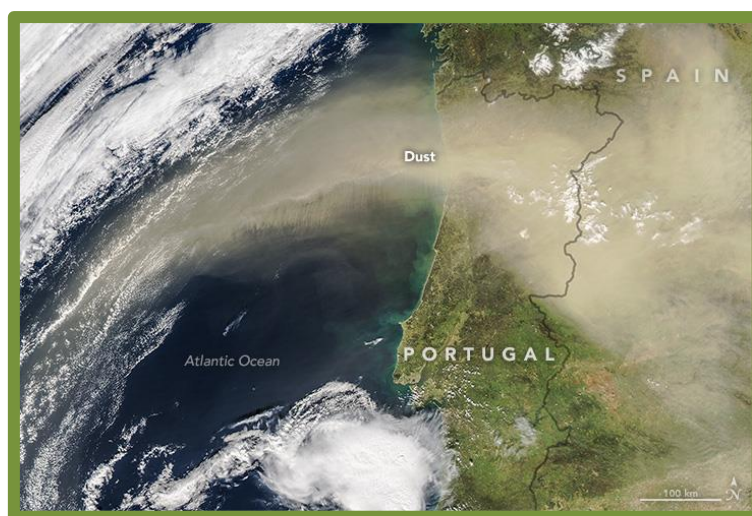


PROYECTO SINERGIA

**Evaluación del impacto en la salud
de eventos atmosféricos extremos
producidos por el cambio climático**



Memoria Final



SINERGIA se ha llevado a cabo en:



Con el apoyo de:



Convocatoria de ayudas a proyectos en materia de adaptación al cambio climático 2016

Figura de la portada: Densa nube de polvo mineral, transportada desde el continente africano hasta el interior de la Península Ibérica a lo largo del día 21 de febrero de 2016. Imagen detectada por el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite Aqua de la NASA. NASA image courtesy the LANCE/EOSDIS Rapid Response.

Proyecto SINERGIA – Memoria final

Memoria elaborada por:

P. Salvador¹

F. Molero¹

A.J. Fernández¹

M. Pandolfi²

A. Tobias²

C. Linares³

J. Díaz³

F.J. Gómez-Moreno¹

M. Barreiro¹

J.L. Piñán⁴

A. Bailador⁴

I. Martínez-Marco⁵

M.A. Revuelta⁵

N. Pérez²

X. Querol²

B. Artíñano¹

¹ Departamento de Medioambiente del CIEMAT, Av. Complutense 40, 28040, Madrid.

² Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, c. Jordi Girona 18, 08034, Barcelona.

³ Departamento de Epidemiología y Estadística, Escuela Nacional de Sanidad Ambiental, ISCIII, c. Sinesio Delgado, 28029, Madrid.

⁴ Departamento de Tecnología del CIEMAT, Av. Complutense 40, 28040, Madrid.

⁵ Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, c. Leonardo Prieto Castro 8, 28071, Madrid.

Septiembre 2018

“Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los asuntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto”.

Índice.

1. Introducción.	Pag. 3
2. Estructura del proyecto. Descripción de las actuaciones previstas, según proyecto aprobado.	Pag. 5
3. Informe Técnico de Verificación I. Identificación de episodios de transporte de polvo africano y de combustión de biomasa en España. Revisión bibliográfica.	Pag. 9
3.1 Episodios de transporte de polvo africano.	Pag. 9
3.2 Episodios de combustión de biomasa durante incendios forestales.	Pag. 18
3.3 Revisión bibliográfica.	Pag. 20
3.3.1 Revisión General.	Pag. 20
3.3.2 Efectos sobre la salud producidos por intrusiones de polvo africano en regiones de España.	Pag. 21
3.3.3 Efectos sobre la salud producidos por incendios forestales en regiones de España.	Pag. 25
3.3.4 Cambio climático e intrusiones de polvo africano.	Pag. 26
4. Informe Técnico de Verificación II. Caracterización de la estructura vertical de la atmósfera de Madrid durante eventos africanos a partir de radiosondeos y medidas LIDAR.	Pag. 28
5. Informe Técnico de Verificación III. Variación de los niveles de contaminantes atmosféricos (partículas y gases) en Madrid, en función de la intensidad de los eventos africanos y de la altura de la capa de mezcla asociada a los mismos.	Pag. 41
6. Informe Técnico de Verificación IV. Efectos en salud en Madrid por la exposición a material particulado atmosférico durante eventos atmosféricos extremos.	Pag. 47
6.1. Impacto sobre la mortalidad de los eventos de transporte de polvo africano de diferente intensidad en Madrid.	Pag. 47
6.2. Impacto sobre la mortalidad de los eventos de advección de polvo africano y de combustión de biomasa por incendios forestales en España.	Pag. 50
7. Conclusiones y valoración del proyecto.	Pag. 55
Referencias.	Pag. 59

1. Introducción.

Se entiende por “**cambio climático**” a la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

En IPCC (2014) también se define “**fenómeno meteorológico extremo**” como un fenómeno meteorológico excepcional en un determinado lugar y época del año. Aunque las definiciones de excepcional son diversas, la excepcionalidad habitual de un fenómeno meteorológico extremo sería igual o superior a los percentiles 10 o 90 de la estimación de la función de densidad de probabilidad observada. Por definición, las características de un fenómeno meteorológico extremo pueden variar de un lugar a otro en sentido absoluto. Una configuración extrema del tiempo puede clasificarse como fenómeno meteorológico extremo cuando persiste durante cierto tiempo (p. ej., una estación), especialmente si sus valores promediados o totales son extremos (p. ej., sequía o precipitación intensa a lo largo de una temporada).

Según los estudios más recientes, los principales fenómenos meteorológicos extremos que podrían producir mayores efectos adversos sobre la salud por la exposición a contaminantes atmosféricos durante el desarrollo de los mismos, serían las olas de calor y de bajas temperaturas, los incendios forestales y las tormentas de polvo generadas en zonas áridas y desérticas (De Sario et al., 2013). A partir de los diversos escenarios de evolución contemplados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) se prevé que pueda producirse un aumento en la frecuencia, duración e intensidad de este tipo de fenómenos o eventos extremos por efecto del cambio climático en diversas zonas del planeta, incluida la cuenca mediterránea (IPCC, 2013).

El principal objetivo del **proyecto SINERGIA** ha sido la identificación de efectos adversos sobre la salud de la población de Madrid debido a la exposición a contaminantes atmosféricos durante la ocurrencia de cierto tipo de eventos meteorológicos extremos. Este proyecto se ha llevado a cabo en el **CIEMAT** con el apoyo del **Ministerio para la Transición Ecológica**, a través de la **Fundación Biodiversidad**. En particular, el proyecto se ha centrado en el estudio de los **eventos**

de transporte de polvo mineral desde regiones áridas del norte de África, hasta la zona central de la Península en la que se encuentra Madrid. El desarrollo de este tipo de eventos está determinado por factores asociados al cambio climático, como son el desarrollo de circulaciones atmosféricas específicas que favorecen la advección de masas de aire africanas hacia el continente europeo y el aumento de las zonas desérticas que son la fuente del polvo mineral, por efecto de las altas temperaturas y los periodos de sequía que tienen lugar en la cuenca mediterránea y el norte de África. Otro tipo de evento atmosférico extremo que constituye una fuente de contaminantes atmosféricos y cuyo desarrollo e intensidad está íntimamente relacionado con los efectos del cambio climático lo constituyen los **incendios forestales**. A lo largo del desarrollo del proyecto se ha podido constatar que en España ambos tipos de eventos se producen con frecuencia y dependiendo de la región geográfica considerada de modo simultáneo. Por ello y pese a que inicialmente no estaba previsto en los objetivos del proyecto SINERGIA, se ha podido realizar una evaluación del impacto en la salud producido por las emisiones de partículas generadas por la combustión de biomasa durante incendios forestales. Con ello se ha logrado discriminar el impacto producido en la salud de la población de Madrid por ambos tipos de eventos, cuando se produjeron de manera simultánea.

2. Estructura del proyecto. Descripción de las actuaciones previstas, según proyecto aprobado.

Para la correcta consecución de los objetivos propuestos, se estructuró el proyecto sobre la base de una serie de actividades que se enumeran a continuación. Es preciso recalcar que el desarrollo de las mismas se pudo llevar a cabo con éxito gracias a la participación desinteresada de numerosos colaboradores, tanto de diferentes departamentos del CIEMAT como de otras instituciones científicas de reconocido prestigio como el Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC, el Instituto de Salud Carlos III - ISCIII o la Agencia Estatal de Meteorología - AEMET.

1. Obtener y analizar una base de datos de episodios identificados de transporte de polvo africano que tuvieron impacto en el área urbana de Madrid en el periodo de estudio 2011-2015, categorizados en función de su intensidad a partir de los valores estimados de contribución de polvo africano. Esta actividad se realizó con la colaboración de Noemí Pérez y Xavier Querol, investigadores del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) del CSIC y de Begoña Artíñano investigadora del Departamento de Medioambiente del CIEMAT.
2. Realizar una revisión bibliográfica de los estudios publicados en revistas científicas con índice de impacto acerca del desarrollo de eventos atmosféricos extremos en el entorno de la cuenca mediterránea, principalmente eventos de transporte de polvo africano pero también eventos de combustión de biomasa asociados a incendios forestales, y de sus efectos adversos sobre la salud de las personas en zonas urbanas altamente pobladas. Esta actividad se realizó con la colaboración de Cristina Linares y Julio Díaz, investigadores del Departamento de Epidemiología y Bioestadística de la Escuela Nacional de Sanidad del ISCIII, expertos en la evaluación del impacto de factores ambientales en los niveles de mortalidad y morbilidad en zonas urbanas.
3. Obtener y analizar una base de datos de perfiles verticales de variables meteorológicas y de propiedades ópticas de aerosoles, que permita caracterizar la estructura vertical de la atmósfera y determinar la altura y evolución de la capa de mezcla sobre Madrid. Los datos se obtuvieron en el primer caso a partir de radiosondeos meteorológicos realizados diariamente a las 12 UTC en el aeropuerto de Barajas por la AEMET y en el segundo con un equipo LIDAR en el laboratorio METALAB del CIEMAT. Esta actividad se realizó con la colaboración

de Alfonso Fernández García investigador del Departamento de Medioambiente del CIEMAT y de Isabel Martínez-Marco y Arantxa Revuelta investigadoras de la AEMET.

4. Realizar un análisis estadístico para tratar de relacionar las variaciones de los niveles de contaminantes atmosféricos (partículas y gases) registrados en estaciones de medida de redes de calidad del aire de Madrid, durante el desarrollo de eventos africanos de diferente intensidad, con la altura y evolución de la capa de mezcla sobre Madrid. Esta actividad se realizó con la colaboración de Francisco Javier Gómez-Moreno y de Marcos Barreiro, investigadores del Departamento de Medioambiente del CIEMAT y de Marco Pandolfi investigador del IDAEA-CSIC.
5. Realizar un análisis epidemiológico a partir de técnicas estadísticas para obtener estimaciones del incremento de riesgo relativo de mortalidad en Madrid por efecto de la exposición a material particulado atmosférico durante eventos africanos de distinta intensidad. Esta actividad se realizó con la colaboración de Aurelio Tobías y Marco Pandolfi, investigadores del IDAEA-CSIC, expertos en el estudio de eventos de transporte a larga distancia de polvo africano y de sus efectos sobre la calidad del aire y la salud. Gracias a la colaboración de Cristina Linares y Julio Díaz, investigadores del Departamento de Epidemiología y Bioestadística de la Escuela Nacional de Sanidad del ISCIII, también se pudo evaluar el efecto sobre la mortalidad de la población de Madrid, debido a la exposición a material particulado atmosférico durante el desarrollo simultáneo de eventos de combustión de biomasa y de eventos de transporte de polvo africano.
6. Identificar sinergias o interacciones entre los niveles de contaminantes atmosféricos a los que está expuesta la población en Madrid y la ocurrencia de eventos de transporte de polvo mineral africano y/o de combustión de biomasa. Esta actividad ha permitido valorar parcialmente la influencia del cambio climático sobre la calidad del aire en una zona urbana del sur de Europa y los efectos adversos que produce sobre la salud de su población.
7. Difundir este tipo de resultados a través de una página web propia del proyecto creada para tal fin y de la elaboración de notas de prensa y de reportajes para medios de comunicación. Para ello también se previó la asistencia a congresos y foros especializados y la preparación de trabajos y envío para su revisión y publicación a revistas científicas. Esta actividad se realizó con la colaboración de

Almudena Bailador y de José Luís Piñan, miembros del Departamento de Tecnología del CIEMAT y responsables de la creación de la página web del proyecto (<http://projects.ciemat.es/web/sinergia/>).

8. Organizar una jornada informativa en el CIEMAT sobre “El impacto en la salud de los eventos atmosféricos extremos producidos por el cambio climático” en la que se desarrollaron ponencias por parte de los miembros del equipo de trabajo y de los colaboradores del proyecto y de una serie de invitados, expertos en diversos temas relacionados con la temática del proyecto. El propósito era desarrollar un debate dirigido a proponer y evaluar propuestas de mitigación de los efectos adversos sobre la salud y de adaptación de la población, producidos por efecto de la ocurrencia de futuros eventos atmosféricos extremos. Esta actividad se realizó con la colaboración de Begoña Artíñano, Javier Fernández y Marcos Barreiro, investigadores del Departamento de Medioambiente del CIEMAT.

La descripción detallada del desarrollo de estas actividades así como los principales resultados obtenidos se describen a continuación en los siguientes cuatro capítulos del documento. Cada uno de ellos se corresponde con los **Informes Técnicos de Verificación** elaborados a lo largo del desarrollo del proyecto, según se estableció en el Marco Lógico como parte de las fuentes de verificación de las actividades previstas.

El capítulo 3 corresponde al Informe Técnico de Verificación I generado a lo largo del segundo mes de desarrollo del proyecto y que incluye los resultados del análisis de la base de datos de eventos de transporte de polvo africano categorizados a partir de la contribución estimada diaria de polvo africano y de la revisión bibliográfica prevista en esta fase del proyecto.

El capítulo 4 corresponde al Informe Técnico de Verificación II generado a lo largo del cuarto mes de desarrollo del proyecto, con los resultados de la base de datos estimados de altura de capa de mezcla a mediodía en Madrid y de perfiles verticales de propiedades ópticas de aerosoles obtenidos con medidas LIDAR durante eventos africanos de diferente intensidad que tuvieron lugar en el periodo 2011-2015.

El capítulo 5 corresponde al Informe Técnico de Verificación III generado a lo largo del sexto mes de desarrollo del proyecto, con los resultados de la variación de los niveles de contaminantes atmosféricos (partículas y gases) en función de la intensidad de los eventos africanos y de la altura de la capa de mezcla asociada a los mismos.

El capítulo 6 corresponde al Informe Técnico de Verificación IV generado a lo largo del noveno mes de desarrollo del proyecto con los resultados del análisis epidemiológico, que incluye los valores de incremento de riesgo relativo de mortalidad en Madrid, por efecto de la exposición a material particulado atmosférico durante eventos africanos de diferente intensidad. En este capítulo también se incluyen los resultados de la evaluación del impacto en la mortalidad diaria en regiones del territorio nacional incluida Madrid, producido por la exposición a material particulado atmosférico durante eventos de combustión de biomasa.

3. Informe Técnico de Verificación I. Identificación de episodios de transporte de polvo africano y de combustión de biomasa en España. Revisión bibliográfica.

3.1 Episodios de transporte de polvo africano.

Como consecuencia de los procesos de transporte a larga distancia de polvo mineral desde zonas áridas del norte de África, las concentraciones de partículas o material particulado atmosférico (PM) registradas en superficie pueden alcanzar concentraciones muy elevadas en zonas del Caribe, el continente americano y el europeo. Así se ha determinado que en los países del sur de Europa, este tipo de aportes son la principal contribución natural a los niveles de PM₁₀ (partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 µm, Figura 1) y en menor medida a los de PM_{2.5} (partículas con diámetro aerodinámico inferior a 2.5 µm, Figura 1). También dan lugar a superaciones del valor límite diario de PM₁₀ para la protección de la salud, el cual está establecido en 50 µg/m³ por la legislación vigente (Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire) en estaciones de fondo regional y urbano (Escudero et al., 2007a; Pey et al., 2013; Salvador et al., 2013 entre otros).

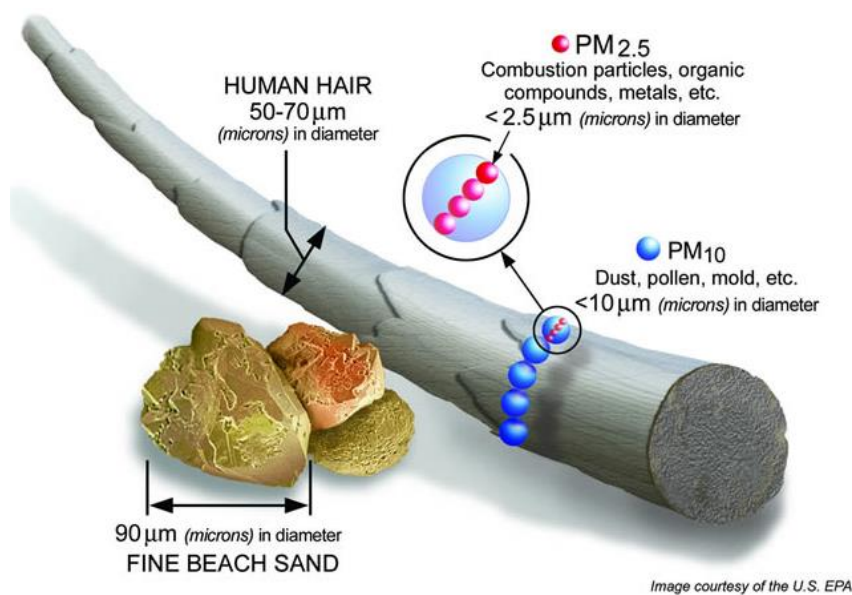


Figura 1. Diagrama que muestra el tamaño relativo del material particulado atmosférico PM₁₀ y PM_{2.5} en relación con el de un pelo humano y un grano de arena. Fuente: US EPA (2008).

El actual **Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación – Ministerio para la Transición Ecológica (MAPAMA)**, consciente de la importancia de este tipo de eventos, ha financiado desde el año 2005, a través de una Encomienda de Gestión

con el CSIC que incluye la participación del CIEMAT y de otras instituciones científicas, las actividades de un grupo de expertos que son responsables de generar los avisos de predicción de episodios africanos sobre España y de producir los informes de los episodios ocurridos, una vez se ha validado su impacto sobre los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ a los que está expuesta la población.

Además, este grupo de expertos ha contribuido a desarrollar una metodología, de forma conjunta entre el MAPAMA y la Agência Portuguesa do Ambiente para cuantificar los aportes de polvo africano a los niveles diarios de fondo regional de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante los episodios africanos. La metodología denominada como “Procedimiento para la identificación de episodios naturales de PM_{10} y $PM_{2.5}$, y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM_{10} ” puede consultarse en https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/metodologiaparaepisodiosnaturales-revabril2013_tcm30-186522.pdf (enlace activo a fecha 11 de septiembre de 2018) y en las Directrices de la Comisión Europea para la demostración y el descuento de superaciones atribuibles a fuentes naturales (Commission Staff Working Paper, 2011).

En este grupo de expertos participa desde su creación el responsable del proyecto SINERGIA, Pedro Salvador, como representante del CIEMAT.

La identificación de los días episódicos de transporte de polvo africano se realiza de forma regular a partir del análisis diario de productos meteorológicos (retro-trayectorias de masas de aire, imágenes de satélite, mapas meteorológicos sinópticos y resultados de modelos numéricos de pronóstico: modelo SKIRON – Universidad de Atenas; modelos BSC-DREAM8b v2.0 y NMMB/BSC-Dust – Barcelona Dust Forecast Center; modelo NAAPS – Naval Research Laboratory (NRL), Monterey, CA) y en el análisis de series temporales de valores medios diarios de concentración de PM_{10} en estaciones de medida de calidad del aire de fondo regional. A partir de la aplicación de un procedimiento estadístico específico a estas bases de datos (Escudero et al., 2007b), es posible estimar los aportes diarios de polvo africano a los niveles de PM_{10} de fondo regional en cada día episódico.

