2015-2016 ha permitido identificar el número de eventos de origen africano sobre los lugares de muestreo, así como su duración y se han calculado las concentraciones que, durante esos días, de los dos años, se registraron en las diferentes estaciones de medida (Tablas 23 y 24). Se han considerado los días con trayectorias de origen africano en alguna de las alturas analizadas.

Tabla 23. Estudio mensual de los eventos de intrusiones saharianas y la concentración de partículas PM10 y PM2,5 obtenida en 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

2015	Nº eventos	Nº días	Arco Ladrillo		Rubia		Vega Sicilia		Puente Poniente	
			PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5
Enero	1	2	25,1	23,6	22,4	21,3	25,2	22,3	31,9	23,0
Febrero	1	2	22,3	16,9	23,8	21,0	22,4	17,5	29,2	16,3
Marzo	2	1	29,5	21,4	32,2	30,7	30,7	23,3	39,0	24,4
		3	13,3	11,8	12,9	16,5	14,1	13,1	18,7	14,0
Abril	1	4	31,8	9,7	32,5	14,9	33,0	12,0	40,1	10,9
Mayo	1	3	23,9	10,5	30,3	17,3	20,4	12,6	31,2	11,1
Junio	2	1	19,2	11,9	18,3	15,7	14,9	11,6	21,1	11,1
		3	26,2	12,9	26,6	19,6	23,4	12,3	28,5	12,4
Julio	2	1	27,2	10,6	31,1	16,8	25,4	9,5	28,8	9,9
		2	24,9	10,1	25,0	15,3	20,0	8,9	26,9	10,0
Agosto	1	2	35,5	9,1	36,9	16,50	28,7	12,6		
Septiembre.	1	2	12,8	5,8	11,6	10,5	12,3	6,5	15,9	4,0
Octubre	4	2	24,8	5,8	19,7	14,3	22,8	8,1	21,4	8,3
		3	17,3	7,3	11,9	13,4	14,5	7,2	12,6	6,5
		3	19,9	11,4	15,9	16,3	16,9	10,3	14,7	10,3
		1	21,3	13,8	16,7	16,2	19,3	10,4	16,8	10,6
Noviembre.	2	2	30,5	20,5	27,5	24,4	31,5	18,7	24,1	17,1
		1	27,8	18,7	24,7	22,3	25,4	16,5	22,1	14,6
Diciembre	4	8	42,8	35,5	42,7	39,3	42,7	31,6	35,2	29,7
		6	44,6	23,3	42,8	27,9	35,2	17,4	38,7	22,9
		1	32,8	18,9	31,9	28,1	27,4	16,5	27,1	19,0
		1	23,0	13,8	20,7	18,2	18,3	12,1	18,8	13,4

Tabla 24. Estudio mensual de los eventos de intrusiones saharianas y la concentración de partículas PM10 y PM2,5 obtenida en 2016 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

2016	Nº eventos	Nº días	Arco Ladrillo		Rubia	Vega Sicilia		Puente Poniente		
			PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5
Enero	1	3	26,2	17,9	24,4	24,1	19,8	13,3	19,7	14,0
Febrero	2	1	25,5	16,7	22,9	21,7	18,3	12,3	19,5	14,9
		2	97,1	28,9	102,5	35,4	84,4	27,2	90,9	34,5
Marzo	0									
Abril	1	1	7,2	7,0	9,3	9,3	8,8	11,3	10,5	20,3
Mayo	2	2	8,0	6,4	7,9	8,6	9,7	5,0	9,8	2,3
		3	6,9	4,9	6,9	7,1	7,2	3,4	7,3	1,6
Junio	1	1	20,3	11,5	28,5	15,7	15,3	9,00	20,8	5,9
Julio	2	4	19,2	10,8	19,4	13,6	11,8	8,7	18,9	7,6
		1	40,5	13,3	46,9	18,4	36,2	14,6	42,2	10,9
Agosto	2	2	25,9	11,1	27,0	18,3	9,7	9,5	25,7	8,1
		3	29,5	16,4	29,7	22,1	15,4	13,3	30,6	13,1
Septiembre	3	1	49,9	18,6	51,7	29,1	25,6	11,9	48,9	16,3
		2	38,0	20,1	40,0	25,4	15,7	11,1	33,1	15,3
		1	26,7	15,3	28,1	21,5	25,9	12,3	24,6	13,2
Octubre	2	1	23,6	19,5	24,8	23,3	25,2	13,5	23,1	14,4
		5	21,2	21,0	24,9	24,7			23,0	16,5
Noviembre	2	4	36,9	28,5	27,1	25,3			26,3	17,4
		4	13,0	12,4	12,9	15,9	15,2	8,7	10,7	8,0
Diciembre	5	2	27,8	22,8	27,0	27,9	29,3	19,9	22,9	14,4
		4	16,1	14,9	14,9	17,5	15,2	10,3	14,4	12,1
		3	24,2	23,5	20,2	23,8	14,8	13,8	21,5	21,1
		1	13,4	13,4	14,3	16,8	11,8	10,9	13,2	13,4
		1	15,0	13,1	14,2	18,5	14,2	12,9	13,8	13,8

La mayor persistencia de los eventos de masas de aire africanas se produjo en abril y diciembre de 2015 con un número máximo de 8 días y en julio y octubre-diciembre de 2016 con un máximo de 5 días de duración. Dentro de ellos se observan algunos días aislados con poco impacto en los niveles de partículas. Las situaciones meteorológicas que, en general, favorecen las intrusiones de masas de aire africano

están caracterizadas por un anticiclón o zona de altas presiones al norte o noreste de África.

A lo largo del año 2015, los eventos de intrusiones de aire africano relevantes por su carga de material particulado, principalmente PM10, se han producido entre 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de los meses; entre 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en marzo, abril, agosto, noviembre y diciembre; $> 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en diciembre con dos eventos persistentes, que no superaron en promedio los 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 (39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2,5). Por otra parte, en 2016 los eventos de intrusiones de aire africano producidos no llegaron a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en abril, mayo, noviembre y diciembre; se han producido entre 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de los meses; entre 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en casos de julio, septiembre y noviembre; $> 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un día aislado de septiembre y en febrero con un episodio en que las concentraciones medias llegaron a 102,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia (en promedio global se superaron los 84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante los dos días en que se registró este fenómeno. Respecto a las concentraciones de PM2,5, estas no experimentaron aumentos notables en los eventos de intrusiones saharianas ocurridas en los meses de verano principalmente, aunque sí experimentaron variación en el episodio de febrero de 2016 y en algunos de otoño-invierno (llegando a 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), aunque solo el 10% de las concentraciones medias supera los 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.2.2. CASO DE ESTUDIO: EPISODIO 21-22 FEBRERO 2016

Uno de los eventos más significativos de influencia de las masas de aire africanas en los niveles de las partículas PM10 y PM2,5 se produjo los días 21-22 de febrero de 2016. Correspondió a un episodio corto que duró 2 días y muy intenso en los que se alcanzaron unas concentraciones promedio de PM10 que oscilaron entre 84,4 y 102,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registradas en Vega Sicilia y La Rubia, respectivamente. Los valores máximos se observaron entre las 16:00 horas del día 21 hasta las 17:00 horas del día 22, con dos picos a las 18:00-19:00 horas y a las 10:00-11:00 horas, llegando a alcanzar los 225 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo y La Rubia y alrededor de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y Puente del Poniente (Figura 17). También, se reflejó en las partículas PM2,5 registrándose unos valores promedio altos entre 27,2 y 35,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y La Rubia, respectivamente. El día 22 los valores estuvieron comprendidos entre 36,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la Rubia y 29,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo. Los máximos valores se produjeron aproximadamente en las mismas franjas horarias. El pico del día 21 mostró unos valores

comprendidos entre $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Vega Sicilia y $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de La Rubia y el segundo pico superó ligeramente los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente, no llegó a alcanzarse en Vega Sicilia y no superó los $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo y La Rubia (Figura 18).

