Nº 73, enero-junio de 2020, pp. 189-209.
ISSN: 0213-4691. eISSN: 1989-9890.
DOI: 10.14198/INGEO2020.MJCTMA

Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante

Cita bibliográfica: Moreno Jiménez, A., Cañada Torrecilla, R., & Méndez Arranz, D. (2020). La concentración de partículas en el aire: análisis estadístico de la relación espacial entre medidas de superficie y del sensor MODIS para dos tipos de tiempo en la Comunidad de Madrid. *Investigaciones Geográficas,* (73), 189-209. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.MJCTMA

La concentración de partículas en el aire: análisis estadístico de la relación espacial entre medidas de superficie y del sensor MODIS para dos tipos de tiempo en la Comunidad de Madrid

Particulate matter concentration in the air: statistical analysis of spatial relations between surface and MODIS data for two weather types in the Madrid region

Antonio Moreno Jiménez[1*]
Rosa Cañada Torrecilla[2]
David Méndez Arranz[3]

Resumen

Los sensores remotos están monitoreando la contaminación de la atmósfera planetaria y generando una abundante información sobre los aerosoles / partículas, entre otros componentes, como sucede con el sensor MODIS y su indicador *Aerosol Optical Depth* (AOD). Su cotejo con las clásicas medidas en estaciones de superficie suscita problemas de discordancias entre ambos tipos de datos. Asumiendo que debería existir una relación positiva entre ellas, en este trabajo se acomete un análisis sistemático de datos para dos tipos de tiempo, especialmente proclives a altas concentraciones de partículas en el aire en la región de Madrid, para evaluar la intensidad de la correlación entre AOD y PM_{10} superficial y explorar sus posibles variaciones en función de ciertas variables atmosféricas (temperatura, viento y humedad relativa), de los tipos de tiempo y del contexto geográfico de cada estación de medida. En consonancia con los hallazgos de otros autores, los resultados de este trabajo corroboran, en general, la existencia de tal relación positiva, aunque afloran inconsistencias y frecuentes casos en los que la relación estadística se reduce y llega a desvanecerse por razones presumiblemente diversas, entre otras la notable falta de datos.

Palabras clave: contaminación del aire; teledetección; MODIS; espesor óptico de aerosoles (AOD); material particulado (PM_{10}); Madrid.

Abstract

Remote sensors are monitoring planetary atmospheric pollution and producing considerable information on aerosols – similarly to the MODIS sensor and its Aerosol Optical Depth (AOD) indicator. Comparison with common ground measures shows discordances between both data sources. Assuming a hypothetical positive relation between them, this work makes a systematic analysis of data representing two weather types prone to high particulate matter concentration in the Madrid region, explores the strength of AOD-PM_{10} correlation, and the influence of meteorological variables (temperature, wind,

1 Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid, España. antonio.moreno@uam.es. *Autor para correspondencia.
2 Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid, España. rosa.canada@uam.es
3 Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid, España. david.mendeza@uam.es

Recepción: 07/11/2019. **Aceptación:** 09/04/2020. **Publicación:** 23/06/2020 (***in press***: 10/06/2020).

Este trabajo se publica bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.

and relative humidity), weather types, and the geographical context. In line with other authors' findings, the results of this investigation generally support the positive relation, although inconsistencies appear, and in many cases the statistical relation frequently decreases, and may become null because of various potential reasons – including abundant missing data.

Keywords: air pollution; remote sensing; MODIS; aerosol optical depth (AOD); particulate matter (PM_{10}); Madrid.

1. Introducción

Los avances en la teledetección y la preocupación ambiental han concitado la atención sobre la información remota de la contaminación atmosférica, como alternativa y complemento a las tecnologías que, mediante sensores superficiales, miden de manera estática o móvil la calidad del aire. Estas resultan costosas de desplegar si se quiere cubrir de manera exhaustiva, o al menos representativa, el territorio a las diferentes escalas y con el detalle que dicha información es necesaria. En esa línea, los organismos dedicados a la observación espacial están desarrollando satélites y sensores para medir la concentración de partículas en el aire (PM_x) o aerosoles (mezclas de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, de fuentes naturales y antrópicas). Es sabido que dicha polución posee una trascendencia notable sobre la salud y el bienestar humano, y en particular sobre las personas con patologías cardiovasculares y respiratorias, como diversos estudios están poniendo de manifiesto (e.g. Jerrett *et al*., 2005; Kloog, Koutrakis, Coull, Lee y Schwartz, 2011; World Health Organization, 2013; Prieto-Flores, Moreno, Gómez-Barroso, Cañada y Martínez, 2017; Royé, Zarrabeitia, Riancho y Santurtún, 2019).