Todo este procedimiento se lleva a cabo anualmente en 9 regiones geográficas específicas del territorio nacional, cada una de las cuales contiene a varias provincias (Figura 2): Noroeste-NW; Norte-N; Noreste-NE; Islas Baleares-BAL; Levante-E; Centro-CEN; Sureste-SE; Suroeste-SW; Islas Canarias-CAN.

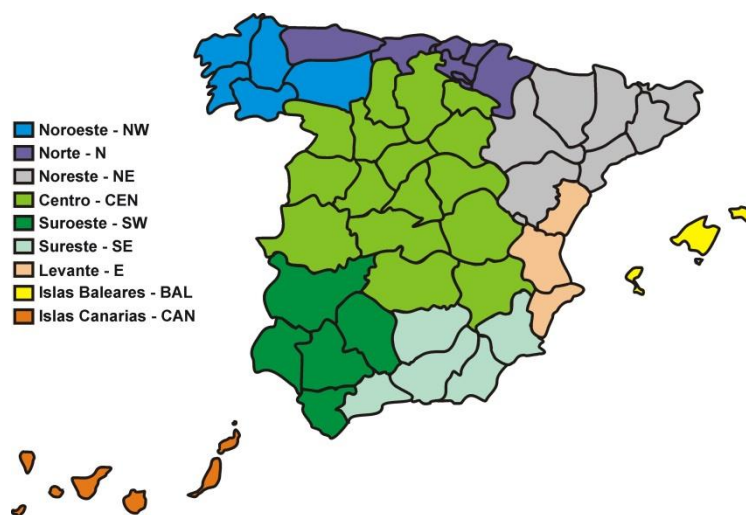


Figura 2. Localización geográfica de las 9 regiones de España para las que regularmente se identifican episodios de transporte de polvo africano y de combustión de biomasa durante incendios forestales que dan lugar a un incremento de sus niveles de fondo regional de PM_{10} .

Gracias a la creación de esta base de datos de ocurrencia de eventos africanos en las 9 regiones geográficas y de contribuciones estimadas de polvo mineral a los niveles de PM_{10} para cada día episódico, se ha podido evidenciar a través de numerosos estudios, referenciados en la sección de revisión bibliográfica, que durante el desarrollo de los mismos se producían efectos adversos sobre la salud de la población de numerosas ciudades, incluidos aumentos en los índices de mortalidad y morbilidad. Los mecanismos que producen dichos efectos adversos sobre la salud durante estos eventos aún no están claros, puesto que las masas de aire que transportan el polvo mineral pueden transportar también material biogénico (polen, bacterias, hongos y endotoxinas) adheridas a la superficie de las partículas de polvo y además durante el periodo de transporte de las mismas hasta zonas urbanas o industriales, pueden incorporar emisiones procedentes de otras fuentes como refinerías o centrales térmicas (Moreno et al., 2010; Rodríguez et al., 2011; Salvador et al., 2016). Por otro lado se ha sugerido que durante los eventos de transporte de polvo africano las PM de origen local podrían aumentar su toxicidad (Pérez et al., 2012). Es decir que la misma concentración de PM generaría mayores efectos sobre la salud, durante este tipo de eventos que durante el resto de los días. Este último caso sugiere la existencia de una interacción o sinergia entre las emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes locales en zonas urbanas y la ocurrencia de eventos africanos, que tiene como resultado un incremento del riesgo de mortalidad por la exposición a los mismos. Ello podría ser debido a variaciones en la estructura vertical de la atmósfera, inducidos por la presencia de estratos de polvo mineral africano en altura sobre las zonas urbanas.

El objetivo principal del proyecto SINERGIA (<http://projects.ciemat.es/web/sinergia/>) ha sido la identificación de este tipo de interacciones, a partir del estudio de la estructura vertical de la atmósfera durante los episodios de transporte de polvo mineral africano sobre el área metropolitana de Madrid.

El ámbito temporal de este estudio se ha restringido al periodo 2011-2015. Por ello se han obtenido las series anuales de episodios validados de transporte de polvo africano sobre la zona centro peninsular, así como los valores estimados de contribución de polvo a los niveles de fondo regional de PM₁₀, correspondientes a este periodo. Dicha información estaba disponible en: <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/fuentes-naturales/anuales.aspx> (enlace activo a fecha 11 de septiembre de 2018).

Durante el periodo 2011-2015 se identificaron un total de 88 episodios o intrusiones de polvo mineral africano sobre la zona central de la Península Ibérica. A partir de ahora se va a utilizar el término de “día episódico” para referirse a aquellos días en los que se produjo un evento de este tipo.

Este dato se traduce a su vez en 294 días episódicos, el 16% del total de los días del periodo, puesto que los episodios tuvieron una duración variable.

El número anual de eventos varió entre 12 en 2013 y 20 en 2011 y 2012, mientras que el de días episódicos lo hizo entre 39 en 2013 y 80 en 2015.

En promedio anualmente se produjeron 18 episodios con una duración media de 3 días, si bien el rango de duración fue muy amplio, desde eventos que duraron un solo día hasta el que se produjo entre junio y julio de 2015 y que duró 19 días.

El periodo del año en el que en promedio se registraron más eventos y días episódicos fue el comprendido entre junio y agosto (Figura 3). Los episodios de mayor duración media (Figura 4) se registraron no sólo en el periodo de verano (junio y agosto) sino también en primavera (marzo y abril) e invierno (diciembre).

Es importante mencionar que pese a existir una clara tendencia estacional anual en lo que se refiere al desarrollo de este tipo de episodio, pueden producirse importantes variaciones durante años concretos (Figura 5). Así, es evidente que el año 2015 fue especialmente anómalo en este sentido puesto que durante el mes de diciembre se

registró el mayor número mensual de días episódicos, 18 días, por encima de los registrados en los meses de verano, 17 en julio y agosto.

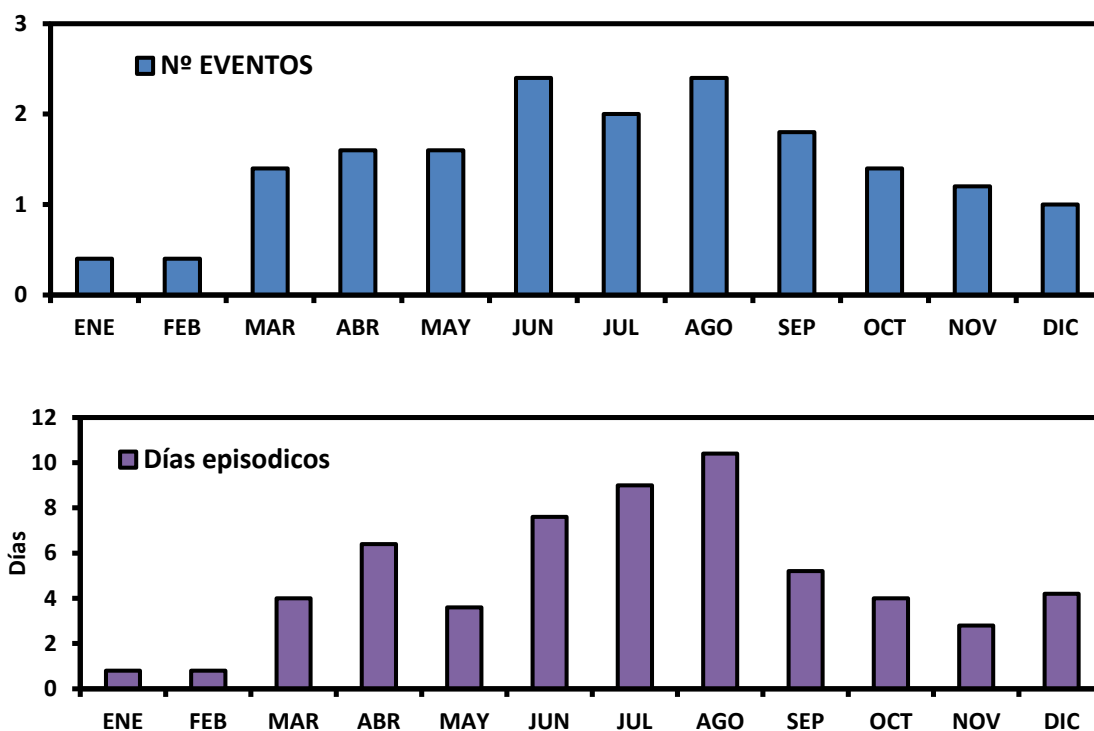


Figura 3. Número medio mensual de episodios de intrusión de polvo africano (superior) y de días episódicos (inferior) sobre la zona central de la Península Ibérica en el periodo 2011-2015.

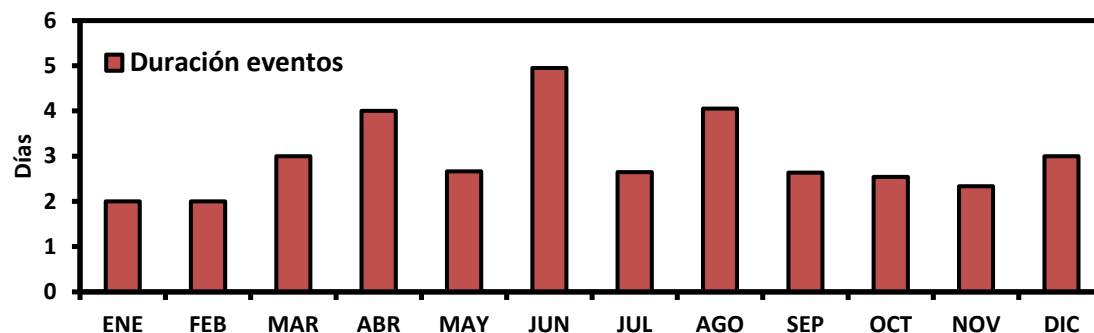


Figura 4. Duración media mensual en días de los eventos de polvo africano sobre la zona central de la Península Ibérica en el periodo 2011-2015.

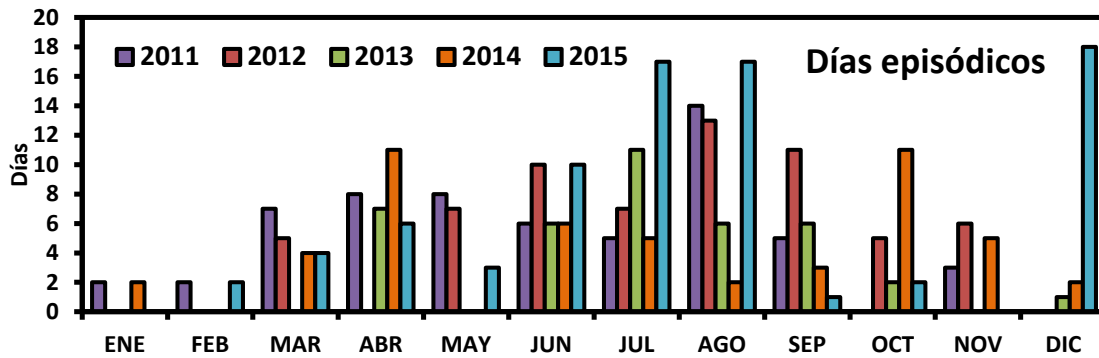


Figura 5. Número mensual de días episódicos sobre la zona central de la Península Ibérica para cada año del periodo 2011-2015.

Área Metropolitana de Madrid

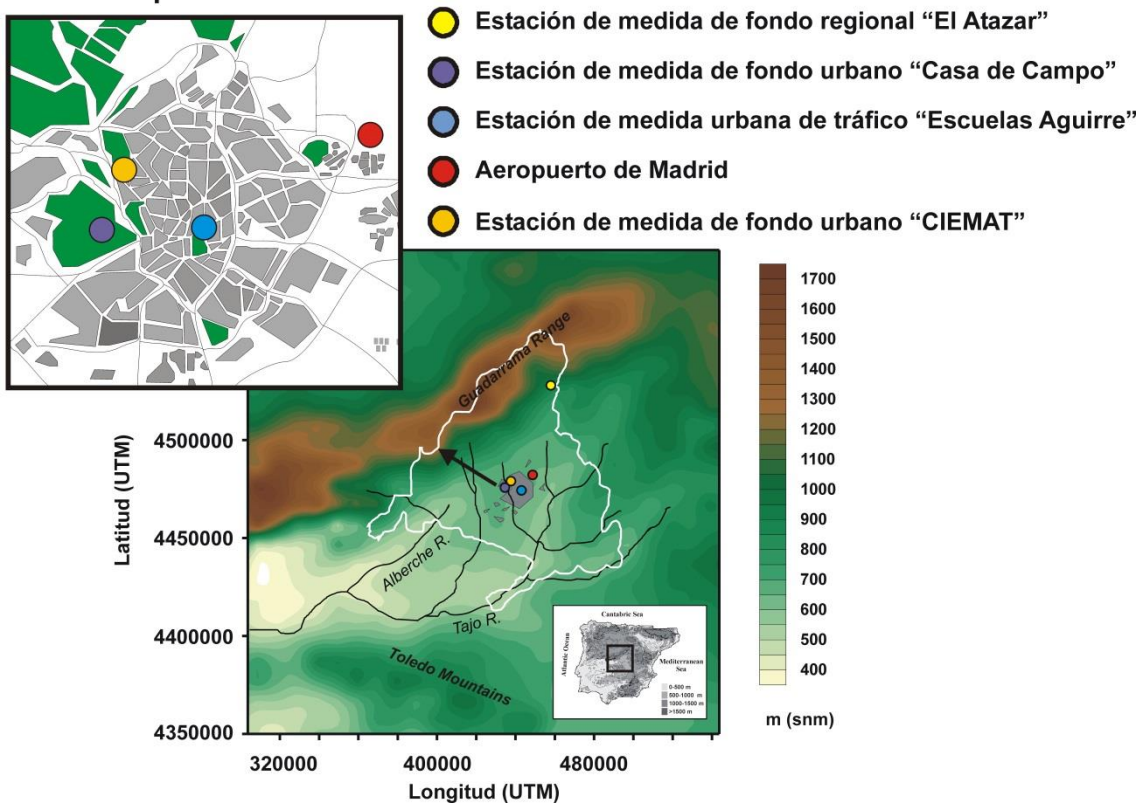


Figura 6. Localización geográfica de las estaciones de medida de calidad del aire, del aeropuerto de Madrid y del CIEMAT.

“El Atazar” es una estación de fondo regional perteneciente a la red de estaciones de calidad del aire de la Comunidad de Madrid (40.909°N, 03.467°O, 995 m sobre el nivel del mar - SNM). Al estar situada en un emplazamiento rural de fondo, a más de 40 km del área metropolitana de Madrid al noreste de la misma (Figura 6), resulta ideal para caracterizar los niveles de fondo de los contaminantes atmosféricos en la cuenca aérea de Madrid. Las series temporales de valores diarios de concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} registrados en esta estación, se utilizan habitualmente para la aplicación del

método de cuantificación de los aportes de polvo africano a los niveles diarios de fondo regional de partículas en la zona central de la Península.

En la Figura 7 se muestran las series temporales anuales de valores estimados de contribución neta de polvo mineral africano a los niveles de fondo regional de PM_{10} , durante días episódicos en la estación de medida de “El Atazar”.

Gracias a haber podido estimar dichas contribuciones de polvo, ha sido posible determinar la intensidad de los días episódicos de intrusión de polvo africano. A mayor contribución de polvo, mayor intensidad del episodio.

Para este estudio se ha decidido categorizar como **días episódicos de baja intensidad (AFR-L)** a los que tenían asociados valores de carga de polvo por debajo del percentil 25 de la serie de datos de todo el periodo (menor de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), **días episódicos de intensidad media (AFR-M)** a los que presentan valores comprendidos entre el percentil 25 y el 90 (entre 5 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y **días episódicos de intensidad elevada (AFR-H)** a los que han dado lugar a contribuciones de polvo superiores al valor del percentil 90 de la serie (superior a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En consecuencia durante el periodo de estudio se produjeron en total 100 días episódicos de intensidad baja, 180 de intensidad media y 31 de intensidad elevada (Figura 8). Anualmente y en promedio se registraron 20, 36 y 5 días episódicos de intensidad baja, media y elevada. Los días episódicos de intensidad baja fueron más frecuentes durante el año 2012 (28 eventos), los de media durante 2015 (48 eventos) y los de elevada durante 2012 y 2015 (11 eventos).

En la Figura 9 puede apreciarse como los días episódicos africanos de intensidad baja, media y elevada siguieron la misma evolución estacional que el conjunto de los días episódicos africanos. Es decir, mayor frecuencia de ocurrencia en verano seguido de la primavera y el otoño y menor frecuencia en invierno. La ocurrencia de los tres tipos de eventos fue mayor en promedio en los meses de julio para los días episódicos de intensidad baja y de agosto para los de intensidad media y elevada (Figura 10). La evolución estacional de los días episódicos de intensidad media, que por definición fueron los más numerosos, muestra como en ciertos meses de primavera (marzo y abril), otoño (septiembre y octubre) e invierno (diciembre) la ocurrencia de este tipo de eventos fue también relativamente frecuente a lo largo del periodo de estudio.

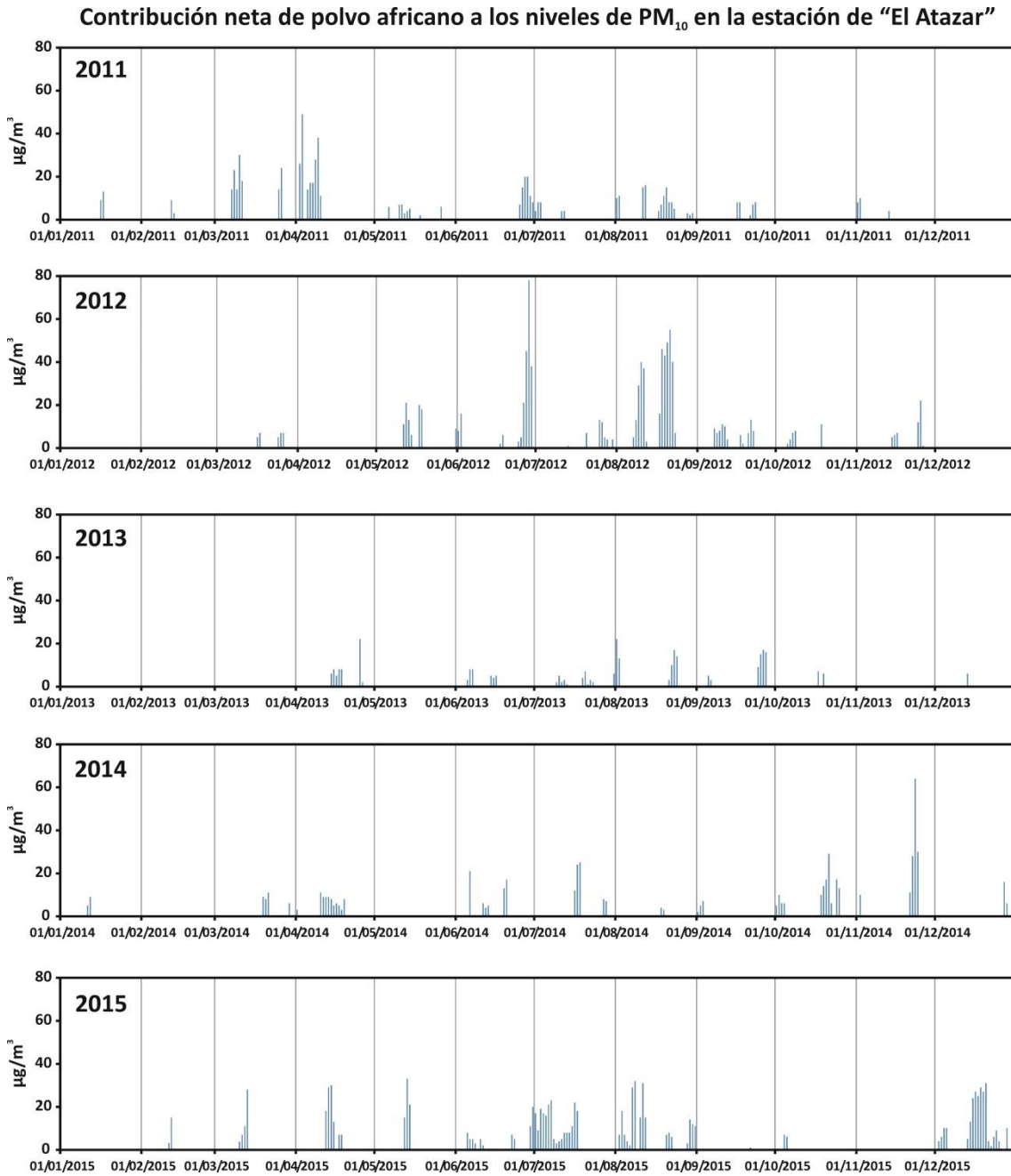


Figura 7. Contribución neta estimada de polvo mineral a los niveles de fondo regional de “El Atazar” durante días episódicos del periodo 2011-2015.