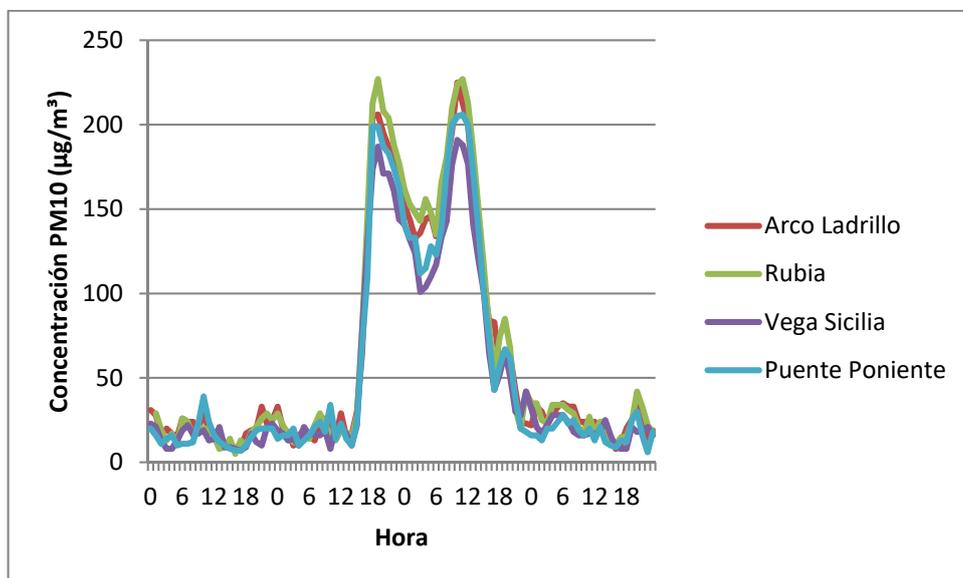


Figura 17. Concentración horaria de partículas PM_{10} los días 20-23 de febrero de 2016.

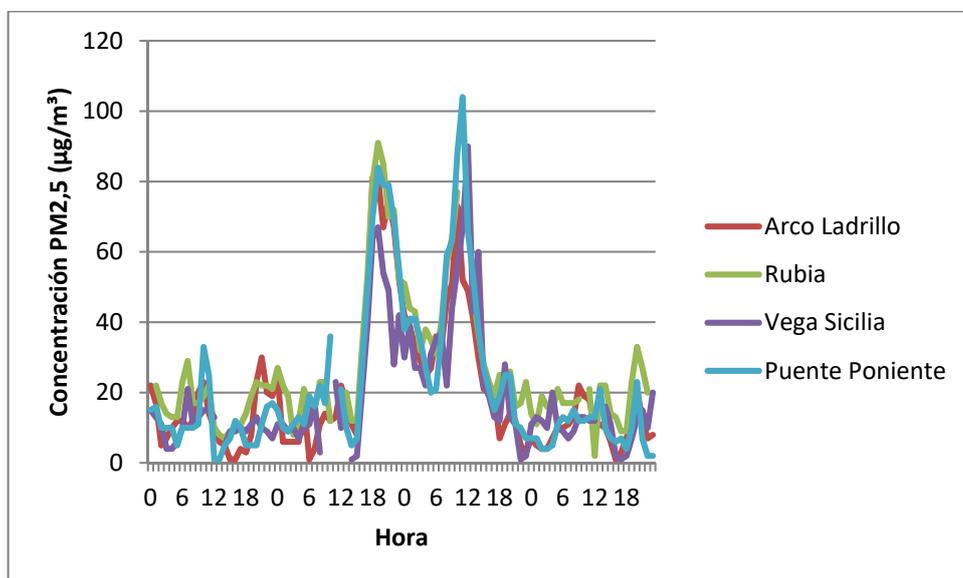


Figura 18. Concentración horaria de partículas $\text{PM}_{2,5}$ los días 20-23 de febrero de 2016.

La situación meteorológica sinóptica predominante en esos días deja a la Península Ibérica dentro de una situación anticiclónica con centro en las Islas Azores, así como en el este de España y norte de África (Figura 19). Como consecuencia, a

España llegan masas de aire cálidas africanas. La situación se modifica el día 24 con la entrada de aire polar frío afectando completamente a la Península Ibérica el día 27 de febrero.

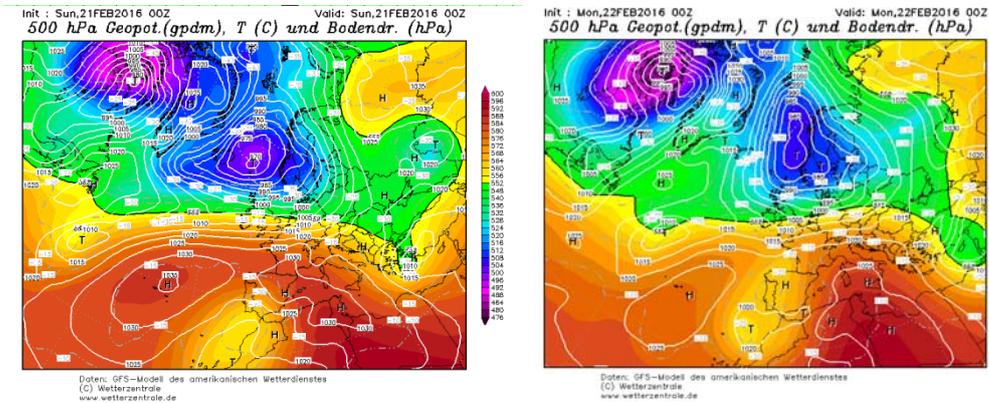


Figura 19. Mapas meteorológicos sinópticos de los días 21 y 22 de febrero de 2016 (Tomada de Wetterzentrale).

La Figura 20, muestra las retrotrayectorias de las masas de aire correspondientes al día 21 de febrero de 2016 realizadas con el modelo HYSPLIT. La trayectoria de 2500 m tiene origen africano diferente al de las alturas inferiores, con un advección de las masas de aire iniciándose en el Atlántico y entrando por el sureste de la Península. El día 22 de febrero de 2016 (Figura 20 derecha), la trayectoria de 2500 sigue teniendo un origen africano y las trayectorias de las alturas inferiores se han modificado, la de 750 m está asociada a Condiciones Locales y la de 1500 m tiene un recorrido más corto procediendo del Atlántico. Los días 20 y 23 de febrero de 2016 no presentaron masas de aire de origen africano.