Actualmente, en teledetección satelital existen dos maneras de estimar la presencia de aerosoles: mediante sensores activos y pasivos. Entre los primeros se encuentra el LIDAR (*LIght Detection And Ranging)*, basado en la emisión de radiación láser pulsada y medición de la radiación retrodispersada por las partículas. En contraste, los sensores pasivos miden la radiación solar reflejada por la Tierra. Una de las principales diferencias entre sus productos radica en el componente espacial, debido a que la tecnología láser recoge datos sobre un punto en el espacio del planeta y los sensores pasivos captan radiación referenciada sobre una superficie más o menos grande (píxel).

La NASA lanzó una serie de satélites conocidos como *Earth Observation System* (EOS), entre los cuales se encuentran Terra y Aqua, que vuelan desde 2000 y 2002 respectivamente. A bordo de ellos se halla el sensor pasivo MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*), del que se obtiene, como parámetro de interés aquí, el *espesor óptico de aerosoles* en la atmósfera (Harbula y Kopačková, 2011), conocido en inglés como AOD (*Aerosol Optical Depth*) o AOT (*Aerosol Optical Thickness*), resultado de aplicar ciertos algoritmos de cálculo (Levy *et al*., 2013). AOD es una medición adimensional de la dispersión y absorción de la radiación solar ocasionada por el conjunto de aerosoles de la columna vertical entre la superficie terrestre y el techo atmosférico (Tsai, Jeng, Chu, Chen y Chang, 2011) que se distribuye comercialmente a resoluciones de 3 y 10 km.

Por su parte, las habituales medidas de PM_x en las estaciones estáticas terrestres conciernen a un microentorno distinto (el emplazamiento del sensor), por lo que físicamente no equivalen a las medidas de AOD. A raíz de ello en la tradición de estudio se ha planteado el reto de comprobar la relación entre ambas medidas, e incluso estimar las partículas en tierra (el hábitat humano) a partir de los datos de AOD.

Este trabajo avista solo al primero de los retos mencionados, asumiendo como hipótesis general una presumible relación positiva entre medidas de AOD por los sensores satelitales y de las partículas registradas en tierra. Se expone a continuación el estado de esa cuestión.

1.1. Antecedentes

Con el fin de explorar el potencial para calcular AOD mediante el uso de satélites, el cual empezó a considerarse en la década de los 70, Kaufman y Fraser (1983) midieron el AOD desde la superficie con un transmisómetro en 8 bandas espectrales entre 440 y 870 nm. Entre los resultados se detectaron algunos de los principales problemas, como la imposibilidad de diferenciar la repercusión de las partículas y la humedad relativa en la medición. Posteriores investigaciones consolidaron la posibilidad de realizar mediciones satelitales de AOD y diagnosticaron los principales retos a la hora de efectuar correcciones atmosféricas, siendo éstos recopilados por Kaufman *et al*. (1997). Destacan la necesidad de rellenar la

falta de datos de aerosoles en los productos finales mediante interpolaciones, la carencia de conocimientos específicos acerca de las características radiativas de los aerosoles y los distintos tipos de superficies (tierra, océano, etc.), la inclusión de modelos explicativos de la distribución vertical de los aerosoles en la atmósfera, el desconocimiento del efecto de composiciones mixtas de partículas y la presencia de nubes, entre muchos otros.

Entre los primeros estudios que correlacionan AOD del sensor MODIS con los aerosoles presentes en la superficie terrestre existen dos de especial mención: Wang y Christopher (2003) obtuvieron correlaciones de 0,7 al comparar AOD con mediciones horarias de $PM_{2,5}$ de siete estaciones en el Condado de Jefferson (Alabama, EEUU), mientras que Chu *et al.* (2003) hallaron correlaciones de hasta 0,82 en el norte de Italia utilizando PM_{10} diario superficial como parámetro. Aun siendo notables las diferencias metodológicas entre ambos estudios debido a los parámetros y escalas utilizados, y que las condiciones de la localización en el último caso eran ideales —las masas de aire eran estables y las fuentes de contaminación fijas—, ambos trabajos mostraron el gran potencial de aplicación de sensores remotos para la monitorización de la contaminación atmosférica.