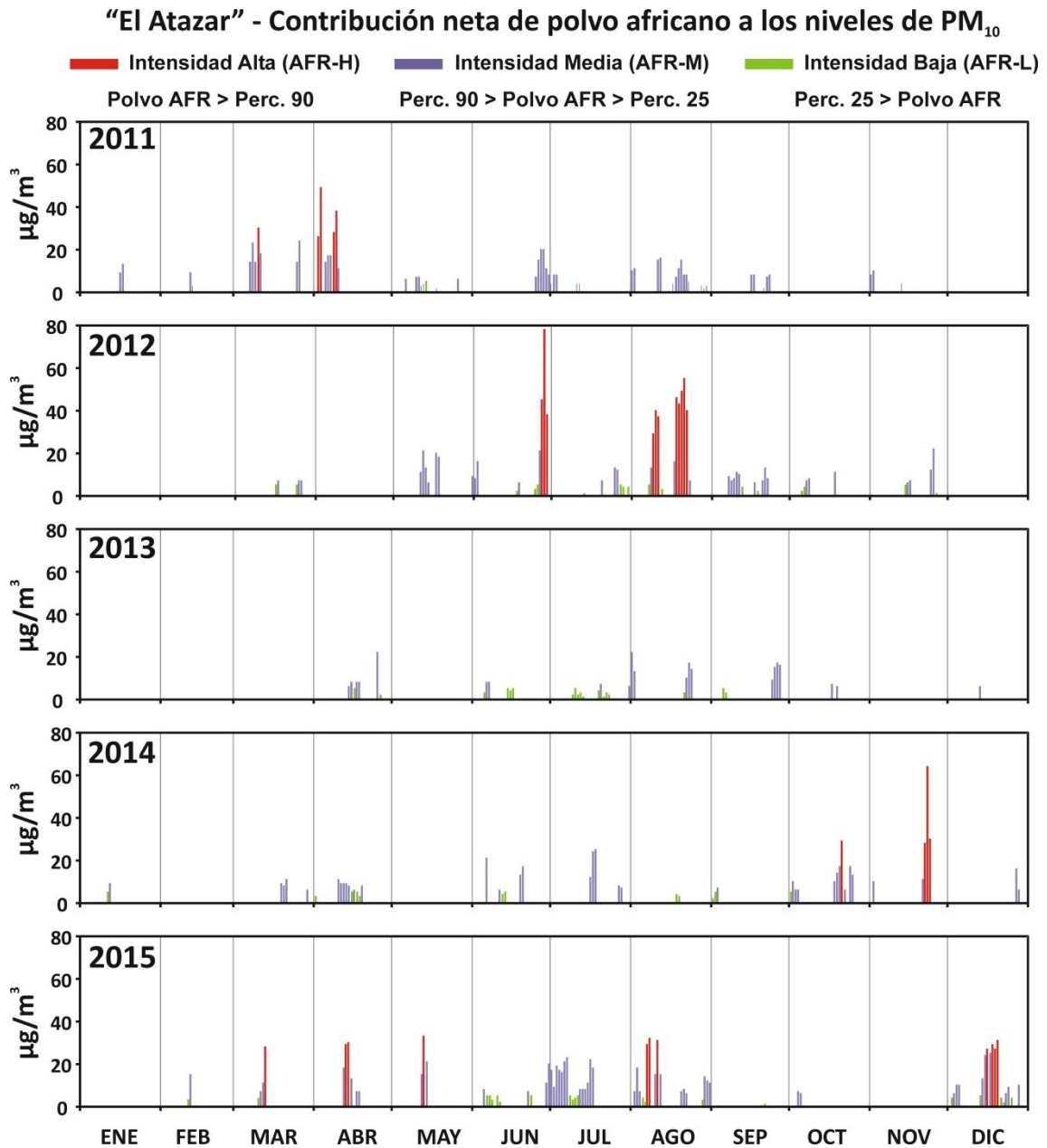


Figura 8. Días episódicos de intrusión de polvo africano de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y elevada (AFR-H) sobre la zona central de la Península Ibérica en el periodo 2011-2015.

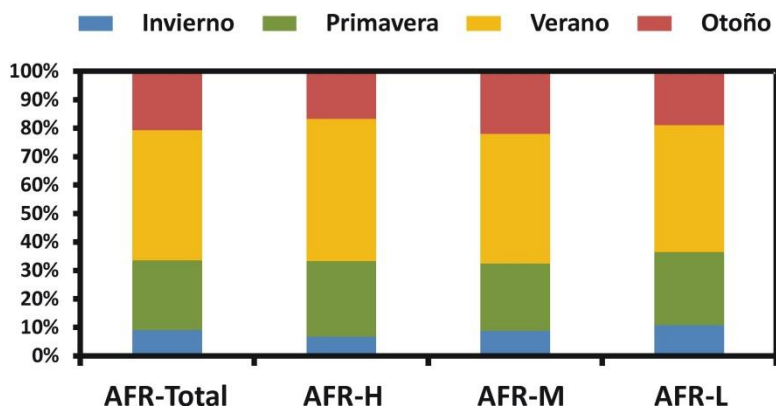


Figura 9. Evolución estacional del número de días episódicos de transporte de polvo africano sobre Madrid durante el periodo 2011-2015.

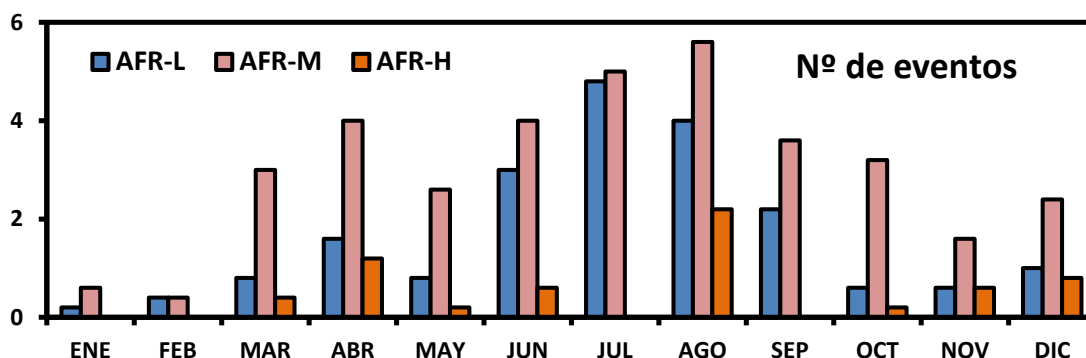


Figura 10. Número mensual medio de eventos de intrusión de polvo africano de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y elevada (AFR-H) sobre la zona central de la Península Ibérica en el periodo 2011-2015.

3.2 Episodios de combustión de biomasa durante incendios forestales.

Gracias al hecho de que el grupo de expertos que se dedica a identificar para el MAPAMA los episodios africanos y cuantificar los aportes de polvo africano a los niveles diarios de fondo regional de PM₁₀ en regiones españolas, también ha identificado de forma regular desde el año 2004 los eventos de combustión de biomasa producidos por incendios forestales que también producían un incremento de los niveles diarios de fondo regional de PM₁₀ en dichas regiones, se ha podido recopilar una amplia base de datos de días episódicos de polvo africano y de combustión de biomasa. Ello ha permitido evaluar y diferenciar los efectos que ambos tipos de eventos naturales producen sobre la mortalidad diaria en todas las regiones del territorio nacional.

La identificación de los eventos de combustión de biomasa se realiza sobre la base del análisis diario del modelo numérico de pronóstico NAAPS – Naval Research Laboratory (NRL), Monterey, CA. Este modelo realiza predicciones de las emisiones y

del transporte, dispersión y depósito de los aerosoles generados por los incendios forestales previamente identificados a partir de imágenes de satélite. El impacto de este tipo de aerosoles en los niveles de partículas de las respectivas zonas de estudio se realiza para cada día episódico a partir del análisis de series temporales de valores medios diarios de concentración de PM_{10} en estaciones de medida de calidad del aire de fondo regional, siguiendo las recomendaciones de la Comisión Europea para la demostración y el descuento de superaciones atribuibles a fuentes naturales: (Commission Staff Working Paper, 2011). Sin embargo, aún no existe un procedimiento normalizado como en el caso de los eventos de polvo africano para poder estimar cuantitativamente las contribuciones de las partículas generadas en los incendios forestales a los niveles de PM_{10} registrados en las estaciones de medida de la calidad del aire.

La información sobre días episódicos proporcionada por el MAPAMA, correspondió al periodo 2004-2009 y a las 9 regiones geográficas mencionadas anteriormente (Figura 2). En las islas Canarias la base de datos no estaba completa por falta de datos disponibles de concentración de PM en estaciones de fondo regional durante gran parte del periodo de medida. Hasta el año 2006 no estuvieron disponibles. Por este motivo el número de días episódicos de ambos tipos está claramente infravalorado, así que los resultados correspondientes a esta región de estudio no deben considerarse representativos.

La frecuencia anual de días episódicos africanos varió entre el 9.6% en la zona NW hasta el 30.1% en la SE (Figura 11). La frecuencia anual de días episódicos de biomasa fue menor que la de africanos y varió entre el 0.1% en las Islas Baleares y la zona N hasta el 8.5% en la zona NW. La coincidencia de días episódicos africanos y de biomasa comprendió desde el 0% de los registrados en la zona N de biomasa hasta el 100% de los acontecidos en las islas Baleares (Figura 12).

Frecuencia de días episódicos AFR y BIO en 2004-2009

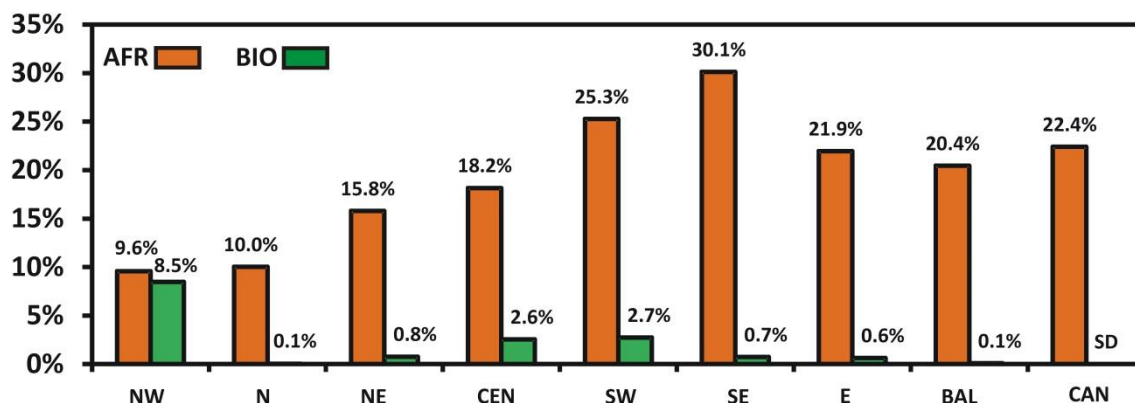


Figura 11. Porcentaje de días episódicos de transporte de polvo africano (AFR) y de combustión de biomasa (BIO) para cada zona de estudio en el periodo 2004-2009. SD: sin datos.

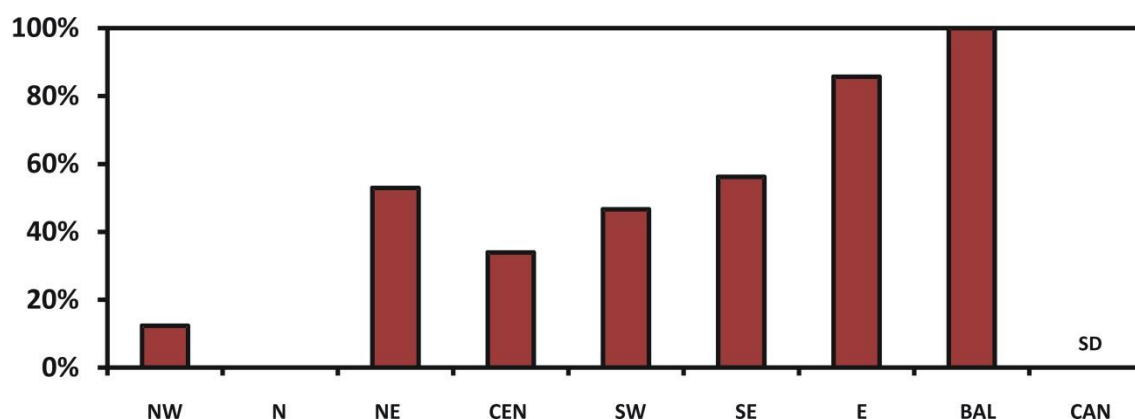


Figura 12. Porcentaje de días episódicos coincidentes de transporte de polvo africano y de combustión de biomasa (AFR&BIO) respecto del total registrado de biomasa para cada zona de estudio en el periodo 2004-2009. SD: sin datos.

3.3 Revisión bibliográfica.

A continuación se presentan y describen los principales estudios publicados en revistas científicas con índice de impacto acerca del cambio climático, los eventos meteorológicos extremos asociados al mismo, el impacto que tienen dichos eventos sobre los niveles de contaminantes atmosféricos y los efectos adversos que producen sobre la salud en Europa y en concreto en España.

3.3.1 Revisión General.

De Sario et al. (2013) realizaron una minuciosa revisión bibliográfica de los efectos sobre la salud por causas respiratorias asociados al cambio climático en Europa. En este trabajo se hace hincapié en los **efectos sinérgicos** que se producen por la exposición a contaminantes atmosféricos durante la ocurrencia de ciertos eventos

atmosféricos extremos. Es decir, la exposición a una misma concentración de contaminantes atmosféricos produce mayores efectos adversos sobre la salud de la población, si además se produce simultáneamente el evento extremo. Este tipo de efectos se han podido determinar durante el desarrollo de olas de calor en ciudades del área mediterránea por la exposición a O₃ y PM. También existen indicios del desarrollo de interacciones entre la contaminación atmosférica por PM y la ocurrencia de incendios forestales y de eventos de transporte de polvo mineral desde zonas áridas, que aumentarían la toxicidad de las PM. En conclusión, el cambio climático está modificando los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud por causas respiratorias de distintas maneras.

De Sario M., Katsouyanni K., Michelozzi P., 2013. Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. *European Respiratory Journal*, 42(3):826-43. Doi: 10.1183/09031936.00074712.

3.3.2 Efectos sobre la salud producidos por intrusiones de polvo africano en regiones de España.

Pérez et al. (2008) identificaron mayores incrementos en mortalidad diaria por exposición a material particulado de la fracción gruesa (coarse PM o PM_{10-2.5}) durante días episódicos de polvo africano respecto del resto de los días en Barcelona durante el periodo marzo 2003 – diciembre 2004. Este efecto no se encontró respecto de la exposición a PM_{2.5}. Sin embargo la composición química de las muestras de PM_{10-2.5} y PM_{2.5} no varió significativamente en días episódicos.

Pérez L., Tobías A., Querol X., Künzli N., Pey J., Alastuey A., 2008. Coarse particles from Saharan dust and daily mortality. *Epidemiology*, 19, 1–8.

Linares et al. (2010) alertaron acerca del hecho de que las superaciones del valor límite diario de PM₁₀ atribuidas a causas naturales, como las tormentas de polvo desde regiones áridas, no sean tenidas en cuenta en el cómputo total anual de las permitidas en la UE. En estudios realizados en Madrid y Barcelona se evidenció que en días episódicos de polvo africano la fracción PM_{10-2.5} presentó una relación estadísticamente significativa con los niveles de mortalidad, mientras que en el resto de los días fue la fracción PM_{2.5} la que mostró este tipo de asociación.

Linares C., Tobías A., Díaz J., 2010. Is there new scientific evidence to justify reconsideration of the current WHO guidelines for particulate matter during dust intrusions?. *Science of the Total Environment*, 408, 2283–2284.

Jiménez et al. (2010) analizaron el impacto de los niveles de PM_{10} , $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$ en la mortalidad diaria por distintas causas (causas orgánicas totales excepto accidentes, causas circulatorias y causas respiratorias) de la población de edad superior a 75 años en Madrid durante el periodo 2003-2005. En días con/sin intrusión se encontraron asociaciones estadísticamente significativas entre mortalidad por los tres tipos considerados y $PM_{10}/PM_{2.5}$, pero no con $PM_{2.5}/PM_{10}$ ni con $PM_{10-2.5}$.

Jiménez E., Linares C., Martínez D., Díaz J., 2010. Role of Saharan dust in the relationship between particulate matter and short-term daily mortality among the elderly in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 408, 5729–5736.

Tobías et al. (2011) encontraron que los efectos de la exposición a corto plazo a niveles de $PM_{10-2.5}$ en los niveles de mortalidad total diaria son mayores durante días episódicos de polvo africano que durante el resto de los días. Sin embargo la mortalidad diaria asociada a la exposición a $PM_{2.5}$ no varió entre días episódicos y no episódicos en Madrid durante el periodo 2003-2005.

Tobías A., Pérez L., Díaz J., Linares C., Pey J., Alastuey A., Querol X., 2011. Short-term effects of particulate matter on total mortality during Saharan dust outbreaks: a Case-Crossover analysis in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 412–413, 386–389.

Pérez et al. (2012a y b) identificaron un aumento en el riesgo de mortalidad por causas cardiovasculares en Barcelona durante días episódicos del periodo 2003-2007, atribuible tanto a la contribución del polvo africano a los niveles de PM_{10} como a la del resto de las fuentes locales. De hecho la contribución no-africana de PM_{10} produjo mayores efectos adversos en días episódicos que en el resto de los días. Es decir, que las PM_{10} de origen local fueron más tóxicas en días episódicos que en el resto de días. También encontraron evidencias de que los efectos en la salud por causas específicas podrían deberse a las fracciones $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5-1}$ y no a la fracción de tamaños submicrométrica, PM_1 .

Pérez L., Tobías A., Pey J., Pérez N., Alastuey A., Sunyer J., Querol X., 2012a. Effects of local and Saharan particles on cardiovascular disease mortality. *Epidemiology*, 23, 768-769.

Pérez L., Tobías A., Querol X., Pey J., Alastuey A., Díaz J., Sunyer J., 2012b. Saharan dust, particulate matter and cause specific mortality: a Case-Crossover study in Barcelona (Spain). *Environment International*, 48, 150–155.

Reyes et al. (2014) identificaron asociaciones estadísticamente significativas entre niveles medios diarios de PM_{2.5} y admisiones hospitalarias por causas circulatorias y por todas las causas en periodos sin influencia de polvo africano. Por el contrario durante los días episódicos los incrementos en las admisiones hospitalarias se obtuvieron por causas respiratorias y debido a los niveles de PM₁₀ y PM_{10-2.5} en Madrid (2003-2005).