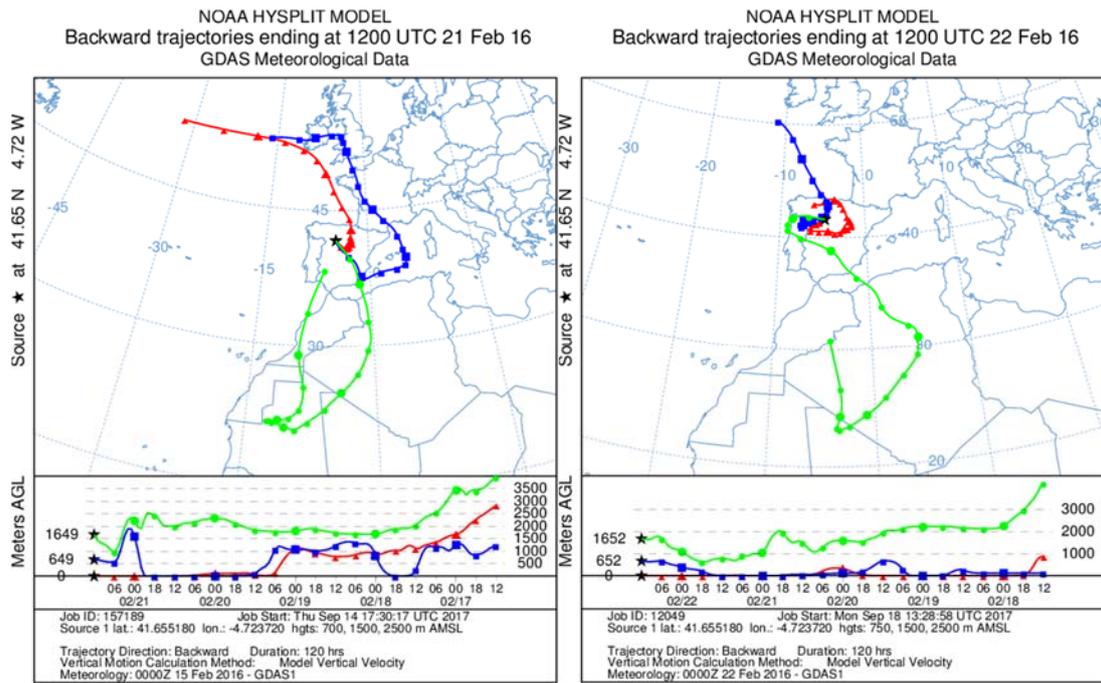
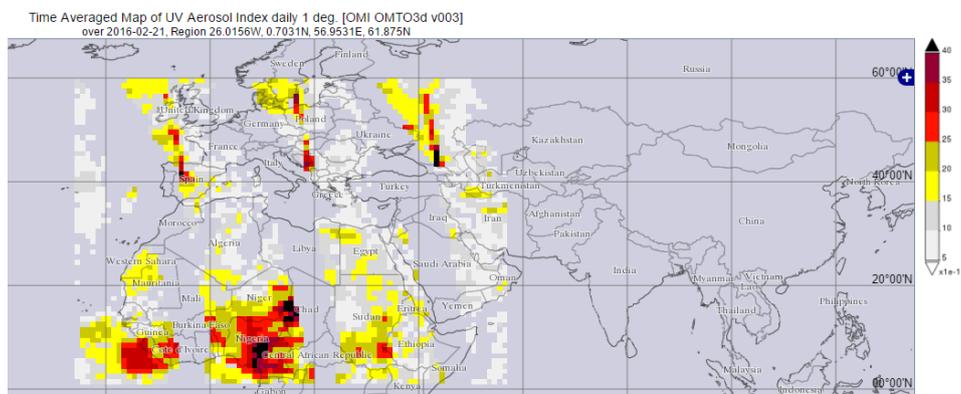


Figura 20. Retro trayectorias de 5 días de las masas de aire entre los días 21-22 de febrero de 2016 (Tomada de HYSPLIT).

Los resultados obtenidos se apoyan también en las medidas proporcionadas por los satélites. Si se observa el mapa de índices de aerosoles obtenido a partir de los datos proporcionados por el Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) (Figura 21) puede observarse, principalmente, zonas con valores muy altos en el centro y meseta norte peninsular, detectándose la presencia de una capa densa de aerosoles.



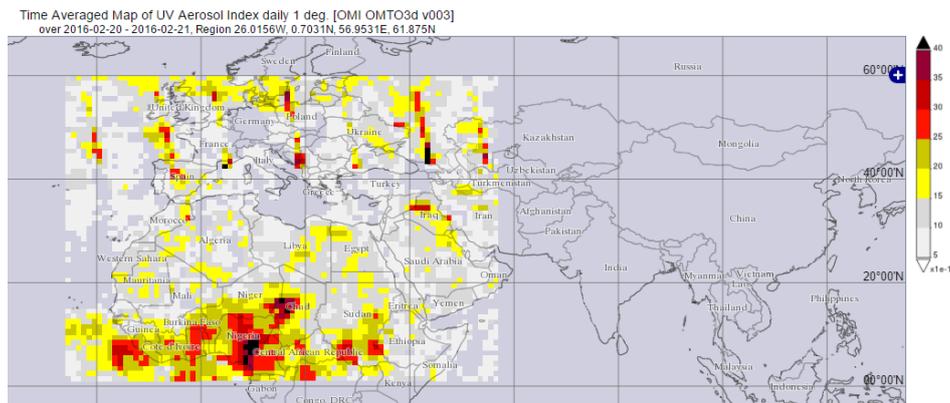
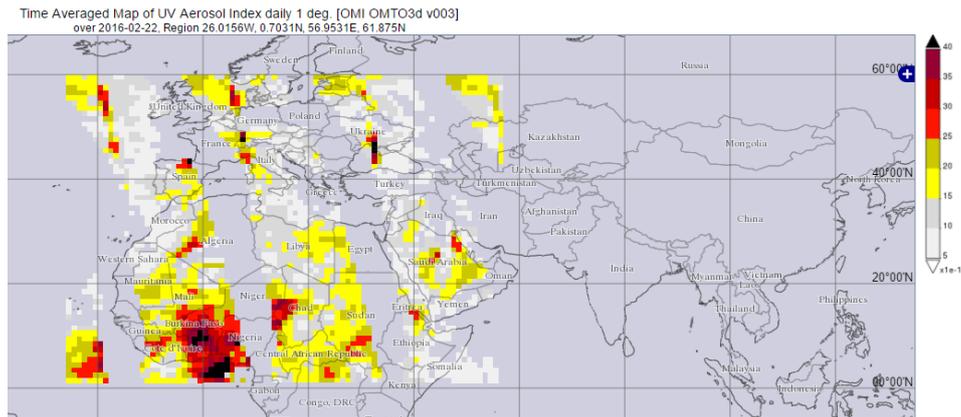


Figura 21. Índice de Aerosoles (a partir de OMI) para los días 21 y 22 de febrero de 2016, así como para los días 21-22 compuestos (Tomada de NASA, Giovanni).