Reyes M., Díaz J., Tobías A., Montero J.C., Linares C., 2014. Impact of Saharan dust particles on hospital admissions in Madrid. *International Journal of Environmental Health Research*, 24, 63–72.

Karanasiou et al. (2012) y Stafoggia et al. (2016) publicaron exhaustivas revisiones bibliográficas acerca de los efectos sobre la salud asociados al polvo africano obtenidos en diferentes regiones del territorio europeo. Se encontraron numerosas inconsistencias entre los resultados obtenidos en diferentes países, por lo que aún no está claro de modo concluyente que en todos los casos la exposición a PM produzca mayores niveles de mortalidad y/o hospitalizaciones en días episódicos que durante el resto de los días. Las principales conclusiones de estas revisiones son que todavía es necesario seguir realizando estudios que permitan profundizar en los mecanismos que producen los efectos sobre la salud por la exposición al polvo africano. Además, para proteger la salud de la población parece evidente que va a ser preciso realizar controles más severos sobre las fuentes antropogénicas en aquellas zonas que reciben aportes de polvo del Sáhara.

Karanasiou A, Moreno N, Moreno T, Viana M, de Leeuw F, Querol X., 2012. Health effects from Sahara dust episodes in Europe: literature review and research gaps. *Environment International*, 47,107–114.

Stafoggia M. and the MED-PARTICLES study group, 2016. Desert dust outbreaks in Southern Europe: Contribution to daily PM10 concentrations and short-term associations with mortality and hospital admissions. *Environmental Health Perspectives*, 124, 413-419. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1409164>.

Pandolfi et al. (2014) identificaron un aumento en la toxicidad de las PM en Barcelona con el aumento de las contribuciones de polvo africano, lo cual a su vez daba lugar a una progresiva reducción de la altura de la capa de mezcla. Este hecho podría producir una acumulación progresiva de contaminantes antropogénicos de origen local y favorecer la posible formación de nuevas PM por la acumulación de precursores gaseosos sobre la superficie de las de polvo africano.

Pandolfi M., Tobias A., Alastuey A., Sunyer J., Schwartz J., Lorente J., Pey J., Querol X., 2014. Effect of atmospheric mixing layer depth variations on urban air quality and daily mortality during Saharan dust outbreaks. *Science of the Total Environment*, 494-495, 283-289.

Díaz et al. (2017) realizaron un estudio a gran escala para analizar el efecto de las intrusiones de polvo sahariano sobre la mortalidad diaria en todas las regiones del territorio nacional durante el periodo 2004-2009. La frecuencia anual de días episódicos varió entre el 9.6% (NW) y el 30.1% (SE). En todas las regiones la ocurrencia de intrusiones de polvo sahariano produjo aumentos estadísticamente significativos en los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$. El análisis estadístico con regresión de Poisson se realizó con las series de datos de niveles de contaminantes atmosféricos y de mortalidad total excepto causas naturales, correspondiente a las capitales de provincia de cada región obteniéndose diferentes patrones:

- (1) Ciudades que mostraron asociación entre mortalidad y PM en días episódicos de polvo africano pero no en días no episódicos (Coruña: NW y Las Palmas de Gran Canaria: Islas Canarias).
- (2) Ciudades que no mostraron asociación entre mortalidad y PM independientemente del hecho de que hubiera o no aportes de polvo africano, (Palma de Mallorca: Islas Baleares) o que la mostraron sólo en días no episódicos (Bilbao: N).
- (3) Ciudades que mostraron asociación entre mortalidad y PM en días episódicos, en el periodo de verano, y en días no episódicos (Madrid: Centro, Málaga: SE y Sevilla: SW). En este último caso la asociación se obtuvo en el periodo de verano en Sevilla y Málaga para PM_{10} y en el resto de los meses del año para Madrid y $PM_{2.5}$ y para Sevilla y PM_{10} .

Díaz J., Linares C., Carmona R., Russo A., Ortiz C., Salvador P., Machado Trigo R., 2017. Saharan dust intrusions in Spain: Health impacts and associated synoptic conditions. *Environmental Research*, 156, 455-467.

3.3.3 Efectos sobre la salud producidos por incendios forestales en regiones de España.

Linares et al. (2015) asociaron los niveles de PM_{10} en Madrid en 2004-2009, con un incremento en la mortalidad por causas naturales para la población de más de 75 años, en días de combustión de biomasa por incendios forestales.

Linares C., Carmona R., Tobías A., Mirón I. J., Díaz J., 2015. Influence of advections of particulate matter from biomass combustion on specific-cause mortality in Madrid in the period 2004–2009. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 7012-7019, DOI 10.1007/s11356-014-3916-2.

Faustini et al. (2015) evaluaron el impacto en la salud de las emisiones de incendios forestales en ciudades del sur de Europa e identificaron un mayor impacto de los niveles de PM₁₀ en mortalidad por causas específicas (cardiovascular y respiratoria) en días en los que hubo aportes de los incendios a los niveles de PM que en el resto de días en el periodo 2003-2010.

Faustini A. and the MED-PARTICLES study group, 2015. Short-term effects of particulate matter on mortality during forest fires in Southern Europe: results of the MED-PARTICLES Project. *Occupational and Environmental Medicine*, 72(5), 323-329.

Linares et al. (2018) han realizado un estudio reciente a escala nacional sobre la estimación del impacto de las PM generadas por los incendios forestales en los niveles de mortalidad. Los resultados obtenidos mostraban que durante el desarrollo de este tipo de eventos se produjeron aumentos estadísticamente significativos en los niveles de PM, en la mayoría de las provincias analizadas. Es decir, los niveles de fondo regional de PM eran más elevados en días con aportes de incendios forestales que en el resto de los días incluso al eliminar los días en los que coincidían los aportes de polvo africano con los de los incendios. Los niveles de PM₁₀ registrados en días de incendio forestal produjeron aumentos en los niveles de mortalidad diaria en aquellas zonas en los que el número de incendios forestales fue más elevado, es decir la zona centro, la NW y la SW. Además se pudo identificar que los incendios forestales y los eventos de polvo africano produjeron efectos sobre la salud de forma independiente y aditiva. Es decir, si se producen simultáneamente en una determinada región, los efectos en la mortalidad por la exposición a PM son mayores que si no se produjeran los eventos o sólo eventos de uno de los dos tipos.

Linares C., Carmona R., Salvador P., Díaz J., 2018. Impact on mortality of biomass combustion from wildfires in Spain: A regional analysis. *Science of the Total Environment*, 622-623, 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.321>.

3.3.4 Cambio climático e intrusiones de polvo africano.

Moulin et al. (1997) pudieron determinar que la tendencia creciente de la carga de polvo transportada hasta el Caribe entre 1964 y 1996 estaba asociada con un aumento regular de los valores del índice NAO en este mismo periodo. La variación interanual de este parámetro climático parece determinar la circulación atmosférica así como el régimen de precipitaciones en el hemisferio norte que regulan el transporte y la carga de polvo mineral desértico hasta zonas concretas. Así, valores positivos del índice NAO se asocian con menores precipitaciones sobre el sur de Europa, el mar Mediterráneo y el norte de África y con una mayor frecuencia de episodios de transporte de polvo africano sobre el sur de Europa.

Moulin D., Lambert C. E., Dulac F., Dayan U., 1997. Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 387, 691–694.

Prospero y Lamb (2003) y Prospero (2006) detectaron un aumento en la frecuencia de tormentas de polvo producidas en numerosas regiones desérticas del Sáhara y el Sahel durante el periodo 1965-1998, como consecuencia de las altas temperaturas, la reducción de las precipitaciones asociado al incremento de los periodos de sequía, así como del aumento de la erosión del suelo por causas antrópicas. Además, los cambios en la circulación atmosférica producidos por el cambio climático han podido llevar asociado un incremento del riesgo de ocurrencia de los eventos de transporte a larga distancia del polvo mineral resuspendido, desde las regiones fuente hasta zonas muy alejadas de las mismas. Prueba de ello es que estos autores asociaron el desarrollo de intensos eventos de transporte de polvo desde el norte de África hasta el Caribe con importantes episodios de “El Niño” y la Circulación del Sur – ENSO.

Prospero J.M., Lamb P.J., 2003. African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implications. *Science*, 302, 1024-1027.

Prospero J.M., 2006. Saharan dust impacts and climate change. *Oceanography*, 19(2), 60-61.

Rodríguez et al. (2015) formularon un índice climatológico (North African dipole intensity - NAFDI) cuya variabilidad modula los procesos de transporte de polvo sahariano. Valores altos del índice NAFDI están asociados con elevadas velocidades de viento al norte de la ITCZ lo que da lugar a un incremento del transporte de polvo hacia las regiones subtropicales del Atlántico Norte. Además aumenta la contribución de polvo en rangos de tamaño de la fracción gruesa y están asociados con aumentos

en la precipitación sobre el sur del Sahel. Es decir, altos valores del NAFDI en verano se asocian con un incremento de la exportación de polvo africano en las regiones subtropicales y una reducción de la misma en los trópicos y viceversa.

Rodríguez S., Cuevas E., Prospero J. M., Alastuey A., Querol X., López-Solano J., García M. I., Alonso-Pérez S., 2015. Modulation of Saharan dust export by the North African dipole. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 7471-7486.

Heffernan (2016) elaboró una revisión de estudios recientes que parecen indicar que actualmente se está produciendo una expansión de los trópicos hacia el norte en ambos hemisferios. Este hecho podría alterar dramáticamente las condiciones climáticas en determinadas zonas del planeta en forma de intensas sequías, reducción de la precipitación, aumento de los incendios forestales y un aumento de las zonas áridas que componen los extremos norte y sur de la región tropical.

Heffernan O., 2016. The mystery of the expanding tropics. *Nature*, 530, 20-22.

4. Informe Técnico de Verificación II. Caracterización de la estructura vertical de la atmósfera de Madrid durante eventos africanos a partir de radiosondeos y medidas LIDAR.

El estudio de la estructura vertical de la atmósfera puede llevarse a cabo por medio de radiosondeos. Los globos sonda o radiosondas, transportan sensores de presión, temperatura y humedad y transmiten las medidas realizadas a distintas alturas y cada pocos segundos a una estación receptora en superficie (Figura 13). Las radiosondas pueden incorporar también sensores de dirección y velocidad del viento.



Figura 13. Investigadores del CIEMAT a punto de realizar un radiosondeo meteorológico en el mes de julio de 1998, en Soto del Real (Madrid).

El análisis de los perfiles verticales de variables meteorológicas (presión, temperatura y temperatura del punto de rocío) obtenidos por los radiosondeos permite determinar los valores asociados de temperatura potencial y de humedad absoluta en las mismas coordenadas geográficas y valores de altura geopotencial que los datos originales. Con esta información es posible estimar la altura de la capa de mezcla sobre Madrid a mediodía (las 12 UTC), la cual determina el grado de concentración de los contaminantes atmosféricos en superficie.

La capa de mezcla es la parte de la troposfera directamente influenciada por la superficie de la tierra y que responde a los forzamientos de la misma en escalas temporales cortas. Se extiende desde la superficie hasta una altura variable a lo largo del día y que frecuentemente coincide con la presencia de una inversión térmica. A

menor altura de la capa de mezcla mayor concentración de contaminantes atmosféricos procedentes de fuentes locales en zonas urbanas (Figura 14).

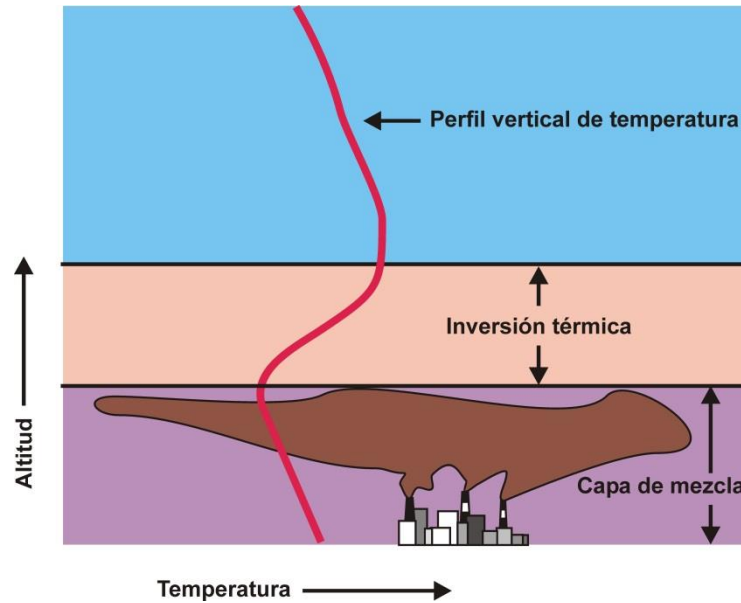


Figura 14. Esquema representativo de la influencia de la altura de la capa de mezcla en la concentración de los contaminantes atmosféricos en aire ambiente. A menor altura de capa de mezcla, mayor concentración de contaminantes a los que está expuesta la población en un área urbana. La inversión térmica en altura impide que los contaminantes se dispersen verticalmente por encima de su base. (Adaptado de: Ahrens C.D., 1999).

En este trabajo se han utilizado los radiosondeos que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha realizado diariamente a mediodía en el Aeropuerto de Madrid Barajas a lo largo del periodo 2011-2015 (Figura 6). Los valores de altura de la capa de mezcla (MLH) se estimaron utilizando el método de la parcela simple ("simple parcel method", Holzworth, 1964) para cada radiosondeo disponible durante este periodo. Aplicando este método la MLH se estima como el nivel de equilibrio de una parcela de aire con la misma temperatura potencial que la calculada al nivel del suelo (Figura 15).

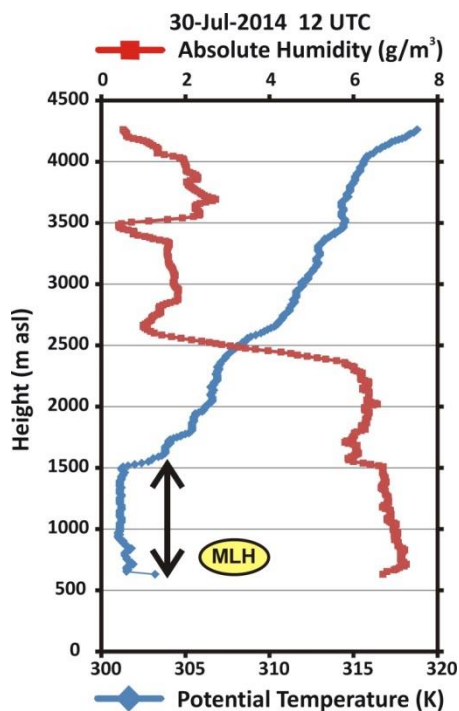


Figura 15. Ejemplo de estimación de la altura de la capa de mezcla a mediodía (MLH) a partir del método de la parcela simple, utilizando los perfiles verticales de temperatura potencial y humedad absoluta obtenidos con un radiosondeo realizado el 30 de julio de 2014 en el aeropuerto de Madrid.

En total se obtuvieron 1726 valores de altura de capa de mezcla a mediodía durante el periodo 2011-2015 (el 95% del posible total) y 286 de ellos correspondieron a días episódicos de transporte de polvo africano sobre Madrid (Figura 16 y Tabla I).

En promedio la altura de la capa de mezcla alcanzó un valor de 1565 m SNM y fue más alta en días episódicos de polvo africano (1617 m SNM) que durante el resto de los días (1555 m SNM), si bien las diferencias de los valores medios y de las medianas de ambos grupos de datos no fueron estadísticamente significativas.

Ahora bien, al considerar los días africanos según la intensidad del episodio se ha evidenciado una reducción estadísticamente significativa de la altura de la capa de mezcla desde los eventos leves (1738 m SNM) a los moderados (1607 m SNM) e intensos (1352 m SNM).

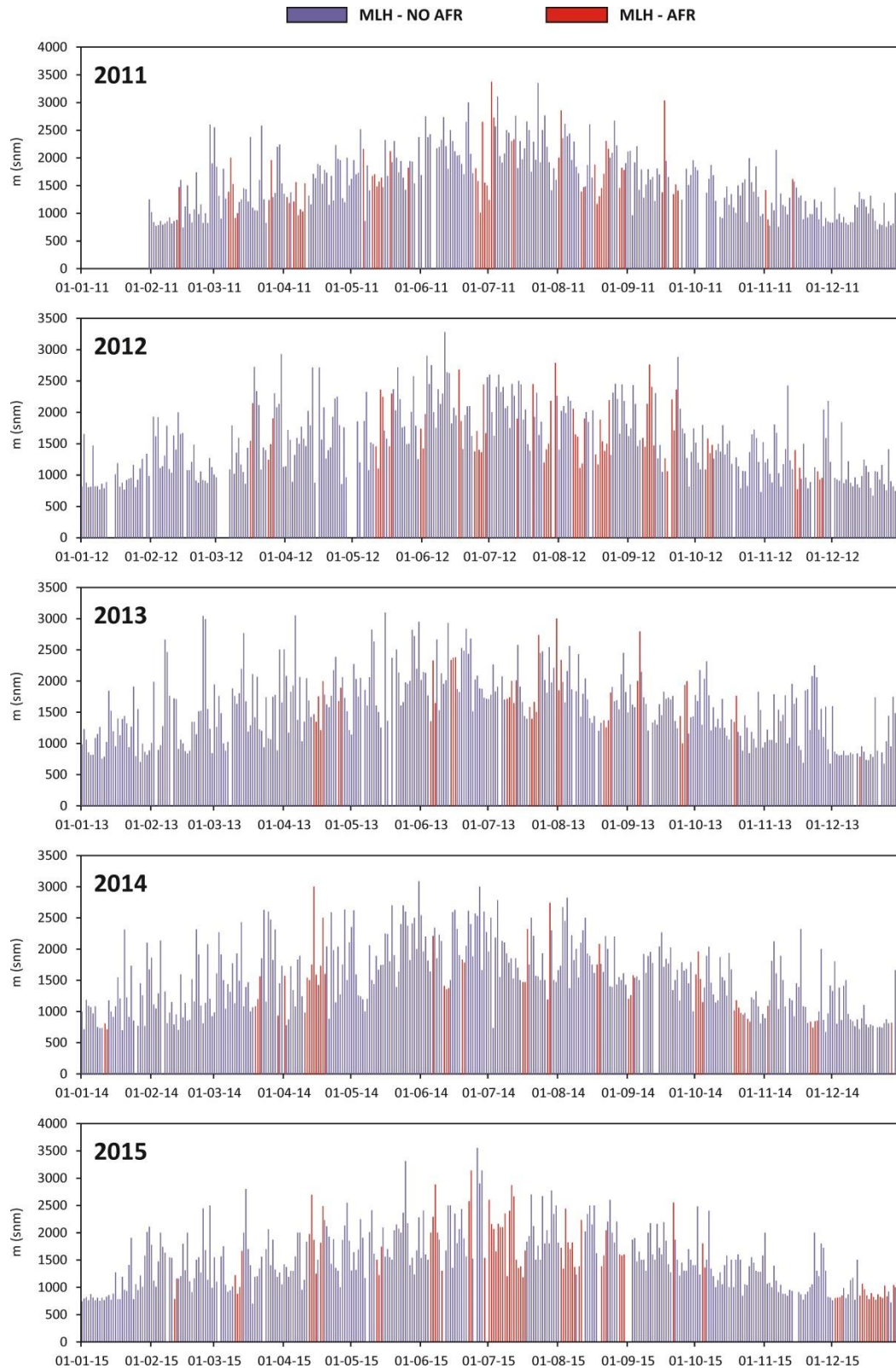


Figura 16. Valores de altura de capa de mezcla a mediodía sobre Madrid en el periodo 2011-2015, diferenciando entre días episódicos de polvo africano (MLH-AFR) y el resto de los días (MLH - No AFR).

Tabla I. Estadísticos correspondientes a la serie temporal de valores de altura de capa de mezcla a mediodía (MLH) en Madrid durante el periodo 2011-2015.

MLH	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Error Estándar
Total	1726	1565	1500	555	13
No-AFR	1440	1555	1500	555	15
AFR	286	1617	1539	551	33
AFR-L	82	1738	1654	553	61
AFR-M	173	1607	1500	545	41
AFR-H	31	1352	1224	500	90

Es decir, que se ha podido detectar la existencia de un fenómeno de reducción estadísticamente significativa de la altura de la capa de mezcla a mediodía sobre Madrid, asociado a un incremento de la intensidad de los eventos de transporte de polvo africano (Figura 17). En la Figura 17 la raya sobre el centro de cada caja representa la mediana o percentil 50 de la serie de datos correspondiente. La muesca a ambos lados de la misma es el intervalo de confianza del 95% de la mediana. Los bordes inferior y superior de cada caja representan los valores de los percentiles 25 y 75, respectivamente, de la serie de datos correspondiente y el punto rojo representa su valor medio. Los extremos de las rayas o bigotes indican los valores mínimo y máximo de cada serie de datos.

Al comparar entre las cajas de los distintos grupos de datos, aquellos en los que las muescas (los intervalos de confianza) no se superpongan, se interpreta como que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas correspondientes. Es equivalente al método de Kruskal-Wallis de comparación de medianas.

La reducción de la capa de mezcla fue del 22% y del 16% desde los días de evento africano leve y moderado a intenso, respectivamente. La reducción media de la altura de capa de mezcla entre días de evento leve y moderado fue menos acusada, el 8%, aunque también es una diferencia estadísticamente significativa.

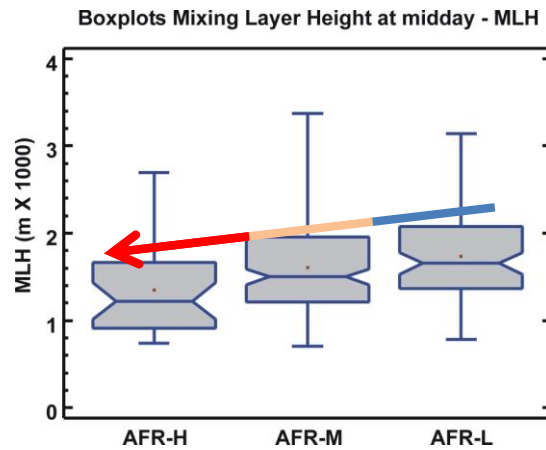


Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes de la altura de capa de mezcla a mediodía (MLH) sobre Madrid durante días episódicos de polvo africano leves (AFR-L), moderados (AFR-M) e intensos (AFR-H).

La capa de mezcla en días de episodio africano intenso fue en promedio un 13% más reducida que durante el resto de los días no episódicos.

Aparte de los radiosondeos existen otras herramientas que permiten estudiar la estructura vertical de la atmósfera. Una de ellas es la metodología LIDAR (acrónimo de light detection and ranging). Con este tipo de equipos es posible obtener perfiles verticales de propiedades ópticas, cuyo análisis puede permitir detectar la presencia de estratos en altura de aerosoles sobre la capa de mezcla así como su evolución temporal (Figura 18). En el laboratorio METALAB del CIEMAT (Figura 6) se dispone de un equipo LIDAR Raman multi-longitud de onda (Figura 19) el cual forma parte de la red europea EARLINET (European Aerosol Research Lidar NETWORK) y realiza medidas con propósitos climatológicos cumpliendo estrictos protocolos específicos establecidos por dicha red (Pappalardo, 2014).

Los productos básicos que se pueden obtener con un LIDAR son perfiles verticales de propiedades ópticas que están relacionados con la concentración másica de los aerosoles. Entre las propiedades más utilizadas es preciso mencionar la denominada “señal de rango corregida”, obtenida como la señal bruta multiplicada por el cuadrado de la distancia y el “coeficiente de backscattering”, obtenido a partir de la inversión de las señales LIDAR (Klett, 1981). Estos parámetros informan cualitativamente de la presencia de aerosoles resuelta en altura (Figura 18).

Finalmente se dispuso de medidas LIDAR válidas para 47 días episódicos de polvo africano durante el periodo 2011-2014 ya que durante el año 2015 el equipo no estuvo operativo. Esto supuso una disponibilidad de datos para el 15% de los días episódicos del periodo de estudio.

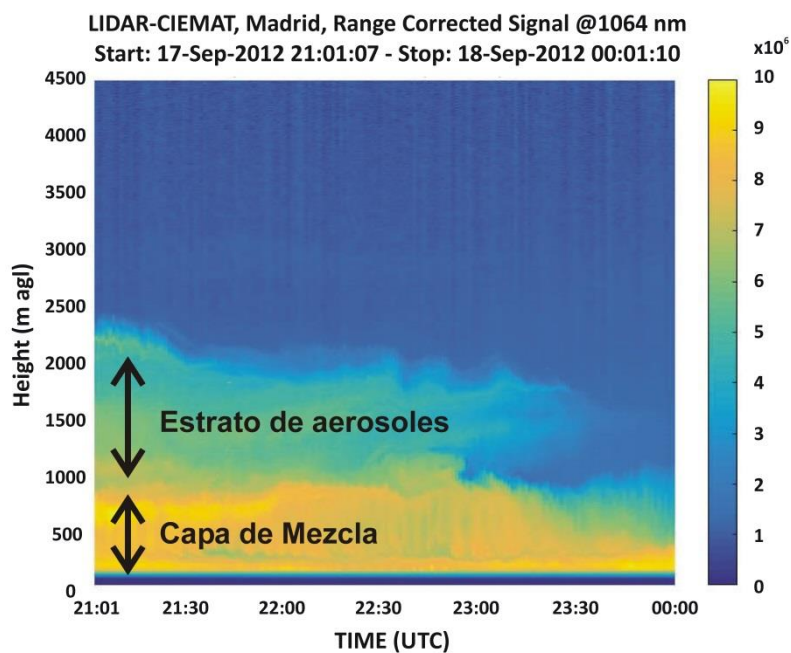


Figura 18. Imagen obtenida con el equipo LIDAR (Light Detection And Ranging) del CIEMAT el 17 de septiembre de 2012. Se pudo detectar la evolución temporal de la capa de mezcla sobre Madrid, en la que quedan contenidos los contaminantes atmosféricos emitidos en superficie, y la presencia de un estrato de polvo mineral africano por encima de la misma.

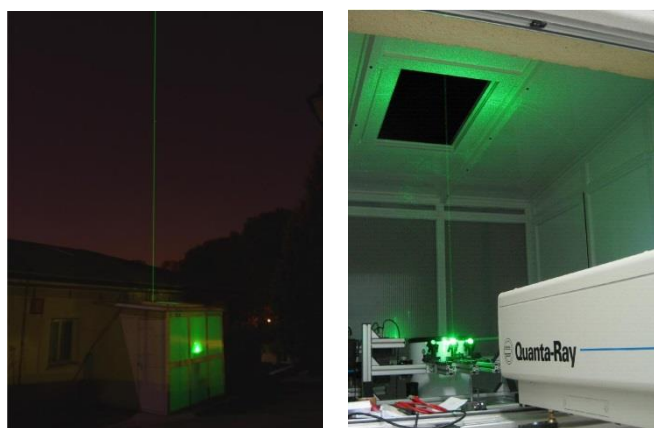


Figura 19. Estación LIDAR del CIEMAT.

El análisis detallado de las medidas LIDAR disponibles durante días episódicos de polvo africano, permitió clasificarlas en dos grupos. El primero de ellos, que agrupó al 52% de las mismas, se caracterizó por describir un único estrato de aerosoles adyacente a la superficie (Aerosol Layer Adjacent to the Ground – ALAG, Figura 20a). En el 48% de las medidas restantes se pudo identificar la presencia de un estrato de aerosoles por encima del ALAG que probablemente estaba formado por polvo africano (Figura 20b).

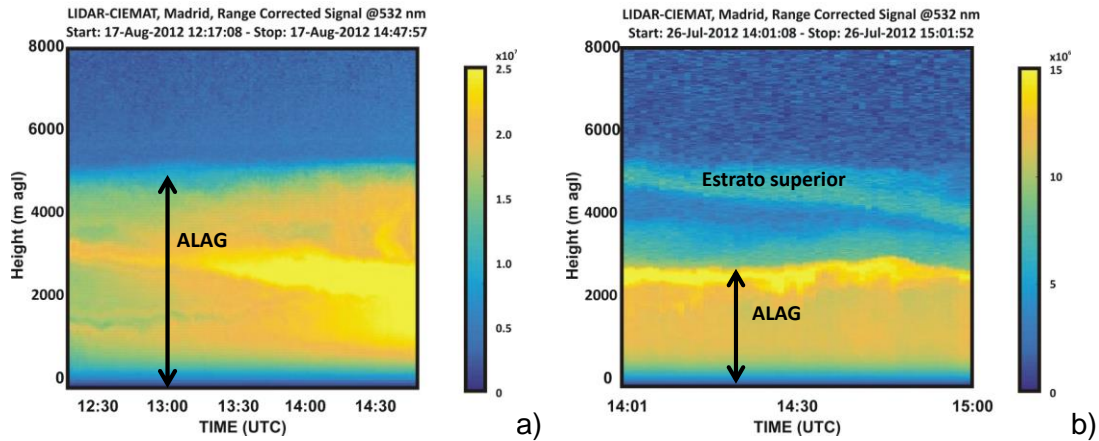


Figura 20. Perfiles verticales de señal de rango corregida obtenidos en la estación LIDAR del CIEMAT a 532 nm para un periodo temporal específico de los días 17 de agosto (a) y 26 de julio (b) de 2012.

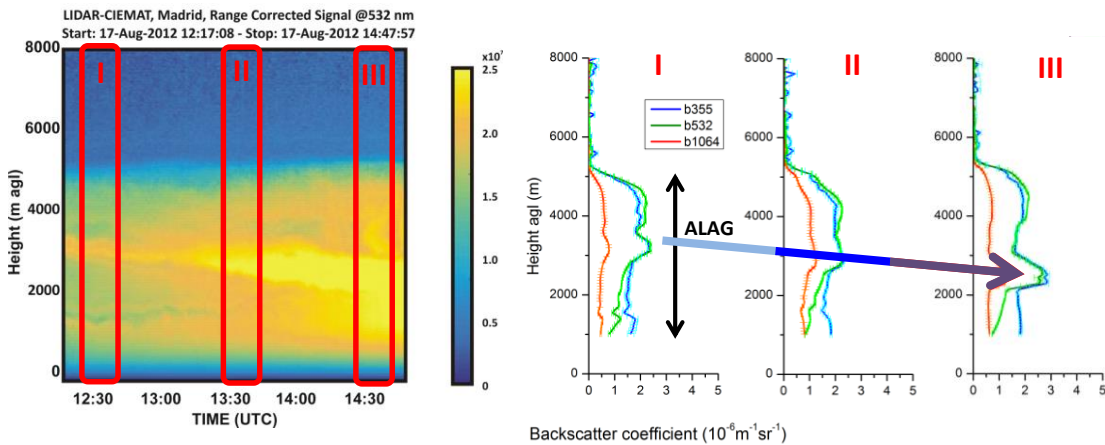


Figura 21. Perfiles verticales de señal de rango corregida obtenidos el 17 de agosto de 2012 a 532 nm (izquierda) y perfiles verticales del coeficiente de backscattering obtenidos a 355, 532 y 1064 nm para periodos de 15 minutos a las 12:30 (I), 13:30 (II) y 14:30h (III) (derecha). La flecha indica la subsidencia del estrato con alta concentración de aerosoles en el interior del ALAG.

En ambos casos su pudo caracterizar la subsidencia o descenso vertical a lo largo de un periodo temporal, o bien de estratos con alta concentración de aerosol atmosférico contenidos en el ALAG (Figura 21) o bien de los estratos superiores de aerosol por encima del ALAG (Figura 22).

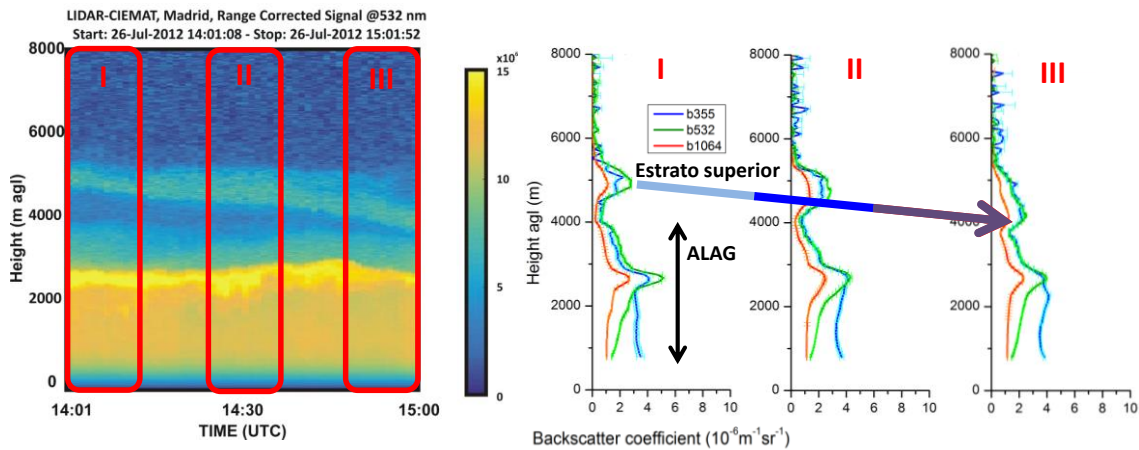


Figura 22. Perfiles verticales de señal de rango corregida obtenidos el 26 de julio de 2012 a 532 nm (izquierda) y perfiles verticales del coeficiente de backscattering obtenidos a 355, 532 y 1064 nm para periodos de 15 minutos a las 14:00 (I), 14:30 (II) y 15:00h (III) (derecha). La flecha indica la subsidencia del estrato superior de aerosoles.

La Figura 23 muestra como al promediar los perfiles verticales del coeficiente de backscattering para días de evento africano, se pudo apreciar que los eventos de intensidad alta presentaban mayores valores del coeficiente en niveles cercanos a la superficie (hasta 3300 m SNM aproximadamente) que los eventos de intensidad media y baja. Por el contrario los eventos africanos de intensidad baja y media presentaban mayores valores del coeficiente de backscattering que los de intensidad alta, para alturas más elevadas. Es decir a mayor intensidad del evento africano, menor era la altitud en la cual se encontraba la mayor concentración de aerosoles atmosféricos.

El parámetro “Backscatter weighted altitude Z_c ” (Fórmula I) calculado a partir de los perfiles verticales del coeficiente de backscattering según Mona et al. (2006) de la altura media en la que encuentran los aerosoles, ponderada en función de los valores del coeficiente de backscattering. Es decir, es un indicador del centro de masas del aerosol atmosférico.

$$Z_c = \frac{\int_{Z_b}^{Z_t} Z \cdot \beta(Z) \cdot dZ}{\int_{Z_b}^{Z_t} \beta(Z) \cdot dZ} \quad (\text{Fórmula I})$$

Los días episódicos de polvo africano de intensidad alta presentaron en promedio un valor de Z_c menor (2379 m SNM) que los de intensidad media (3087 m SNM) y baja (2847 m SNM).

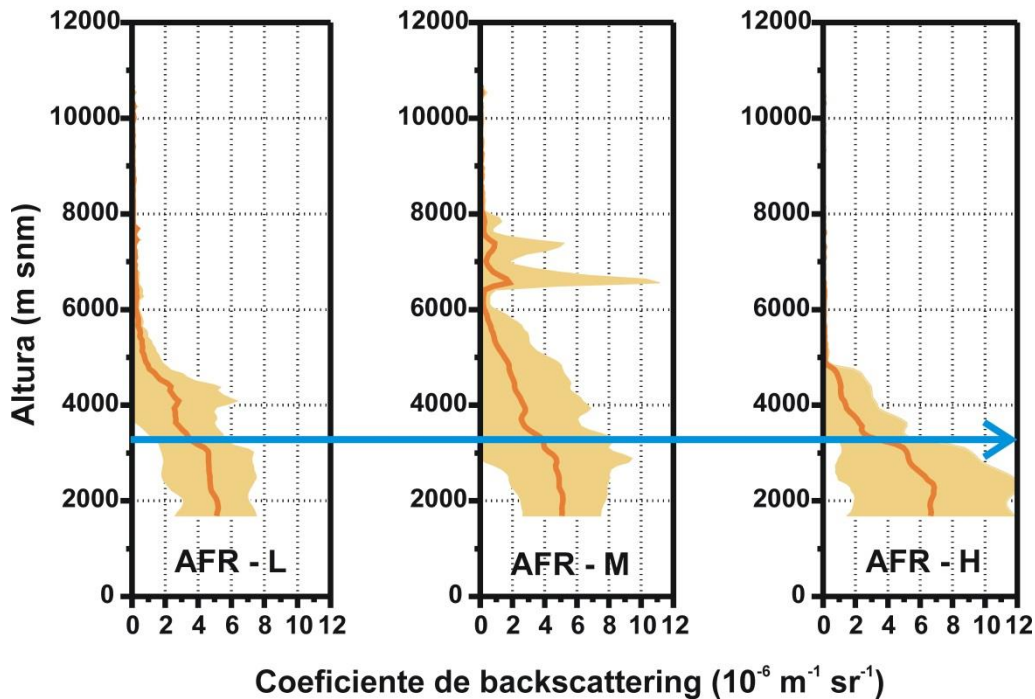


Figura 23. Perfiles verticales promedio del coeficiente de backscattering obtenidos a partir de medidas LIDAR en el CIEMAT durante días de episodio africano de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y alta (AFR-H) en el periodo 2011-2014. La flecha azul indica la altura por debajo de la cual los valores del coeficiente fueron más elevados en días episódicos de intensidad alta que de intensidad media y baja.

Estos resultados refuerzan la hipótesis de que los eventos de polvo africano más intensos han dado lugar a una mayor concentración de los aerosoles atmosféricos en los estratos más bajos de la atmósfera.

Otro tipo de información relevante obtenida a partir del análisis de las medidas LIDAR, ha sido el cálculo del “espesor óptico de aerosoles” (aerosol optical depth AOD). Este parámetro es una medida de la extinción de la luz producida por los aerosoles atmosféricos. Valores elevados de este parámetro indican que una menor cantidad de radiación solar incide en la superficie de la tierra.

Los resultados obtenidos indican que en promedio el AOD fue superior en los periodos de medida de días africanos de intensidad alta (0.234) que en días de intensidad media (0.207) y baja (0.195). Eso implica un aumento del AOD del 20% y el 13% desde días episódicos de intensidad baja y media a días de intensidad alta, respectivamente.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Fernández et al. (2017) en un estudio cuyo objetivo era analizar propiedades ópticas de aerosoles durante días episódicos de polvo africano de diferente intensidad. La clasificación de los días episódicos se

basó en criterios similares a los utilizados en el presente estudio. Las medidas de las propiedades ópticas de aerosoles las obtuvieron de un fotómetro solar CIMEL, y fueron realizadas en las instalaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en Madrid en el periodo 2012-2015.

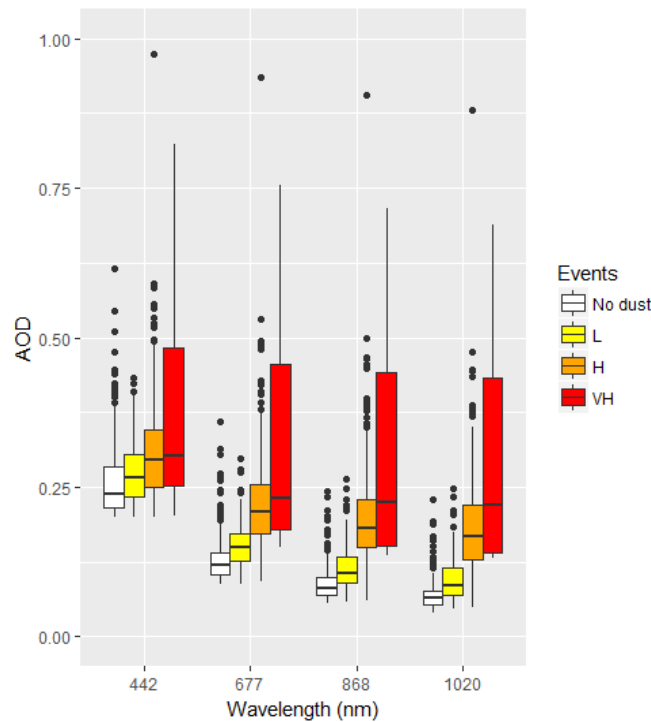


Figura 24. Espesor óptico de aerosoles (AOD) calculada para días de episodio africano de intensidad creciente (Low-L, High-H y Very High-VH) y el resto de los días (No dust) sobre Madrid en el periodo 2012-2015 a partir de medidas CIMEL. (Fuente: Fernández et al., 2017).