La situación ocurrida esos días también se puede clarificar a partir de los mapas correspondientes a la concentración de polvo en superficie obtenidos a partir de la información obtenida del Sistema de Asesoramiento y evaluación de advertencias de tormentas de arena y polvo (SDS-WAS) (Figuras 22 y 23). Se puede apreciar altos niveles de polvo sobre toda la Península. Esta situación no se produce de forma habitual, siendo más frecuente en primavera asociada a una mayor actividad en los núcleos formadores de polvo en el sur de Argelia.

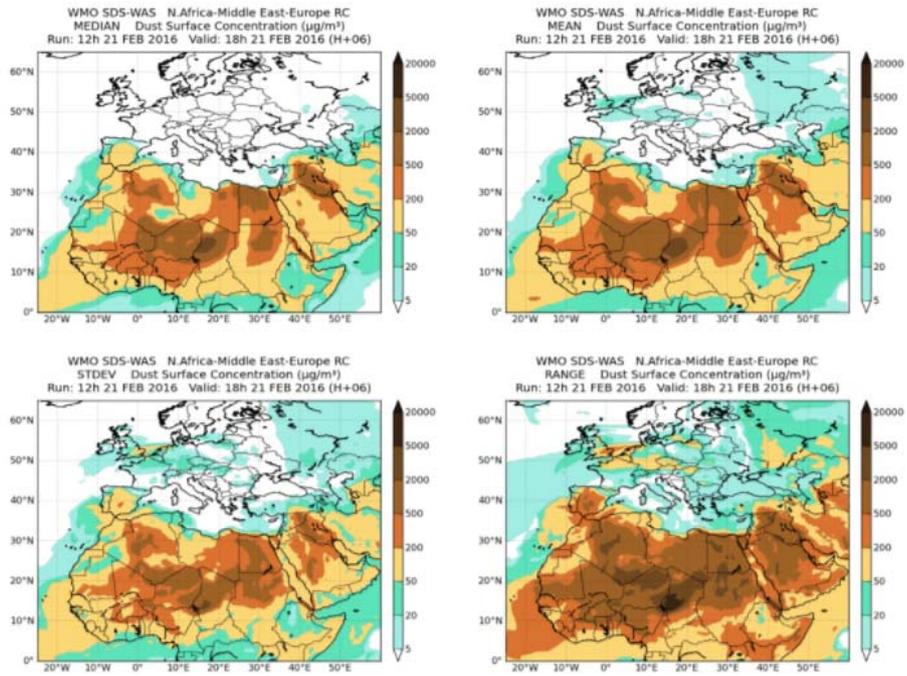


Figura 22. Simulación de la evolución del polvo en suspensión en superficie el día 21 de febrero de 2016 (Tomada de WMO SDS-WAS).

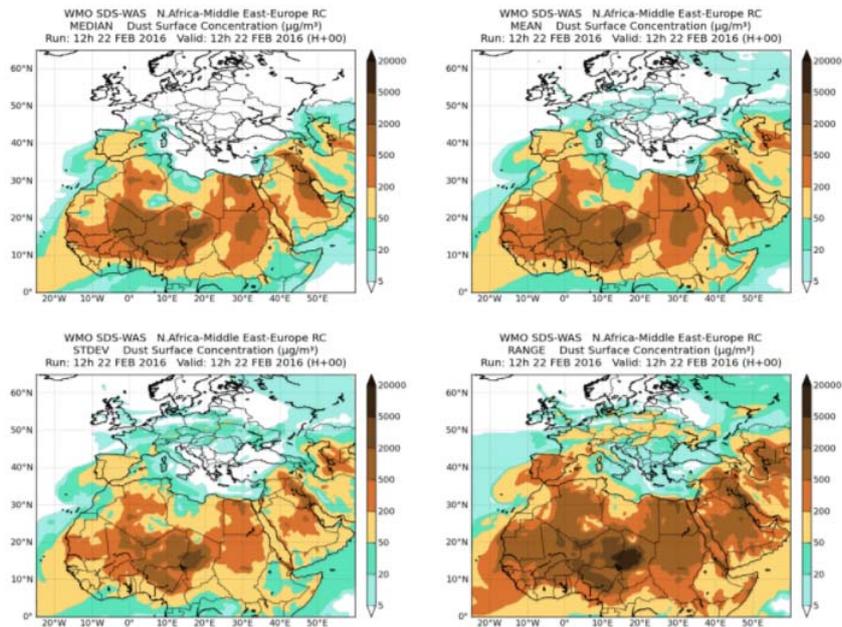


Figura 23. Simulación de la evolución del polvo en suspensión en superficie el día 22 de febrero de 2016 (Tomada de WMO SDS-WAS).

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE FONDO

Los resultados obtenidos en las secciones anteriores respecto a la variabilidad temporal, episodios y transporte son útiles para determinar las condiciones representativas de los niveles de fondo de las fracciones de partículas PM10 y PM2,5 en la zona de estudio. En el análisis de las partículas atmosféricas es importante separar los datos afectados por condiciones locales, estancamiento atmosférico o principales fuentes emisoras de aquellas condiciones con escasa influencia en sus niveles. Para la obtención de los valores representativos de la línea base se pueden seguir diferentes procedimientos (García et al., 2016). Por una parte, inicialmente se excluyeron los siguientes valores:

- Datos de concentración de partículas durante calmas y trayectorias de origen africano.

Además, se realizaron otras restricciones:

- Trayectorias de condiciones locales y origen europeo;
- Valores por encima o por debajo del valor medio $\pm 3\sigma$ (σ es la desviación típica de todos los datos) para evitar las altas concentraciones;
- Valores por encima o por debajo del valor medio $\pm 1,5 \sigma$;
- Valores por encima del percentil 90 y por debajo del percentil 1;
- Valores por encima y por debajo del valor medio $\pm 1,5$ el rango intercuartílico (RI).
- De forma adicional, se calculó el percentil 40 móvil para cada día de medida, considerando el día en evaluación como día central del período mensual de 30 días (Querol et al., 2013). Este método es más restrictivo y engloba las diferentes advecciones, excepto las africanas.

Los resultados para cada estación de medida y altura de las trayectorias se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Concentraciones medias de las partículas PM10 y PM2,5 después de aplicar los diferentes criterios de selección de datos para cada estación de medida.