Para las medidas obtenidas en diferentes longitudes de onda con el CIMEL se obtuvo un aumento del AOD desde días sin polvo africano a días episódicos de intensidad creciente (Figura 24).

La radiación solar y la velocidad de viento registrados a 30 m y 52 m sobre el nivel de superficie (SNS), respectivamente en la torre meteorológica del CIEMAT (Figura 6) durante todo el periodo de medida, así como la velocidad de viento media calculada a lo largo de la capa de mezcla a partir de los radiosondeos, también decrecieron progresivamente desde días episódicos de intensidad baja a intensidad media y a intensidad alta. El test de Kruskal-Wallis aplicado a las distintas series de datos, dio como resultado la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre sus medianas, para un nivel de confianza del 95% en todos los casos (Figura 25).

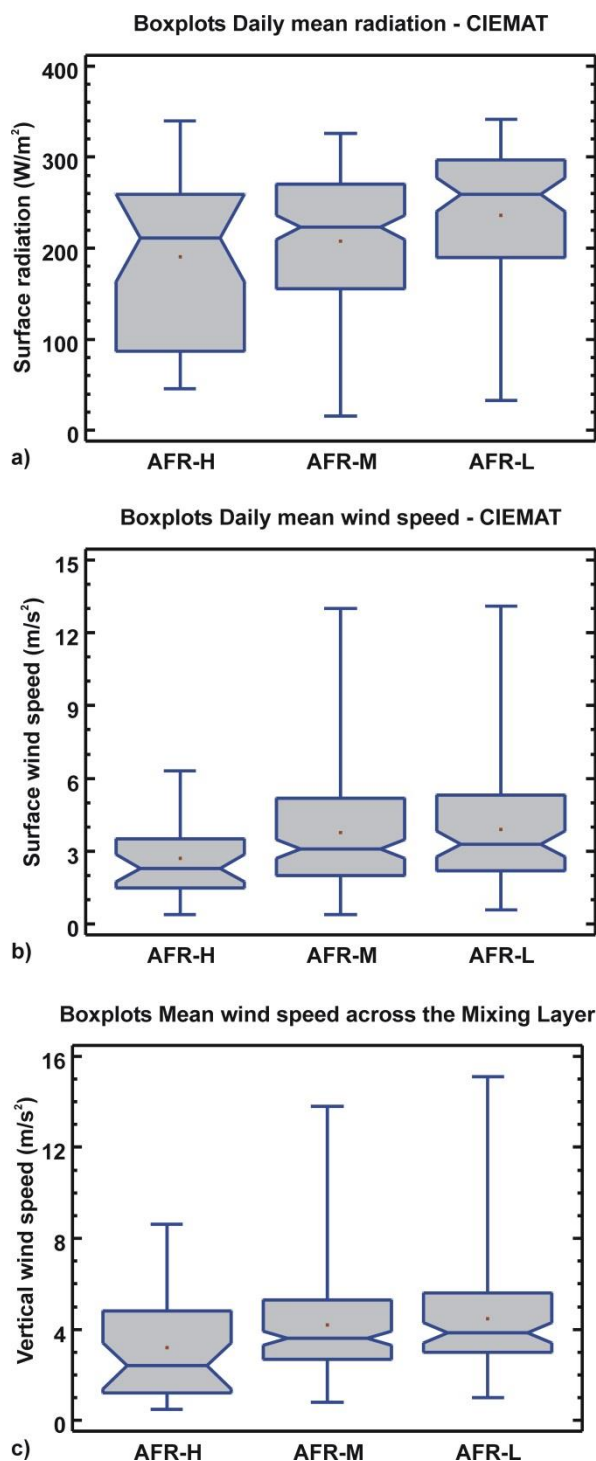


Figura 25. Diagrama de cajas y bigotes (boxplots) de los niveles medios diarios de radiación solar incidente (a) y de velocidad de viento en la estación meteorológica del CIEMAT (b) y de velocidad de viento media a lo largo de la capa de mezcla a mediodía sobre Madrid (c) durante días episódicos de polvo africano de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y elevada (AFR-H).

En consecuencia se podría extraer la conclusión de que los menores niveles de radiación solar incidente en la superficie de Madrid durante días episódicos de polvo

africano de intensidad creciente podrían limitar el crecimiento convectivo de la capa de mezcla y la turbulencia generada en su interior.

5. Informe Técnico de Verificación III. Variación de los niveles de contaminantes atmosféricos (partículas y gases) en Madrid, en función de la intensidad de los eventos africanos y de la altura de la capa de mezcla asociada a los mismos.

Con el objetivo de evaluar el impacto de los eventos de transporte de polvo mineral africano de diferente intensidad en los niveles de partículas y gases regulados normativamente por el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, se han recopilado las series temporales de valores medios diarios de los contaminantes atmosféricos registrados en estaciones de medida de la calidad del aire de la red del Ayuntamiento de Madrid (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO, NO_2 y CO). Para ello se han seleccionado las estaciones más representativas de los niveles de calidad del aire en un emplazamiento urbano de tráfico (Escuelas Aguirre) y en uno de fondo urbano (Casa de Campo) (Figura 6). Los niveles de SO_2 no se han evaluado puesto que apenas registran variaciones estacionales y sus niveles son muy reducidos desde la reducción drástica del consumo de carbón en las instalaciones de calefacción y agua caliente en Madrid y del contenido máximo permitido de azufre en los combustibles de tráfico rodado, establecido en 10 mg/kg por la Directiva Europea 2003/17/EC en vigor desde el 01 de enero de 2009 (Salvador et al., 2015). Además se han utilizado las series temporales disponibles de niveles medios diarios de concentración de número de partículas ultrafinas o UFP (partículas de tamaño inferior a 0.1 μm) registradas en el laboratorio METALAB del CIEMAT en el periodo de medida (Figura 6). Los niveles de concentración de número de UFP no están regulados por normativa puesto que la determinación de los mismos es altamente compleja. En el laboratorio METALAB se dispone de un instrumento TSI-SMPS el cual proporciona concentraciones de número de partículas en el rango de tamaños 15-600 nm (Gómez-Moreno et al., 2011). El laboratorio METALAB puede considerarse como una estación de medida de calidad del aire de fondo urbano. Los valores medios de las series temporales de contaminantes atmosféricos analizados en los distintos emplazamientos, se muestran en la Tabla II.

En principio se evidenció que los niveles medios diarios de partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) eran más elevados en los días episódicos de polvo africano con respecto al resto de los días en las estaciones urbana de tráfico y de fondo urbano y que las diferencias entre los niveles medios de ambos grupos de datos eran estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (Tabla II y Figura 26). Los mayores incrementos se obtuvieron para las series de PM_{10} en “Escuelas Aguirre” y “Casa de

Campo” (86% y 126%, respectivamente) y en menor proporción en los de PM_{2.5} (58% y 76%, respectivamente). Ello ha sido debido a las contribuciones de partículas de polvo mineral africano, que se sumaron a los aportes de partículas de fuentes locales. Si bien en estudios anteriores se ha podido determinar que los eventos de transporte de polvo africano en regiones españolas, producen generalmente un mayor impacto en los niveles de PM₁₀ que en los de PM_{2.5}, debido a la granulometría característica del polvo africano con tamaños comprendidos mayoritariamente en la fracción gruesa (entre 10 y 2.5 µm) (Querol et al., 2008).

Tabla II. Valores medios (y desviación estándar) de las series temporales de contaminantes atmosféricos registrados en las estaciones de medida de la calidad del aire “Escuelas Aguirre”, “Casa de Campo” y “CIEMAT” en todos los días del periodo 2011-2015 (Total), diferenciando entre los días episódicos de polvo africano (AFR), los de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y alta (AFR-H) y el resto de los días (No-AFR).

	Total	No-AFR	AFR	AFR-L	AFR-M	AFR-H
"Escuelas Aguirre" – estación de medida de tráfico urbano						
PM₁₀ (µg/m ³)	25 (14)	22 (10)	41 (17)	33 (10)	40 (12)	72 (25)
PM_{2.5} (µg/m ³)	13 (6)	11 (4)	18 (7)	16 (5)	18 (5)	30 (11)
NO₂ (µg/m ³)	53 (18)	51 (17)	58 (17)	55 (17)	59 (16)	66 (20)
NO (µg/m ³)	33 (33)	33 (33)	29 (30)	24 (29)	30 (30)	43 (34)
CO (mg/m ³)	0.39 (0.18)	0.38 (0.17)	0.39 (0.17)	0.36 (0.17)	0.39 (0.18)	0.48 (0.19)
"Casa de Campo" – estación de medida de fondo urbano						
PM₁₀ (µg/m ³)	18 (12)	14 (7)	33 (18)	25 (7)	32 (10)	70 (32)
PM_{2.5} (µg/m ³)	9 (5)	8 (4)	14 (5)	11 (5)	14 (4)	25 (8)
NO₂ (µg/m ³)	23 (16)	22 (16)	25 (12)	23 (13)	26 (13)	31 (14)
NO (µg/m ³)	10 (17)	9 (16)	9 (15)	7 (13)	9 (16)	14 (20)
CO (mg/m ³)	0.24 (0.09)	0.23 (0.08)	0.23 (0.07)	0.23 (0.07)	0.24 (0.08)	0.26 (0.09)
"CIEMAT" – estación de medida de fondo urbano						
Número (#/cm ³)	8068 (4696)	7919 (4699)	8843 (4609)	8608 (4756)	8572 (4067)	11134 (6465)

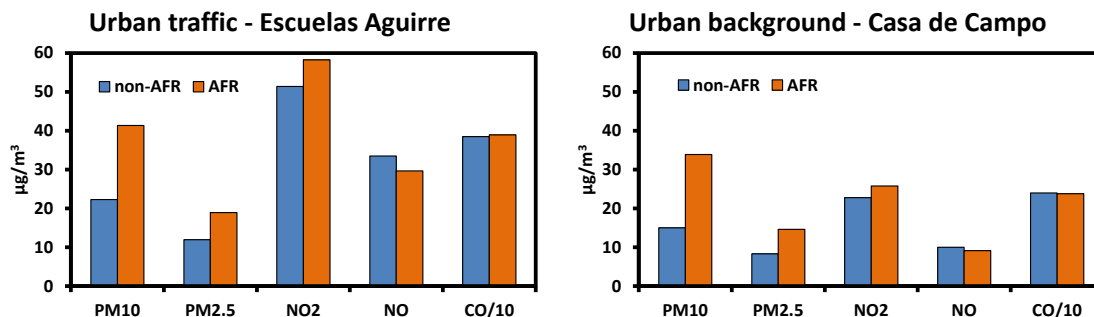


Figura 26. Valores medios de las series temporales de contaminantes atmosféricos registrados en las estaciones de medida de la calidad del aire “Escuelas Aguirre” y “Casa de Campo” en el periodo 2011-2015, diferenciando entre días episódicos de polvo africano (AFR) y el resto de los días (non-AFR).

Los niveles medios de concentración de NO₂ en “Escuelas Aguirre” y en “Casa de Campo” y del número de partículas en el emplazamiento de fondo urbano de CIEMAT también fueron significativamente más elevados, un 12-13%, en días africanos que en el resto de los días. Como se ha mencionado anteriormente, los eventos de transporte de polvo africano sobre la región central de la Península Ibérica se producen con mayor frecuencia en los meses de primavera y verano (Figura 3). Puesto que en este periodo también se producen con mayor intensidad las reacciones fotoquímicas que generan el NO₂ secundario y las UFP secundarias en procesos de nucleación, esta podría ser la causa de que durante días episódicos aumenten también los niveles de NO₂ y los de UFP además de los de partículas.

Por el contrario los niveles de CO no variaron apreciablemente entre días episódicos de polvo africano y no episódicos (0.24 mg/m³ en ambos casos en “Casa de Campo” y 0.38-0.39 mg/m³ en “Escuelas Aguirre”) mientras que los de NO fueron más reducidos en días episódicos (11% y 9%, respectivamente en “Escuelas Aguirre” y “Casa de Campo”). Si bien a partir de los tests estadísticos no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de NO y CO registrados en días episódicos y no episódicos (Figura 26).

Los gases NO y CO son trazadores habituales de las emisiones primarias generadas durante procesos de combustión de combustibles fósiles. En el área metropolitana de Madrid la principal fuente de ambos tipos de gases es el tráfico rodado y en menor medida las instalaciones de calefacción y agua caliente residencial (Salvador et al., 2015). Estacionalmente los máximos niveles medios de NO y CO en Madrid se registran habitualmente en los meses de invierno, en periodos caracterizados por la presencia de anticiclones sobre la Península Ibérica que permanecen estacionarios durante varios días seguidos y que dan lugar a los episodios de contaminación

antropogénica local en zonas urbanas (Artiñano et al., 2003). Puesto que en estos meses es cuando se han registrado un menor número de eventos de polvo africano, esta podría ser la causa de que no haya diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de NO y CO registrados en días episódicos y no episódicos.

Sin embargo, cuando se compararon las series de datos de los distintos contaminantes atmosféricos registrados durante eventos africanos de intensidad creciente, se apreció que los niveles medios de PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, NO, CO y de UFP en las estaciones urbanas de Madrid “Escuelas Aguirre”, “Casa de Campo” y “CIEMAT” aumentaron al incrementarse la intensidad del evento africano desde leve a moderado e intenso (Figura 27). El test no-paramétrico de Kruskal-Wallis determinó que en todos los casos había diferencias estadísticamente significativas entre las medianas para un nivel de confianza del 95%.

Por otro lado ha sido posible estimar los niveles de PM₁₀ atribuibles a las fuentes locales durante los días episódicos de evento africano, al sustraer los aportes de polvo africano de los registrados en las estaciones de medida ($PM_{10\text{-local}} = PM_{10} - PM_{10\text{-Dust contribution}}$). Tanto en “Escuelas Aguirre” como en “Casa de Campo” los aportes de fuentes locales a los niveles de PM₁₀ no variaron significativamente entre los eventos africanos leves y moderados pero aumentaron drásticamente en los intensos (Figura 28).

Este resultado parece indicar que los eventos africanos de cierta intensidad favorecerían el aumento de las contribuciones de origen local, lo cual estaría de acuerdo con el aumento en los niveles de NO, NO₂ y CO y con la reducción de la MLH detectado para ese tipo de eventos en Madrid. Es decir al igual que en el estudio llevado a cabo en Barcelona (Pandolfi et al., 2014) en Madrid también se produjo un efecto sinérgico asociado al desarrollo de episodios de transporte de polvo mineral africano, el cual generaría no sólo un aumento de los niveles de partículas en superficie por los aportes de polvo mineral sino que también por los aportes de fuentes locales debido a la reducción de la altura de la capa de mezcla. Por ello también aumentarían otro tipo de contaminantes atmosféricos, cuyo origen no estaría relacionado con el polvo africano, sino con fuentes antropogénicas locales.

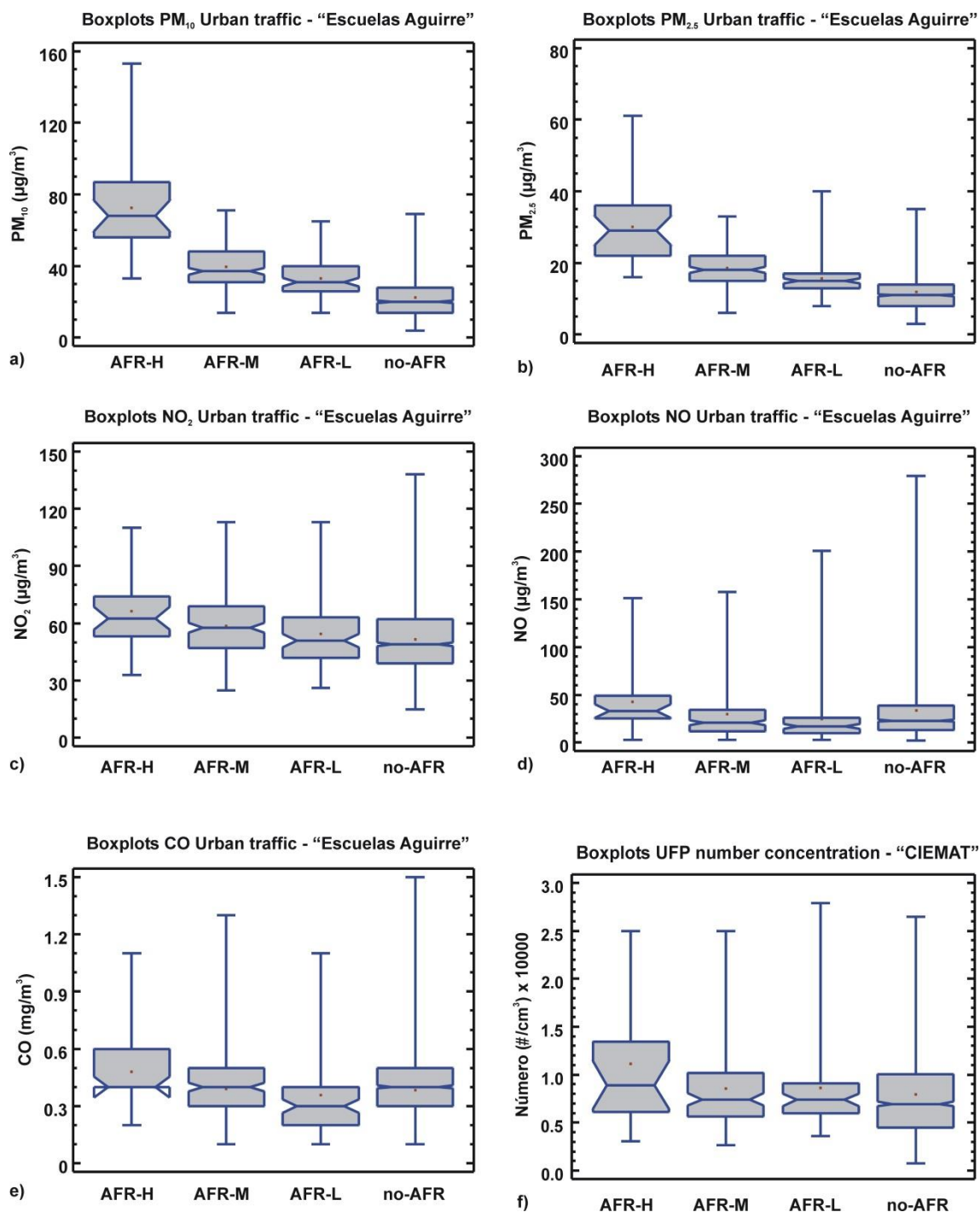


Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes (boxplots) de las series de datos de PM₁₀ (a), PM_{2.5} (b), NO₂ (c), NO (d), CO (e) en la estación urbana de tráfico de “Escuelas Aguirre” y de UFP (f) en la de fondo urbano de “CIEMAT” durante días episódicos de polvo africano de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y alta (AFR-H) y el resto de los días (no-AFR).

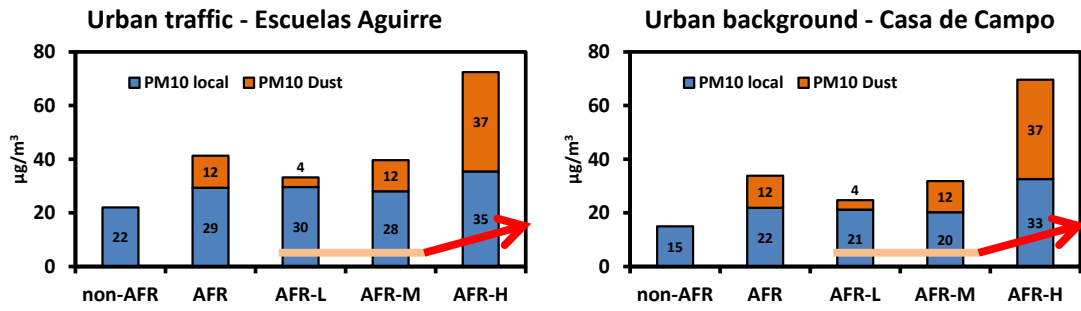


Figura 28. Contribuciones estimadas de fuentes locales y de polvo africano a los niveles de PM₁₀, en las estaciones de “Escuelas Aguirre” y de “Casa de Campo” durante días episódicos de polvo africano de intensidad baja (AFR-L), media (AFR-M) y alta (AFR-H) y el resto de los días (non-AFR).

6. Informe Técnico de Verificación IV. Efectos en salud en Madrid por la exposición a material particulado atmosférico durante eventos atmosféricos extremos.

6.1. Impacto sobre la mortalidad de los eventos de transporte de polvo africano de diferente intensidad en Madrid.

En la última parte del estudio se ha investigado la posible asociación entre la mortalidad diaria y los niveles medios diarios de contaminantes atmosféricos en Madrid y su posible relación con el desarrollo de eventos africanos de intensidad variable. Para ello se realizó un estudio epidemiológico usando un diseño de casos cruzados (case-crossover design) con el cual se comparan la exposición en días en los que se produjo mortalidad (casos) con la exposición en días sin decesos (días de control).

En primer lugar se obtuvieron los datos de mortalidad diaria en Madrid por todas las causas posibles excepto las naturales (International Classification of Disease - ICD9: 001-799, ICD10 A00-R99) a partir del Instituto Nacional de Estadística (INE) para el periodo 2011-2014. Los datos correspondientes al año 2015 finalmente no estuvieron disponibles en el momento de realizarse este estudio. En total en Madrid se produjeron 104148 decesos en el periodo 2011-2014, lo cual da un valor promedio diario de 71 decesos.

Los datos se analizaron usando modelos de regresión de Poisson para determinar incrementos de riesgo relativo de mortalidad (IRR) asociados a la exposición de contaminantes atmosféricos en días episódicos de polvo africano y días no episódicos, al igual que en el estudio de Pandolfi et al. (2014). Los IRR se estiman para un incremento de los niveles de contaminantes atmosféricos equivalente a un rango intercuartílico de las series de datos. Los efectos a corto plazo se estimaron hasta para 4 días posteriores a la exposición (lags).

Se identificaron asociaciones estadísticamente significativas entre la mortalidad diaria por todas las causas posibles, excepto las naturales, y la exposición a PM_{10} y $PM_{2.5}$ en días episódicos de polvo africano y no episódicos en Madrid (Figura 29). Sin embargo el incremento porcentual de riesgo relativo de mortalidad (%IRR) estimado por la exposición a PM_{10} fue más elevado durante días episódicos (2.2%) que en días no episódicos (1.6%). En el caso de la exposición a $PM_{2.5}$ se obtuvieron valores similares del %IRR en ambos casos (1.2-1.3%). Estos resultados son muy similares a los obtenidos en el estudio de Tobías et al. (2011) el cual también tuvo a Madrid como

zona de estudio pero en un periodo anterior (2003-2005) al considerado en este trabajo (2011-2014).

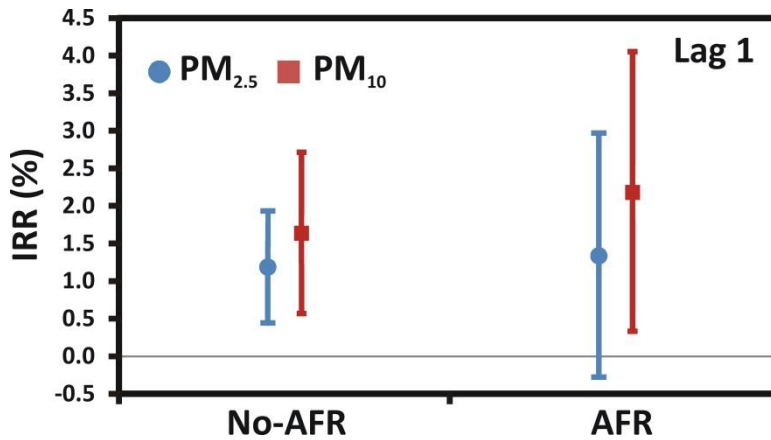


Figura 29. Incremento porcentual del riesgo relativo de mortalidad (%IRR) asociado a un incremento en la exposición a PM₁₀ y PM_{2.5} equivalente a un rango intercuartílico de las respectivas series de datos durante días episódicos de polvo africano (AFR) y no episódicos (non-AFR) en el periodo 2011-2014.

Además al considerar los días episódicos de polvo africano en función de la intensidad del evento, se han encontrado evidencias de que se produjo un mayor impacto sobre la mortalidad diaria por la exposición a PM₁₀ en Madrid, en el caso de los episodios más severos.

Con el objetivo de obtener resultados estadísticamente significativos con los modelos condicionales de regresión de Poisson para las series de datos disponibles, los días episódicos se han clasificado en sólo dos grupos de tamaño similar en función de la contribución de polvo asociada al día episódico. De esta manera a los días con contribución de polvo a los niveles de PM₁₀ menor y mayor o igual que el valor del percentil 50 de la serie de datos correspondiente al periodo 2011-2014 (8 µg/m³), se clasificaron como **moderados** e **intensos**, respectivamente. Los resultados finales se muestran en la Figura 30.

Los mayores efectos se obtuvieron para los lags 1 y 2, es decir un día y dos después de la exposición a los niveles de PM₁₀, en días de episodio africano de alta intensidad. En este caso el %IRR aumentó desde el 2.7% para el lag 1 hasta el 6.2% para el lag 2. En el caso de los días episódicos moderados la asociación con la mortalidad diaria para ambos lags fue menor que para días episódicos intensos y además los resultados no fueron estadísticamente significativos (p>0.10).

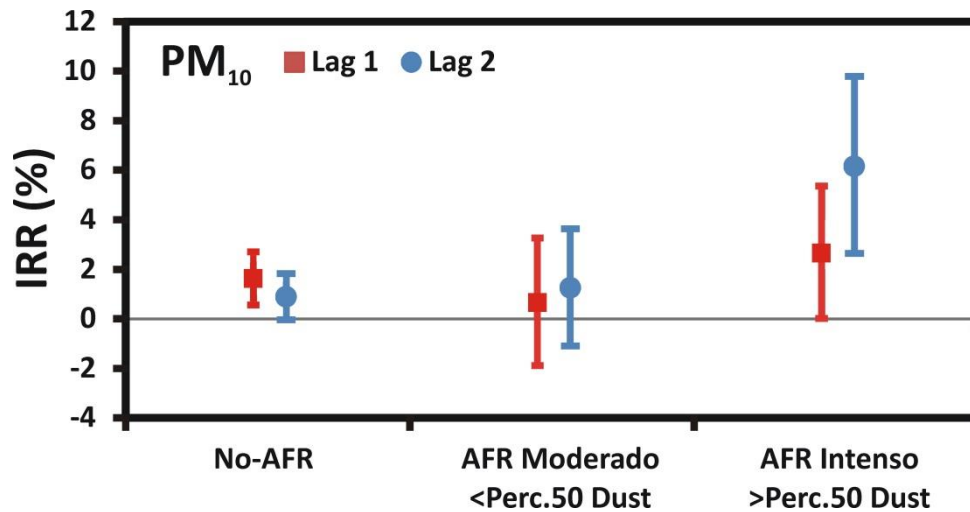


Figura 30. Incremento porcentual del riesgo relativo de mortalidad (%IRR) asociado a un incremento en la exposición a PM_{10} equivalente a un rango intercuartílico de las respectivas series de datos durante días episódicos de polvo africano moderados (Moderate AFR) e intensos (Intense AFR) y no episódicos (non-AFR) en el periodo 2011-2014.

En conclusión estos resultados sugieren que los efectos adversos sobre la mortalidad diaria en Madrid producidos durante días episódicos africanos, se produjeron cuando la contribución de polvo excedió un valor umbral por debajo del cual no se produjeron efectos significativos. Ello refleja una mayor toxicidad de la misma concentración de PM_{10} en días episódicos intensos que moderados. La altura de la capa de mezcla a mediodía fue un 15% más reducida en días episódicos intensos que moderados. Es decir, el aumento de la toxicidad estaría asociado con una reducción de la capa de mezcla sobre Madrid y con un aumento de las concentraciones de partículas (PM_{10} , $PM_{2.5}$ y UFP) y gases (NO_2 , NO y CO) de origen local. En este caso podría producirse algún tipo de efecto que justificara el aumento de la toxicidad de las partículas, como podría ser la condensación de precursores gaseosos sobre la superficie de las partículas de polvo que dieran lugar a la formación de nuevas partículas de diferente composición y/o tamaño. Estos procesos y reacciones pueden necesitar un cierto tiempo para que se produzcan totalmente, lo que podría ser la razón por la cual los efectos adversos sobre la salud fueron mayores dos días después de que se produjera el día episódico de polvo africano intenso.

6.2. Impacto sobre la mortalidad de los eventos de advección de polvo africano y de combustión de biomasa por incendios forestales en España.

A lo largo del desarrollo del proyecto SINERGIA surgió la oportunidad de ampliar los objetivos inicialmente propuestos, al incluir el análisis del impacto en la salud de otro tipo de evento atmosférico extremo, los incendios forestales, en combinación con el de los eventos de transporte de polvo africano. Ambos tipos de episodios son los eventos de origen natural que producen un mayor impacto sobre los niveles de concentración de PM_{10} en estaciones de fondo regional del sur de Europa. Además en numerosas ocasiones se han producido de forma simultánea en diversas zonas del territorio nacional (Figuras 11 y 12). Ello ha sido posible gracias a la colaboración desinteresada de la Dra. Cristina Linares y el Dr. Julio Díaz, científicos titulares de la Escuela Nacional de Sanidad del Instituto de Salud Carlos III. Los resultados obtenidos han sido publicados en Díaz et al. (2017) y Linares et al. (2018).

Para evaluar el impacto de la exposición a las partículas generadas durante eventos de transporte de polvo africano y de combustión de biomasa en la mortalidad diaria de la población de las distintas regiones de estudio, se realizó un análisis estadístico con modelos de regresión de Poisson, estratificando el análisis por la presencia o ausencia de días episódicos de ambos tipos. El MAPAMA también proporcionó una base de datos de valores medios diarios de contaminantes atmosféricos (PM_{10} , SO_2 , NO_2 y O_3) en estaciones de medida de calidad del aire localizadas en cada capital de provincia para el periodo 2004-2009. La mayor parte de dichas estaciones de medida eran de tipo urbano. Datos de temperatura máxima y mínima diaria en estas ciudades fueron proporcionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Datos de mortalidad diaria por causas naturales (debido a todas las causas excepto accidentes, International Classification of Diseases 10th Revision (ICD-10: A00-R99)) en ciudades de más de 10,000 habitantes agrupados por capitales de provincias y por localización geográfica en cada una de las 9 regiones de estudio, fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística (INE). La variable independiente en el modelo de regresión fue la concentración diaria de PM_{10} y como variables de control se utilizaron las concentraciones diarias de SO_2 , NO_2 y O_3 registradas en los mismos emplazamientos que los de PM_{10} , así como las temperaturas máximas diarias durante olas de calor. La variable dependiente fue la mortalidad diaria por causas naturales. El análisis se realizó en una única provincia representativa para cada región, seleccionada en función de la disponibilidad y calidad de las bases de datos de calidad del aire y mortalidad durante el periodo 2004-2009.

En primer lugar se caracterizaron los patrones meteorológicos sinópticos más característicos que dieron lugar a los días episódicos de polvo africano, de combustión de biomasa y de la ocurrencia simultánea de ambos tipos de eventos. Para ello se compusieron mapas sinópticos promedio de variables meteorológicas (presión y temperatura a nivel de superficie, altura geopotencial y temperatura en el nivel de 850 hPa) para cada grupo de días episódicos, usando las bases de datos meteorológicos de re-análisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) proporcionados por el NOAA/ESRL Physical Sciences Division. En algunos casos también se representaron mapas sinópticos de anomalías de las variables meteorológicas, para lo cual se eliminó la influencia climatológica calculada para el periodo 1981-2010.

Los escenarios meteorológicos obtenidos fueron muy similares para los 3 grupos de días episódicos. Se caracterizaron principalmente por la presencia de un centro de altas presiones en el nivel de 850 hPa sobre el norte de Argelia y Túnez (Figura 31), el cual propicia el transporte de masas de aire cálidas y secas de origen norte-africano hacia el sector occidental de la cuenca mediterránea. Por este motivo los eventos de transporte de polvo africano y de combustión de biomasa por incendios forestales han tenido lugar preferentemente durante el verano y asociados a elevadas temperaturas. Los mapas sinópticos de anomalías de temperatura (Figura 32) revelaron que aquellas zonas en las que se produjeron con mayor frecuencia eventos de combustión de biomasa, NW, CEN y SW (Figura 11), se caracterizaron por presentar los valores más elevados de dichas anomalías. Parece evidente por lo tanto que en el contexto de cambio climático en el que nos encontramos actualmente, las altas temperaturas asociadas a olas de calor, los incendios forestales y los episodios de transporte de polvo africano están íntimamente relacionados.

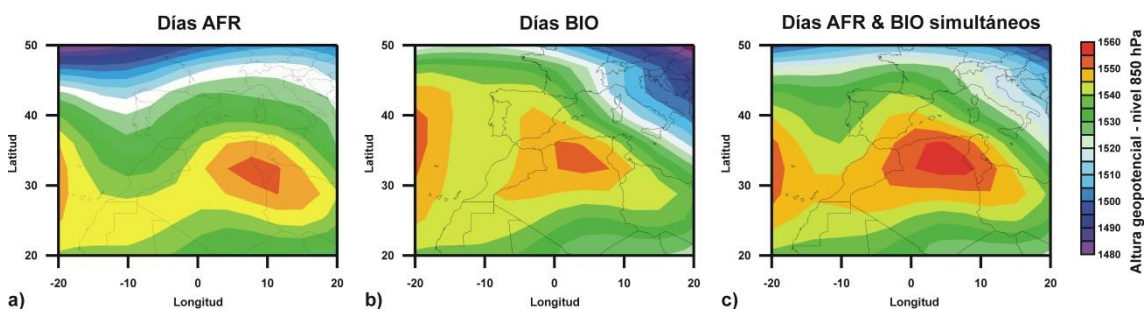


Figura 31. Mapas sinópticos promedio compuestos a partir de datos de altura geopotencial en el nivel de 850 hPa durante los días de evento de polvo africano – AFR (a), de combustión de biomasa – BIO (b) y ambos simultáneamente AFR&BIO (c) en 2004-2009.

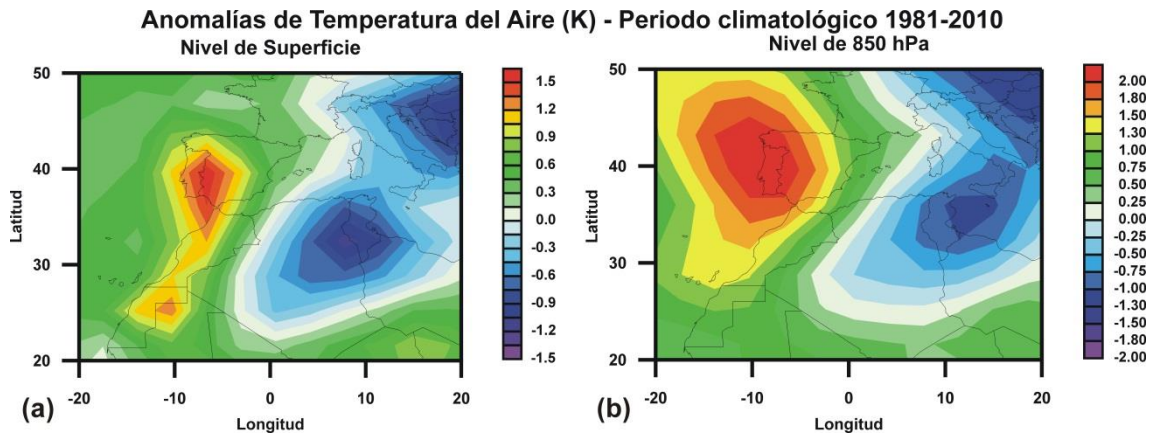


Figura 32. Mapas sinópticos promedio compuestos a partir de datos de anomalías de temperatura a nivel de superficie (a) y en el nivel de 850 hPa (b) durante los días de evento de combustión de biomasa en 2004-2009.

Además se evidenció claramente que en la mayor parte de las regiones analizadas, los niveles de fondo regional de PM_{10} se incrementaron a consecuencia de los aportes de polvo africano y/o de partículas originadas por la combustión de biomasa durante los días episódicos (Figura 33). Por ello los niveles medios de PM_{10} en los entornos urbanos de estas regiones también se incrementaron durante los eventos de polvo africano y/o de combustión de biomasa, presentando diferencias estadísticamente significativas con los niveles medios registrados durante el resto de los días (Figura 34).

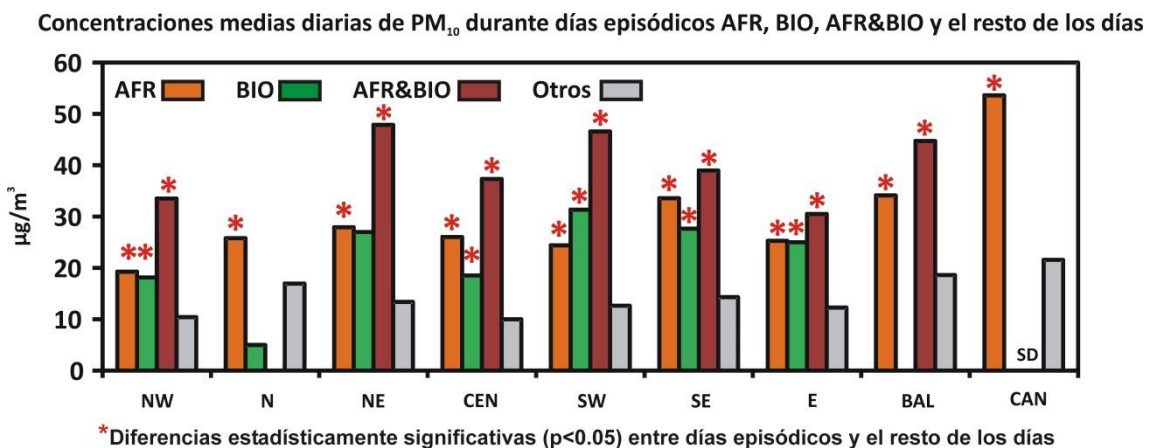


Figura 33. Niveles medios diarios de PM_{10} registrados en estaciones de medida de calidad del aire de fondo regional de cada región de estudio durante días episódicos de polvo africano (AFR), de combustión de biomasa (BIO), de ambos tipos (AFR&BIO) y el resto de los días (Otros).