Arco de Ladrillo							
		PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Datos excluidos/Altura(m)		750	1500	2500	750	1500	2500
Calmas y AF	LC y EU	14,3±8,3	14,5±9,4	14,7±7,8	8,0±5,6	8,2±5,8	8,6±6,0
	Media±3 σ	16,4±8,2	16,1±8,0	15,8±7,8	9,9±6,2	9,7±6,0	9,5±5,9
	1% y 90 %	14,9±6,4	14,6±6,2	14,3±6,0	8,6±4,4	8,4±4,2	8,2±4,1
	Media±1,5RI	15,8±7,4	15,5±7,2	15,1±7,0	8,9±4,8	8,7±4,7	8,4±4,4
	Media±1,5 σ	15,5±7,1	15,2±6,9	14,4±6,2	8,8±4,7	8,6±4,6	8,3±4,3
	Percentil 40	13,6±4,4	13,2±4,2	13,0±4,1	7,9±3,3	7,7±3,0	7,5±3,0

La Rubia							
		PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Datos excluidos/Altura (m)		750	1500	2500	750	1500	2500
Calmas y AF	LC y EU	14,4±8,2	14,5±9,4	14,7±7,7	12,3±5,7	12,6±5,8	13,0±6,2
	Media±3 σ	16,3±8,2	16,1±8,0	15,7±7,7	14,5±6,6	14,2±6,3	13,9±6,2
	1% y 90%	14,8±6,2	14,9±6,1	14,2±5,9	13,0±4,6	12,9±4,5	12,6±4,2
	Media±1,5RI	15,7±7,4	15,3±7,1	15,0±6,9	13,3±5,1	13,2±5,0	12,8±4,7
	Media±1,5 σ	15,4±7,1	15,0±6,7	14,5±6,0	13,1±4,8	13,0±4,8	12,7±4,5
	Percentil 40	13,4±3,8	13,0±3,6	12,8±3,6	12,3±3,3	12,0±3,0	11,9±2,9

Vega Sicilia							
		PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Datos excluidos/Altura(m)		750	1500	2500	750	1500	2500
Calmas y AF	CL y EU	12,4 \pm 7,0	12,8 \pm 8,2	12,9 \pm 6,8	7,2 \pm 4,6	7,5 \pm 5,1	7,8 \pm 5,3
	Media \pm 3 σ	14,4 \pm 7,1	14,0 \pm 6,7	13,5 \pm 6,2	8,9 \pm 5,2	8,6 \pm 5,0	8,3 \pm 4,6
	1% y 90%	12,9 \pm 5,1	12,7 \pm 4,9	12,3 \pm 4,6	7,7 \pm 3,5	7,6 \pm 3,3	7,4 \pm 3,2
	Media \pm 1,5RI	13,5 \pm 5,9	13,3 \pm 5,7	12,7 \pm 5,2	7,9 \pm 3,7	7,8 \pm 3,6	7,6 \pm 3,4
	Media \pm 1,5 σ	13,4 \pm 5,7	13,1 \pm 5,5	12,4 \pm 4,9	8,0 \pm 3,9	7,8 \pm 3,7	7,6 \pm 3,5
	Percentil 40	13,2 \pm 3,6	11,5 \pm 2,9	11,4 \pm 2,9	6,1 \pm 2,8	6,8 \pm 2,0	6,7 \pm 1,9

Puente del Poniente							
		PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Datos excluidos/Altura(m)		750	1500	2500	750	1500	2500
Calmas y AF	CL y EU	14,0 \pm 7,7	14,2 \pm 8,9	14,5 \pm 7,7	6,4 \pm 5,3	6,6 \pm 5,5	6,9 \pm 5,6
	Media \pm 3 σ	16,4 \pm 8,4	16,0 \pm 8,0	15,4 \pm 7,4	8,2 \pm 5,9	8,0 \pm 5,7	7,7 \pm 5,5
	1% y 90%	14,7 \pm 6,1	14,4 \pm 5,9	14,0 \pm 5,6	7,0 \pm 4,1	6,8 \pm 3,9	6,5 \pm 3,8
	Media \pm 1,5RI	15,3 \pm 6,9	14,9 \pm 6,6	14,5 \pm 6,3	7,2 \pm 4,4	7,0 \pm 4,3	6,8 \pm 4,1
	Media \pm 1,5 σ	15,0 \pm 6,6	14,7 \pm 6,4	14,1 \pm 5,9	7,1 \pm 4,3	6,9 \pm 4,2	6,6 \pm 4,0
	Percentil 40	11,8 \pm 3,2	12,8 \pm 3,5	12,6 \pm 3,4	7,1 \pm 2,3	5,9 \pm 2,6	5,7 \pm 2,6

El rango de las concentraciones medias obtenida en la estación de Arco de Ladrillo respecto a la altura de 750 m, ha sido de alrededor de 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de PM2,5. Algo similar se obtiene para La Rubia, con los valores extremos para la media \pm 3 σ y Percentil 40. Sin embargo, en la estación de Vega Sicilia se obtuvo un rango inferior para PM10, alrededor de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y más alto para PM2,5, sobre 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El criterio de excluir Condiciones Locales y trayectorias europeas llevó a concentraciones medias inferiores. Por el contrario, en la estación de Puente del

Poniente, el rango fue superior, $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 e inferior para PM2,5, $1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cuando se considera 1500 m de altura, el rango de las concentraciones medias es similar en todas las estaciones para PM10 y para PM2,5, en torno a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, el rango de las concentraciones medias según la altura de 2500 m es próximo a $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto a PM10 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5, excepto para la estación de Vega Sicilia, que presenta unos rangos inferiores, 2 y $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Excluyendo los valores medios extremos obtenidos con los diferentes criterios aplicados, las concentraciones medias son similares en todas las alturas respecto a cada estación. Los resultados obtenidos para la fracción de partículas PM10 muestran una línea base de valores alrededor de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el ambiente que rodea a las estaciones de Arco de Ladrillo y La Rubia, algo inferior en Puente del Poniente, $14,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ inferior en Vega Sicilia. Respecto a la fracción de partículas PM2,5 las diferencias entre las estaciones son más significativas. En Arco de Ladrillo se obtiene $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia, y alrededor de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente, por tanto, se puede considerar un valor central de $7,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, el valor promedio más alto se obtiene en La Rubia, $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

CONCLUSIONES

- Las concentraciones de partículas PM10 y PM2,5 fueron similares para ambos años, aunque algo menores para cada estación en 2016 pudiendo influir la mayor precipitación acumulada superando en 100 mm la del 2015. Observando los datos de ambos años en cada estación se puede concluir que de forma global no superaron el límite establecido por la normativa (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5) obteniéndose unas concentraciones de PM10 y PM2,5 de 17,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco Ladrillo, 17,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 14,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia, 15,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 9,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y 17,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 8,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente, respectivamente. Sin embargo, los valores máximos horarios de PM10 oscilaron entre los 227 y 191 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en La Rubia y Vega Sicilia, respectivamente. Los máximos de PM2,5 variaron entre 97 y 131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo y La Rubia, respectivamente.
- La evolución estacional indica unos valores medios más altos en los meses de otoño e invierno, obteniéndose en diciembre para la fracción PM10, 26,2 y 24,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arco de Ladrillo y La Rubia, así como alrededor de 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y Puente del Poniente, favorecidos por la menor capacidad dispersiva de la atmósfera en esta época. Los mínimos valores medios se obtuvieron en primavera, abril y mayo. Se puede destacar los 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en todas las estaciones de muestreo, excepto en Puente del Poniente con 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mes de abril. La fracción PM2,5 muestra una evolución similar a la de PM10. El valor medio máximo obtenido en diciembre varía entre las estaciones, aproximadamente 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia. Respecto al valor mínimo de los meses abril-mayo, La Rubia presenta el valor mayor, 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y el valor menor se obtuvo en Puente del Poniente, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- La evolución diaria de las fracciones PM10 y PM2,5 da cuenta de la actividad antropogénica, incrementándose las concentraciones en las horas de más actividad y tráfico (8:00-9:00 horas y 20:00-22:00 horas). Los valores medios de la fracción PM10 fueron alrededor de 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por la mañana. La fracción PM2,5 mostró un valor medio de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por la mañana en la Rubia y 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el resto de estaciones. El pico nocturno para las dos fracciones fue algo inferior y más variable que el de la mañana. Las concentraciones más bajas se registraron por la noche y algunas horas de la tarde.