Concentraciones medias diarias de PM₁₀ durante días episódicos AFR y BIO y el resto de los días

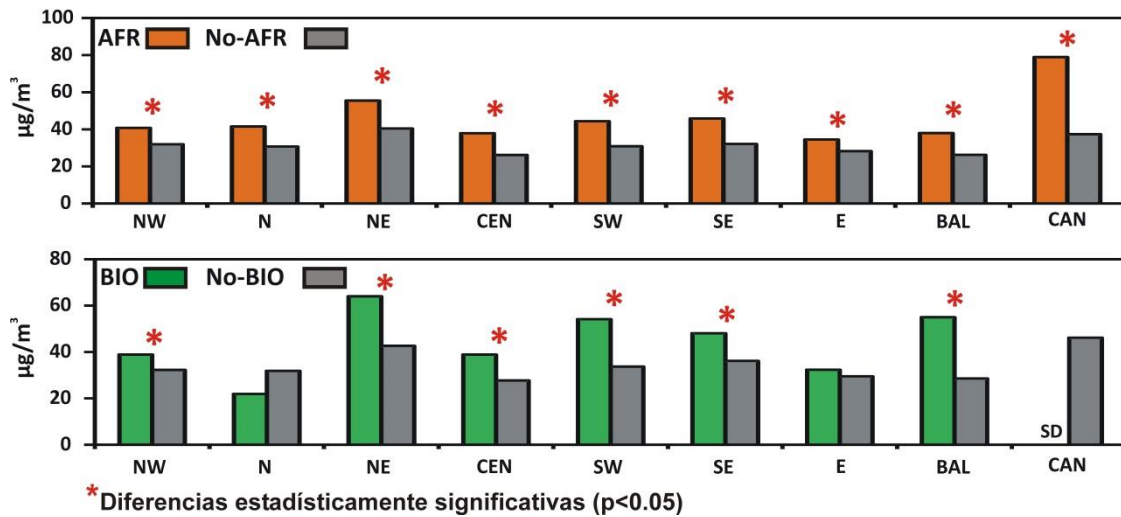


Figura 34. Niveles medios diarios de PM₁₀ registrados en estaciones de medida de calidad del aire urbanas de cada región de estudio durante días episódicos de polvo africano (AFR), de combustión de biomasa (BIO) y el resto de los días (No-AFR y No-BIO).

Los resultados del análisis estadístico epidemiológico, mostraron un aumento de la mortalidad diaria por la exposición a PM₁₀ durante días episódicos de polvo africano en comparación con los días sin aportes de polvo africano, en las regiones NW, CEN y SW (Tabla IIIa). En estas mismas regiones se obtuvieron incrementos del riesgo relativo de mortalidad estadísticamente significativos, por la exposición a PM₁₀ (Tabla IIIb). Son las regiones de estudio que tenían asociadas las mayores anomalías de temperatura para el periodo 2004-2009 (Figura 32).

En el caso de los días de combustión de biomasa, cuando se eliminaron aquellos días en los que simultáneamente se produjeron aportes de polvo africano, se obtuvieron de nuevo asociaciones estadísticamente significativas entre PM₁₀ y mortalidad diaria, si bien los valores de RR fueron menores (Tabla IIIb). En consecuencia, se puede extraer la conclusión de que los efectos adversos sobre la salud atribuibles al polvo mineral africano y a las partículas generadas en la combustión de biomasa durante incendios forestales, son independientes y aditivos.

Es decir que el polvo africano transportado hasta determinadas regiones de España, puede considerarse un factor de riesgo para la mortalidad diaria de la población de zonas urbanas de estas regiones. Además como factor de riesgo se incrementa cuando de manera simultánea se producen incendios forestales que producen aportes de partículas que incrementan los niveles de fondo regional en estas zonas.

Tabla III. Valores estadísticamente significativos de riesgo relativo (RR) de mortalidad por la exposición a PM₁₀, correspondientes a cada capital de provincial en las regiones de estudio en 2004-2009, obtenidos a partir de los modelos de regresión de Poisson. El RR se calculó para incrementos de 10 µg/m³ de PM₁₀, en días episódicos de polvo africano (AFR, **Tabla IIIa**), de combustión de biomasa (BIO, **Tabla IIIb**). IRR: incremento porcentual de riesgo relativo. IC 95%: intervalo de confianza del 95%.

Tabla IIIa	Días AFR		Días No-AFR	
	RR (IC 95%)	IRR(%) (IC 95%)	RR (IC 95%)	IRR(%) (IC 95%)
N/Bilbao	-	-	1.006 (1.000-1.012)	0.63 (0.004-1.22)
NE/Zaragoza	-	-	-	-
NW/Coruña	1.050 (1.024-1.077)	5.00 (2.36-7.71)	-	-
CEN/Madrid	1.007 (0.999-1.015)	0.67 (-0.12 to 1.46)	-	-
SE/Málaga	1.006 (1.000-1.012)	0.58 (0.00-1.18)	1.010 (1.002-1.018)	1.00 (0.21-1.79)
SW/Sevilla	1.009 (1.004-1.015)	0.94 (0.35-1.53)	1.007 (1.003-1.011)	0.70 (0.31-1.09)
E/Valencia	-	-	-	-
CAN/Las Palmas	-	-	-	-
BAL/Palma	-	-	-	-

Tabla IIIb	Días BIO		Días BIO sin aportes de polvo africano	
	RR (IC 95%)	IRR(%) (IC 95%)	RR (IC 95%)	IRR(%) (IC 95%)
Región/Capital				
N/Bilbao	-	-	-	-
NE/Zaragoza	-	-	-	-
NW/Coruña	1.079 (1.024-1.138)	7.93 (2.36-13.81)	-	-
CEN/Madrid	1.038 (1.014-1.062)	3.76 (1.36-6.22)	1.034 (0.999-1.070)	3.41 (-0.08-7.02)
SE/Málaga	-	-	-	-
SW/Sevilla	1.045 (1.030-1.059)	4.46 (2.99-5.94)	1.027 (1.000-1.054)	2.67 (0.02-5.39)
E/Valencia	-	-	-	-
CAN/Las Palmas	-	-	-	-
BAL/Palma	-	-	-	-

Por lo tanto los aportes de partículas de polvo africano y/o de combustión de biomasa aumentan los efectos adversos sobre la salud atribuible a la contaminación atmosférica a los que de por sí ya está expuesta la población de zonas urbanas, con origen en numerosas fuentes antropogénicas locales (tráfico, industria, instalaciones de calefacción y agua caliente residencial).

Puesto que las tormentas de polvo en zonas áridas del norte de África y los incendios forestales son fenómenos meteorológicos que previsiblemente van a tender a aumentar en los próximos años por efecto del cambio climático, resulta fundamental establecer estrategias de mitigación y adaptación cuando tengan lugar.

7. Conclusiones y valoración del proyecto.

Durante el desarrollo de este proyecto se han intentado caracterizar los mecanismos por los cuales se producen efectos adversos sobre la salud de la población del área metropolitana de Madrid debido a la exposición a contaminantes atmosféricos durante el desarrollo de eventos de transporte de polvo mineral africano, cuya frecuencia e intensidad se prevé que aumente por efecto del **cambio climático**. Para ello se plantearon 3 objetivos específicos, los cuales pueden considerarse como sobradamente cumplidos. La valoración de cada uno de ellos, una vez finalizado el proyecto se muestra a continuación.

Objetivos específicos:

1. **Identificar el impacto de los eventos de transporte de polvo africano de diferente intensidad en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos a los que está expuesta la población de Madrid.** Puesto que durante este tipo de episodios efectivamente se ha podido registrar un aumento en los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$, este hecho es un indicador de que se produce un aporte de fuentes externas, el polvo mineral africano, a las emisiones procedentes de fuentes locales. Dado que también se ha podido registrar un aumento de las concentraciones de número de UFP y de ciertos contaminantes gaseosos como NO_2 , NO y CO , asociados a las emisiones de fuentes antropogénicas locales de entornos urbanos, se demuestra que el desarrollo de este tipo de evento atmosférico extremo favorece la acumulación de los contaminantes atmosféricos en superficie, a través de un mecanismo atmosférico que también se ha podido determinar. Dicho mecanismo ha estado relacionado con una reducción de la altura de la capa de mezcla sobre Madrid, producida por la presencia en la atmósfera de polvo mineral africano. A mayor concentración de polvo mineral, menor ha sido el desarrollo de la capa de mezcla, lo cual ha favorecido el aumento de la concentración de las emisiones de contaminantes atmosféricos, gases y partículas, procedentes de fuentes locales.
2. **Identificar sinergias entre los eventos de transporte de polvo africano de diferente intensidad y los niveles de mortalidad por distintas causas en Madrid.** A partir del análisis estadístico realizado se ha podido obtener un mayor valor del incremento del riesgo relativo de mortalidad por la exposición a PM_{10} , durante eventos de transporte de polvo africano que durante el resto de

los días. Además se ha obtenido un aumento del incremento del riesgo relativo de mortalidad en función de la intensidad de los eventos de transporte de polvo africano. Este resultado implica que durante el desarrollo de estos eventos atmosféricos extremos aumenta la toxicidad de los contaminantes atmosféricos a los que está expuesta la población. Además se ha podido demostrar que en Madrid también aumenta el riesgo relativo de mortalidad por la exposición a PM₁₀ en los días en que se produjeron incendios forestales en la zona centro peninsular. Cuando los incendios forestales se produjeron de manera simultánea a los episodios de transporte de polvo africano, el incremento del riesgo relativo de mortalidad fue aún más elevado. Este resultado demuestra que los efectos adversos sobre la salud producidos por el desarrollo de ambos tipos de eventos atmosféricos extremos son acumulativos y que se suman a los producidos por la exposición a los contaminantes atmosféricos de fuentes locales a los que está expuesta la población en Madrid de manera habitual. En consecuencia parece evidente que se ha obtenido un indicador robusto de que por efecto del cambio climático pueden aumentar los efectos adversos sobre la salud en zonas urbanas del sur de Europa tal y como se ha demostrado para el caso de Madrid.

3. Desarrollar actividades de difusión y divulgación de los resultados obtenidos que permitan proponer medidas destinadas a proteger la salud, durante el desarrollo de los episodios de transporte de polvo africano.

Desde el comienzo del proyecto se han realizado actividades de difusión y divulgación de los objetivos y del desarrollo del mismo a través de la creación de una página web específica (<http://projects.ciemat.es/web/sinergia/>). De manera simultánea se han elaborado noticias breves publicadas en la página web del CIEMAT y en la revista *VÉRTICES* que publica este organismo, se han realizado entrevistas en prensa (*El Mundo*) y televisión (*Telemadrid*) y artículos publicados en revistas científicas, como *Science of the Total Environment* y *FuturENVIRO*. Además tal y como estaba previsto en las actividades a realizar durante el desarrollo del proyecto, se ha asistido a 3 congresos internacionales (“European Geosciences Union - General Assembly 2018”, “9th International Workshop on Sand/Duststorms and Associated Dustfall” y “RICTA 2018 - 6th Iberian Meeting on Aerosol Science and Technology”) en los que se presentaron 8 trabajos (ponencias orales y/o posters) relacionados con el proyecto y a 2 reuniones del grupo de trabajo europeo CEN/TC 264/WG 44 sobre la normalización de las técnicas de identificación y contribución de

fuentes de partículas (“source apportionment”). Este tipo de técnicas son fundamentales a la hora de estimar las contribuciones específicas de polvo mineral desértico o las atribuidas a los incendios forestales a los niveles a los que está expuesta la población de Madrid. Esto es lo que permitirá evaluar el impacto en la salud de la población de este tipo de aportes atribuidos a eventos extremos asociados al cambio climático. Por último y tal y como estaba previsto para la última fase del proyecto, se organizó una Jornada Informativa en el CIEMAT de un día de duración sobre “El impacto en la salud de los eventos atmosféricos extremos producidos por el cambio climático”. A la jornada acudieron ponentes invitados procedentes de centros de investigación y de instituciones de reconocido prestigio, como el CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), el ISCIII (Instituto de Salud Carlos III), la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad de Aveiro (Portugal), el Ayuntamiento de Madrid y la Oficina Española de Cambio Climático, así como un centenar de asistentes. Durante el desarrollo de la misma se presentaron los principales resultados y conclusiones del proyecto y se llevó a cabo un debate sobre posibles acciones de mitigación de los efectos adversos producidos por estos eventos y de adaptación de la población de zonas urbanas como Madrid.

Como resumen final del desarrollo del proyecto SINERGIA se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Existen interacciones o sinergias entre los contaminantes atmosféricos a los que está expuesta la población en zonas urbanas y la ocurrencia de eventos atmosféricos extremos, que aún no están bien caracterizadas.
- Se prevé que la frecuencia, intensidad y duración de ciertos eventos atmosféricos extremos, cuya ocurrencia puede generar un aumento brusco en las concentraciones de numerosos contaminantes atmosféricos en zonas urbanas, aumente en los próximos años por efecto del cambio climático. Ejemplo de ello son los eventos de transporte de polvo mineral desde zonas áridas y desérticas del norte de África y los eventos de combustión de biomasa producidos por efecto de los incendios forestales.
- Las intrusiones de polvo mineral africano se han asociado con una reducción de la capa de mezcla sobre Madrid y con un aumento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos (gases y partículas) con origen en las fuentes

antropogénicas locales. Por este motivo y pese a tratarse de fenómenos atmosféricos de origen “natural”, cuando se prevea que se vaya a producir un evento de este tipo se deberían tomar medidas para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricas de dichas fuentes locales.

- Los incendios forestales con frecuencia se producen de modo simultáneo a las intrusiones de polvo africano y en condiciones de altas temperaturas y sus efectos sobre la salud se suman a los que ya se producen en zonas urbanas como Madrid debido a la exposición por parte de la población a los contaminantes atmosféricos generados por las fuentes antropogénicas locales.
- Existen estrategias de adaptación y protocolos de actuación establecidos para olas de calor, destinados a mitigar los efectos adversos sobre la población, que también pueden ser válidos para hacer frente a los efectos de otro tipo de eventos como los episodios de transporte de polvo africano o de combustión de biomasa.
- Es preciso evaluar el impacto positivo sobre la salud de las personas que podría tener el llevar a cabo este tipo de protocolos en el futuro durante el desarrollo de este tipo de eventos, teniendo en cuenta además que se debe de prestar una atención especial como grupo de riesgo no sólo a las personas mayores sino también a los niños en edad escolar, a las personas que están en proceso de gestación y a las que tienen a su cargo a niños de corta edad.

Referencias.

- Ahrens C.D., 1999. "Meteorology today: an introduction to weather, climate and the environment". 6th ed. ISBN: 0-534-37201-5.
- Artiñano B., Salvador P., Alonso D.G., Querol X. and Alastuey A., 2003. Anthropogenic and natural influence on the PM₁₀ and PM_{2.5} aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. *Environmental Pollution*, 125, 453-465.
- Commission Staff Working Paper, 2011. Establishing Guidelines for Demonstration and Subtraction of Exceedances Attributable to Natural Sources Under the Directive 2008/50/EC on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe, Brussels, 15.02.2011. SEC(2011) 208 Final. :p. 37.
http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/sec_2011_0208.pdf (enlace activo a fecha 11 de septiembre de 2018).
- De Sario M., Katsouyanni K. y Michelozzi P., 2013. Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. *European Respiratory Journal*, 42(3):826-43. doi: 10.1183/09031936.00074712.
- Díaz J., Linares C., Carmona R., Russo A., Ortiz C., Salvador P. y Machado Trigo R., 2017. Saharan dust intrusions in Spain: Health impacts and associated synoptic conditions. *Environmental Research*, 156, 455-467.
- Escudero M., Querol X., Ávila A., Cuevas E., 2007a. Origin of the exceedances of the European daily PM limit value in regional background areas of Spain. *Atmospheric Environment*, 41, 730-744.
- Escudero M., Querol X., Pey J., Alastuey A., Pérez N., Ferreira F., Cuevas E., Rodríguez S., Alonso S., 2007b. A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 41, 5516-5524.
- Fernández A.J., Molero F., Salvador P., Revuelta A., Becerril-Valle M., Gómez-Moreno F. J., Artiñano B., Pujadas M., (2017). Aerosol optical, microphysical and radiative forcing properties during variable intensity African dust events in the Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 196, 129-141.
- Gómez-Moreno F.J., Pujadas M., Plaza J., Rodríguez-Maroto J.J., Martínez-Lozano P., Artiñano B., 2011. Influence of seasonal factor on the atmospheric particle number concentration and size distribution in Madrid. *Atmospheric Environment*, 45, 3169-3180.
- Holzworth CG., 1964. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Monthly Weather Review*, 92, 235–242.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [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, 1535 pp.
- IPCC, 2014: Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-470.
- Klett J.D., 1981. Stable analytical inversion solution for processing Lidar returns. *Applied Optics*, 20 (2), 211–220.
- Linares C., Carmona R., Salvador P., Díaz J., 2018. Impact on mortality of biomass combustion from wildfires in Spain: A regional analysis. *Science of the Total Environment*, 622-623, 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.321>.

- Mona L., Amodeo A., Pandolfi M., Pappalardo G., 2006. Saharan dust intrusions in the Mediterranean area: Three years of Raman lidar measurements. ***Journal of Geophysical Research***, VOL. 111, D16203, doi:10.1029/2005JD006569.
- Moreno T., Pérez N., Querol X., Amato F., Alastuey A., Bhatia R., Spiro B., Hanvey M., Gibbons W., 2010. Physicochemical variations in atmospheric aerosols recorded at sea onboard the Atlantic-Mediterranean 2008 Scholar Ship cruise (Part II): natural versus anthropogenic influences revealed by PM10 trace element geochemistry. ***Atmospheric Environment***, 44, 2563-2576.
- Pandolfi M., Tobias A., Alastuey A., Sunyer J., Schwartz J., Lorente J., Pey J., Querol X., 2014. Effect of atmospheric mixing layer depth variations on urban air quality and daily mortality during Saharan dust outbreaks. ***Science of the Total Environment***, 494, 283-289.
- Pappalardo G., Amodeo A., Apituley A., Comerón A., Freudenthaler V., Linné H., Ansmann A., Bösenberg J., D'Amico G., Mattis I., Mona L., Wandinger U., Amiridis V., Alados-Arboledas L., Nicolae D., Wiegner M., 2014. EARLINET: towards an advanced sustainable European aerosol lidar network. ***Atmospheric Measurement Techniques***, 7, 2389–2409.
- Pérez L., Tobías A., Pey J., Pérez N., Alastuey A., Sunyer J. y Querol X., 2012. Effects of local and Saharan particles on cardiovascular disease mortality. ***Epidemiology***, 23, 768-769.
- Pey J., Querol X., Alastuey A., Forastiere F., Stafoggia M., 2013. African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, 13, 1395–1410.
- Querol X., Alastuey A., Moreno T., Viana M.M., Castillo S., Pey J., Rodriguez S., Artiñano B., Salvador P., Garcia do Santos S., Herce Garraleta M.D., Fernandez Patier R., Moreno S., Minguillón M.C., Monfort E., Palomo R., Pinilla E.R., Cuevas E., 2008. Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM10 and PM2.5) across Spain 1999-2005. ***Atmospheric Environment***, 42, 3964-3979.
- Rodríguez S., Alastuey A., Alonso-Pérez S., Querol X., Cuevas E., Abreu-Afonso J., Viana M., Pérez N., Pandolfi M., de la Rosa J., 2011. Transport of desert dust mixed with North African industrial pollutants in the subtropical Saharan air layer. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, 11, 6663-6685.
- Salvador P., Artiñano B., Molero F., Viana M., Pey J., Alastuey A., Querol X., 2013. African dust contribution to ambient aerosol levels across central Spain: Characterization of long-range transport episodes of desert dust. ***Atmospheric Research***, 127, 117-129.
- Salvador P., Artiñano B., Viana M.M., Alastuey A., Querol X., 2015. Multicriteria approach to interpret the variability of the levels of particulate matter and gaseous pollutants in the Madrid metropolitan area, during the 1999-2012 period. ***Atmospheric Environment***, 109, 205-216.
- Salvador P., Almeida S.M., Cardoso J., Almeida-Silva M., Nunes T., Cerqueira M., Alves C., Reis M.A., Chaves P.C., Artiñano B. y Pio C., 2016. Composition and origin of PM10 in Cape Verde: Characterization of long-range transport episodes. ***Atmospheric Environment***, 127, 326-339.
- US EPA, 2008. Particulate Matter (PM) basics (online). <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>. Enlace activo a fecha 11 de septiembre de 2018.