- La evolución semanal también da cuenta la actividad antropogénica, haciendo aumentar las concentraciones en los días laborables y disminuyendo significativamente durante el fin de semana. El valor medio de PM10 los días laborables es aproximadamente $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en todas las estaciones, excepto en Vega Sicilia, alrededor de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante el fin de semana, sobre 16 y $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Respecto a la fracción PM2,5, se encuentra mayor variabilidad los días laborables, entre $9,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Puente del Poniente hasta $15,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en La Rubia. El rango de los valores medios de la concentración el fin de semana está comprendido entre $8,3$ y $13,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en las mismas estaciones, respectivamente.
- Las mejores correlaciones PM10 y PM2,5 se obtuvieron para los óxidos de nitrógeno (coeficiente de correlación de hasta 0,769). Este resultado podría indicar que las concentraciones del material particulado están influenciadas por una contribución local antropogénica, como el tráfico, y por otras fuentes, de origen natural a través del transporte a larga distancia y alguna industrial.
- La relación PM2,5/PM10 está comprendida entre 0,49 en Puente del Poniente y 0,95 obtenida en La Rubia con mayor presencia de las partículas más finas. Considerando todas las estaciones, se obtuvo un promedio de 0,67, similar al obtenido en otros trabajos para esta zona de España.
- La relación entre las concentraciones diarias de las partículas del mismo tipo registradas en las diferentes estaciones de muestreo fuerte, estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 99% y con coeficientes de correlación de Pearson superiores a 0,9 en la mayoría de los casos.
- Se analizó el impacto del transporte a larga distancia mediante la aplicación de un modelo de trayectorias, HYSPLIT, teniendo en cuenta retrotrayectorias de masas de aire de orígenes europeo, africano, atlántico y condiciones locales a diferentes alturas, 750, 1500 y 2500 m. Los valores medios más altos de las fracciones PM10 y PM2,5 correspondieron a las trayectorias de origen africano en las alturas superiores. Sin embargo, las trayectorias atlánticas se relacionaron con concentraciones medias inferiores.

- Las intrusiones saharianas son apreciables durante el período de estudio llegando a persistir hasta 8 días en abril y diciembre de 2015 y 4-5 días en julio y octubre-diciembre de 2016. En el primer año, las concentraciones de PM10 durante los eventos variaron entre 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de los meses. En diciembre se registraron dos eventos que no superaron en promedio los 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, en 2016 algunos de los eventos de intrusiones de aire africano producidos no llegaron a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en abril, mayo, noviembre y diciembre y también, se han producido entre 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de los meses. Las concentraciones medias de PM10 oscilaron entre 84,4 y 102,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y La Rubia, respectivamente en el evento producido en febrero. Por otra parte, las concentraciones medias de la fracción PM2,5 no suelen experimentar aumentos notables principalmente en los eventos de verano, al contrario que en los de otoño- invierno.

- El análisis del episodio ocurrido el 21-22 de febrero de 2016 muestra que las retrotrayectorias a 2500 m obtenidas con el modelo HYSPLIT tienen origen africano, con un advección de las masas de aire iniciándose en el Atlántico y entrando por el sureste de la Península. Una situación anticiclónica afectando a la Península Ibérica predominó estos días favoreciendo la entrada de masas de aire cálidas africanas. Esto quedó reflejado en los mapas de los índices de aerosoles que mostraron valores altos en el centro y meseta norte peninsular y en los mapas de la concentración de polvo en superficie con niveles altos en la zona de estudio. Los valores promedio de los dos días de episodio estuvieron comprendidos entre 84 y 102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la fracción PM10 y entre 27 y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la fracción PM2,5.

- Diferentes restricciones o criterios en la base de datos se utilizaron para establecer una estimación de las concentraciones de fondo en la zona de estudio. Sin tener en cuenta los valores medios extremos obtenidos considerando todas ellas, los resultados para la fracción de partículas PM10 muestran unos valores de la línea base entre 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vega Sicilia y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el ambiente que rodea el resto de las estaciones. Respecto a la fracción de partículas PM2,5 las diferencias entre las estaciones son más significativas. El valor promedio más alto se obtiene en La Rubia, 12,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se puede considerar un valor medio de 7,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la zona del resto de las estaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, S., 2007. Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de la Laguna.
- Amato, F., Pandolfi, M., Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., 2009. Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment* 43, 9, 1650-1659.
- Anderson, J., Thundiyil, J.G., Atolbach, A., 2012. *Journal of medical Toxicology*, 8, 166-175.
- Andreae, M.O.; Rosenfeld, D., 2008. Aerosol– cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Reviews*, 89, 13-41.
- Artiñano, B., Querol, X., Salvador, P., Rodríguez, S., Alonso, D., Alastuey, A., 2001. Assessment of airborne particulate levels in Spain in relation to the new EU-Directive. *Atmospheric Environment*, 35, S43-S53.
- BOE, 2007. Boletín Oficial del Estado, 275. Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Brook, R.D., Rajagopalan, S., Pope, C.A., Brook, J.R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A.V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R.V., Mittleman, M.A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S.C., Whitsel, L., Kaufman, J.D., 2010. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. *Circulation*, 121, 2331-2378.
- Cachorro, V.E., Burgos, M.A., Mateos, D., Toledano, C., Bennouna, Y., Torres, B., de Frutos, A.M., Herguedas, A., 2016. Inventory of African desert dust events in the north-central Iberian Peninsula in 2003-2014 based on sun-photometer-AERONET and particulate-mass-EMEP data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 8227-8248.
- Charron, A., Harrison, R.M., 2005. Fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{2.5-10}) particulate matter on a heavily trafficked London highway: Sources and processes. *Environmental Science of Technology*, 39, 7768-7776.

Chun, Y., Boo, K.O., Kim, J., Park, S.U. y Lee, M., 2001. Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. *Journal of Geophysical Research*, 106, pp.18461-18469.

Draxler, R.R., Rolph, G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Devore, J.L., 2015. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Editorial Cengage Learning.

EEA, 2015. Air quality in Europe. N^o 5/2015 report European Environmental Agency. Publication Office of the European Union.

Escudero, M., Castillo, S., Quero, X., Avila, A., Alarcón, M., Viana M.M., Alastuey, A., Cuevas, E., Rodríguez, S., 2005. Wet and dry African dust episodes over eastern Spain. *Journal of Geophysical Research*, 110, D18508, 1-15.

Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Pérez, N., Ferreira, F., Cuevas, E., Rodríguez, S., Alonso, S., 2007. A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 41, 5516–5524.

Fernández-Camacho, R., de la Rosa, J.D., Sánchez de la Campa, A.M., 2016. Trends and sources vs air mass origins in a mayor city in South-western Europe: Implications for air quality managements. *Science of the Total Environment*, 553, 305-315.

Fuzzi, S., Baltensperge, B., Carslaw, K., Decesari, S., Denier van der Gon, H., et al., 2015. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric, Chemistry and Physics*, 15, 8217-8299.

García, M.A., Sánchez, M.L., Pérez, I.A., Ozores, M.I., Pardo, N., 2016. Influence of atmospheric stability and transport on CH₄ concentrations in northern Spain. *Science of the Total Environment*, 550, 157-166.

Grantz, D.A., Garner, J.H.B., Johnson, D.W., 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29, 213-239. Harrison, Roy M., and Jianxin Yin. "Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?" *Science of the total Environment* 249.1 (2000): 85-101.

Inza, A., 2010. Estudio de series temporales y composición química del material particulado atmosférico en distintas áreas del País Vasco. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

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*, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.

IPCC, 2013. *Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Karagulian, F., Beis, C.A., Dora, C.F., Prüs-Ustün, A.M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Amann, M., 2015. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120: p. 475-483.

Kassomenos, P., Vardoulakis, S., Chaloulakou, A., Grivas, G., Borge, R., Lumbreras, J., 2012. Levels, sources and seasonality of coarse particles (PM₁₀-PM_{2,5}) in three European capitals- Implications for particulate pollution control. *Atmospheric Environment*, 54, 337-347.

Katsoulis, B.D., 1999. The potential for long-range transport of air-pollutants into Greece: a climatological analysis. *Science of the Total Environment*, 231, 101-113.

Li, Z., Niu, F., Fan, J., Liu, Y., Rosenfeld, D., Ding, Y., 2011. Long-term impacts of aerosol on the vertical development of clouds and precipitation. *Nature geoscience*, 4, 888-894.

Naidja, L., Ali-Khodja, H., Khardi, S., 2017. Particulate matter from road traffic in Africa. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 7, pp.389-30.

Negral, L., Moreno-Grau, S., Moreno, J., Querol, X., Viana, M.M., Alastuey, A., 2008. Natural and anthropogenic contribution to PM10 and PM2.5 in an urban area in the Western Mediterranean Coast. *Water, Air and Soil Pollution*, 192, 227-238.

Orozco, C., Pérez, A., González, N., Rodríguez, F.J., Alfayate, J.M., 2008. *Contaminación ambiental. Una visión desde la química*. Paraninfo.

Paraskevopoulou, D., Liakakou, E., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., 2015. Sources of atmospheric aerosol from long-term measurements (5 years) of chemical composition in Athens, Greece. *Science of the Total Environment*, 527-528, 165-178.

Pérez, Noemí, 2010. Variability of atmospheric aerosols at urban, regional and continental backgrounds in the Western Mediterranean Basin. Tesis, Universitat Autònoma de Barcelona, <http://ddd.uab.cat/record/68267>.

Pope, C.A., Dockery, D.W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of Air & Waste management*, 56, 709-742.

Pöschl, U., 2005. Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44, 7520–7540.

Puigcerver, M., Carrascal, M.D., 2008. *El medio ambiente atmosférico: meteorología y contaminación*. Universitat (Universitat de Barcelona; 36).

Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massagüe, G., Puig, O., 2001. PM10 y PM2,5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan Area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment*, 35,6407-6419.

Querol, X., Alastuey, A., Viana, M.M., Rodríguez, S., Artiñano, B., Salvador, P., Garcia do Santos, S., Fernandez Patier, R., Ruiz, C.R., de la Rosa, J., 2004. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in Spain. *Journal of Aerosol Science*, 35, 1151-1172.

Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S., Alonso, S., Cuevas, E., Rodríguez, S., 2008a. El impacto de las emisiones desérticas sobre la calidad del aire en España. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 8, 2-27.

Querol, X., 2008b. Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública*, 82, 447-454.

Querol, X., Rey, J., Pandolfi, M., Alastuey, A., Cusack, M., Pérez, N., Moreno, T., Viana, M., Mihalopoulos, N., Kallos, G., Kleanthous, S., 2009. African dust contributions to mean ambient PM₁₀ mass-levels across the Mediterranean Basin. *Atmospheric Environment*, 43, 4266-4277.

Querol, X., Viana, M., Moreno, T., Alastuey, A., 2012. Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire. Informes CSIC, Cyan, Proyectos Editoriales, S.A.

Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Escudero, M., Castillo, S., Orío, A., González, A., Pallarés, M., Jiménez, S., Ferreira, F., Marques, F., Monjardino, J., Cuevas, E., Alonso, S., Artiñano, B., Salvador, P., de la Rosa, J., 2013. Procedimiento para la identificación de episodios naturales de PM₁₀ y PM_{2,5} y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM₁₀. S.G. de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-España.

Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kakaliagou, O., 2001. Saharan dust contributions to PM₁₀ in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*, 35, 2433-2447.

Rojas, N., 2005. Relación entre PM_{2,5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 22, 54-60.

Rolph, G., Stein, A., Stunder, B., 2017. Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228, <http://www.ready.noaa.gov>.

Rua, A., Hernández, E., Parras, J., Martín, I., 1998. Sources of SO₂, SO₄²⁻, NO_x and NO₃⁻ in the air of four Spanish remote stations. *Journal of Air & Waste Management Association*, 48, 838-845.

Salvador, P., Artiñano, B., 2000. Evaluación de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en las redes de calidad del aire de la Comunidad de

Madrid. Serie de Informes Técnicos CIEMAT, N° 921 Editorial CIEMAT, Madrid, 138 pp.

Samoli., E., Stafoggia, M., Rodopoulou, S., Ostro, B., Declercq, CH., Alessandrini, E., Diaz, J., Karanasiou, A., Kelessis, A.G., Le Tertre, A., pandolfi, P., randi, G., Scarinzi, G., Zauli-Sajani, S., katsouyanni, K., Forastiere, F., 2013. Associations between fine and coarse particles and mortality in mediterranean cities: results from the MED-PARTICLES Project. *Environmental Health Perspectives*, 121, 932-938.

Sánchez, M.L., García, M.A., Pérez, I.A., de Torre, B., 2007. Ground laser remote sensing measurement of Saharan dust outbreak in Central Spain. Influence on PM10 concentration in the lower and upper Spanish plateaus. *Chemosphere*, 67, 229-239.

Satheesh, S.K., Ramanathan, V., 2000. Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and earth's Surface. *Nature*, 405, 60-63.

Seoáñez, M., 2002. Tratado de la contaminación atmosférica: Problemas, tratamiento y gestión. Mundi-Prensa libros.

Spiegel, M.R., Stephens, L.J., 2014. Estadística. Editorial Schaum.

Toledano, C., Cachorro, V.E., de Frutos, A.M., Torres, B., Berjón, A., Sorribas, M., Stone, R.S., 2009. Airmass classification analysis of aerosol types at El Arenosillo (Spain). *Journal of Applied Meteorology and Cimatology*, 48, 962-981.

UNE-EN 12341:2015. Calidad del aire. Determinación de la fracción PM10 de la materia particulada en suspensión. Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida al de referencia.

Viana, M., Quero, X., Alastuey, A., Cuevas, E., Rodríguez, S., 2002. Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. *Atmospheric Environment*, 36, 5861-5875.

Viana, M., Quero, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Menéndez, M., 2003. PM10 levels in the Basque Country (Northern Spain): analysis of a 5-year data record and interpretation of seasonal variations. *Atmospheric Environment*, 37, 2879-2891.

Wang, Y., Zhang, R., Saravanan, R., 2014. Asian pollution climatically modulates mid-latitude cyclones following hierarchical modelling and observational analysis. *Nat. Commun.* 5:3098 doi: 10.1038/ncomms4098.

WHO, 2006. World Health Organization. Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Global Update 2005. Geneva, Switzerland.

WHO, 2013. Health effects of particulate matter. Publications, World Health Organization Regional Office for Europe.

Zhang, D.E., 1984. Synoptic climate studies of dust fall in China since historic time, *Sci. Sin. Ser. B* 27, 825–836.

Glosario de tablas y figuras

TABLAS

- *Tabla 1. Valores límite de las partículas PM10 para la protección de la salud.*
- *Tabla 2. Valores límite de las partículas PM2,5 para la protección de la salud.*
- *Tabla 3. Información municipal, informe del ayuntamiento de Valladolid*
- *Tabla 4. Caracterización de las estaciones RCCAVA.*
- *Tabla 5. Contaminantes analizados en cada estación*
- *Tabla 6. Porcentaje de datos válidos*
- *Tabla 7. Definición cuartiles y rango intercuartílico.*
- *Tabla 8. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de Arco Ladrillo en el período 2015-2016.*
- *Tabla 9. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de La Rubia en el período 2015-2016.*
- *Tabla 10. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de Vega Sicilia en el período 2015-2016.*
- *Tabla 11. Resumen estadístico de PM10 y PM2,5 para la estación de Puente del Poniente en el período 2015-2016.*
- *Tabla 12. Concentración media anual de PM10.*
- *Tabla 13. Concentración media anual de PM2,5.*
- *Tabla 14. Numero de superaciones de los niveles diarios de PM10.*
- *Tabla 15. Numero de superaciones de los niveles diarios de PM2,5.*
- *Tabla 16. Concentraciones medias de PM10 y PM2,5 para días laborables y fin de semana.*
- *Tabla 17. Relación entre contaminantes para cada estación de muestreo para un nivel de confianza del 99%.*
- *Tabla 18. Resultados de la relación PM2,5/PM10 de todos los datos y la correlación entre las concentraciones de PM10 y PM2,5 (nivel de confianza del 99%).*
- *Tabla 19. Coeficientes de correlación del ajuste lineal entre las concentraciones de PM10 de las estaciones de muestreo (nivel de confianza del 99%)*

- *Tabla 20. Coeficientes de correlación del ajuste lineal entre las concentraciones de PM_{2,5} de las estaciones de muestreo (nivel de confianza del 99%).*
- *Tabla 21. Concentraciones de PM₁₀ en función de las trayectorias a diferentes alturas para cada una de las estaciones.*
- *Tabla 22. Concentraciones de PM_{2,5} en función de las trayectorias a diferentes alturas para cada una de las estaciones.*
- *Tabla 23. Estudio mensual de los eventos de intrusiones saharianas y la concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2,5} obtenida en 2015 (µg/m³).*
- *Tabla 24. Estudio mensual de los eventos de intrusiones saharianas y la concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2,5} obtenida en 2016 (µg/m³).*
- *Tabla 25. Concentraciones medias de las partículas PM₁₀ y PM_{2,5} después de aplicar los diferentes criterios de selección de datos para cada estación de medida.*

FIGURAS

- *Figura 1. Clasificación de las partículas en función de su tamaño (Tomado de Inza, 2010).*
- *Figura 2. Localización de la zona de muestreo (Tomada de Wikimedia HansenBCN, Google map).*
- *Figura 3. Situación de las estaciones RCCAVA (Tomada de la página web del Ayuntamiento de Valladolid).*
- *Figura 4. Imagen exterior y plano interior de una estación de medida (Tomada de informes del Ayuntamiento de Valladolid y de la Junta de Castilla y León).*
- *Figura 5. Climograma de Valladolid en el período 2015-2016*
- *Figura 6. Rosa de los vientos Valladolid, 2015-2016*
- *Figura 7. Porcentajes de viento en función de la dirección. Gráfico de sectores del año 2015 (izquierda), gráfico de sectores año 2016 (derecha).*
- *Figura 8. Muestra el esquema de un box and whisker plot, señalando la mediana, el primer y tercer cuartil, el rango intercuartílico (RIC) y los límites superior e inferior con la fórmula que les define.*
- *Figura 9. Selección de coordenadas a estudio en HYSPLIT.*
- *Figura 10. Selección de parámetros utilizados en HYSPLIT*

- *Figura 11. Mapa obtenido por HYSPLIT para diferentes alturas.*
- *Figura 12. Evolución anual de las concentraciones de PM10 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.*
- *Figura 13. Evolución anual de las concentraciones de PM2,5 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.*
- *Figura 14. Evolución diaria de las concentraciones de PM10 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.*
- *Figura 15. Evolución diaria de las concentraciones de PM2,5 en 2015-2016: a) Arco de Ladrillo, b) La Rubia, c) Vega Sicilia, d) Puente del Poniente.*
- *Figura 16. Discriminación de masas de aire según su procedencia (Modificada de Google).*
- *Figura 17. Concentración horaria de partículas PM10 los días 20-23 de febrero de 2016.*
- *Figura 18. Concentración horaria de partículas PM2,5 los días 20-23 de febrero de 2016.*
- *Figura 19. Mapas meteorológicos sinópticos de los días 21 y 22 de febrero de 2016 (Tomada de Wetterzentrale).*
- *Figura 20. Retrotrayectorias de 5 días de las masas de aire entre los días 21-22 de febrero de 2016 (Tomada de HYSPLIT).*
- *Figura 21. Índice de Aerosoles (a partir de OMI) para los días 21 y 22 de febrero de 2016, así como para los días 21-22 compuestos (Tomada de NASA, Giovanni).*
- *Figura 22. Simulación de la evolución del polvo en suspensión en superficie el día 21 de febrero de 2016 (Tomada de WMO SDS-WAS).*
- *Figura 23. Simulación de la evolución del polvo en suspensión en superficie el día 22 de febrero de 2016 (Tomada de WMO SDS-WAS).*