Desde entonces, gran cantidad de estudios han intentado esclarecer la relación empírica entre AOD satelital y PM superficial, tratando no sólo de identificar los factores que la alteran sino de aplicar modelos de estimación de la concentración de aerosoles en superficie. El uso de datos meteorológicos para mejorar la medida de dicha relación ha sido probado con eficacia por Gupta y Christopher (2009) al incluir en su método multivariante la temperatura, la altura de la capa límite atmosférica, la humedad relativa y la velocidad del viento. Los cimientos teóricos se resumen de la siguiente manera: primero, una mayor temperatura puede indicar una creciente actividad fotoquímica generadora de material particulado y sus precursores. Segundo, la altura de la capa límite atmosférica (aquella cuya mezcla es predominantemente homogénea, debido a la turbulencia ocasionada por la influencia directa de la superficie irregular y determinadas situaciones climatológicas) indicará la distribución de los aerosoles en la columna de aire y, por tanto, la mayor o menor concentración en superficie. Tercero, la humedad ocasiona el crecimiento higroscópico de los aerosoles y la consecuente modificación de su coeficiente de extinción. Por último, la velocidad del viento incide en el grado de transporte de contaminantes. Adicionalmente se considera la estacionalidad de las correlaciones, ya que determinadas situaciones de estabilidad atmosférica pueden facilitar el estancamiento de contaminantes.

Aunque la enorme cuantía de factores capaces de perturbar la relación entre AOD y PM sugiera el empleo de laboriosos modelos que incluyan todos ellos para una estimación lo más completa posible —modelos de transporte químico (Liu, Koutrakis y Kahn, 2007) o regresiones con usos del suelo (Shi, Ho, Xu, y Ng, 2018), entre otros—, existe el riesgo de incurrir en dudosas correlaciones positivas debido a la alta dimensionalidad de datos y factores. Así, por ejemplo, Gupta y Christopher (2009) alcanzaron correlaciones de 0,58 al confrontar $PM_{2,5}$ únicamente con las variables meteorológicas, mientras que obtuvieron correlaciones de 0,60 usando solo AOD. Además de las variables meteorológicas, Ma, Hu, Huang, Bi y Liu (2014) incluyeron el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la población como variables en su modelo, obteniendo correlaciones en torno a 0,78 sin considerar el AOD y 0,72 considerando únicamente AOD. En el estudio de Shi *et al.* (2018) se puede apreciar la notable diferencia entre los coeficientes de las variables implicadas según la estación del año considerada, revelando la naturaleza cambiante de su relación con $PM_{2,5}$; pese a la evidente mejora de la capacidad predictiva del modelo confeccionado, el cálculo de coeficientes en diferentes períodos de tiempo genera nuevas cuestiones sobre el impacto de las condiciones circunstanciales en la relación AOD-PM.

1.2. Objetivos

En ese frente de indagación y en línea con el trabajo de Moreno, Cañada y Méndez (2018), el presente estudio profundiza en el examen de la relación espacial entre AOD satelital y PM superficial, teniendo muy en cuenta que ambas tecnologías de medición, terrestre y remota, difieren sustantivamente en ámbito y procedimiento, y que sobre cada lugar intervienen muchas y distintas variables contextuales. Resulta, pues, pertinente dedicar esfuerzos para conocer los rasgos y eventuales condicionantes de las coincidencias y divergencias entre ambos tipos de medidas, para lo que se recurre aquí a planteamientos metodológicos parcialmente distintos a los previamente propuestos.

En ese sentido, se confrontarán ambas medidas y se escrutará su compleja relación, bajo las siguientes premisas analíticas:

- Atender situaciones atmosféricas de alta concentración de partículas, prioritarias por su impacto en la calidad de vida de los seres vivos.
- Considerar el posible papel de ciertas variables meteorológicas (temperatura, viento y humedad relativa), cuya pertinencia ha sido señalada en la bibliografía.
- Tener en cuenta la dimensión temporal y su posible incidencia en la variabilidad de la relación, emprendiendo análisis por tipos de tiempo bien definidos, en estaciones del año contrastadas (verano e invierno) y con desagregación incluso por días.

A través de ello, y basándonos en el caso de la Comunidad de Madrid, se espera arrojar algo de luz sobre ciertos factores presumiblemente intervinientes en la mencionada relación, poner de relieve las dificultades en el análisis y en la interpretación de los resultados, y abrir vías para indagaciones ulteriores que posibiliten un conocimiento más amplio de la polución del aire apoyado en la teledetección.

El estudio, referido a la Comunidad de Madrid, se basará en una muestra de datos correspondiente a una serie de días, bien definidos en base a sus características meteorológicas y pertenecientes a dos tipos de tiempo muy concretos. En el apartado siguiente se detallan las principales decisiones metodológicas.

2. Metodología

2.1. Ámbito de estudio y datos

El territorio analizado abarca la Comunidad de Madrid, siendo de especial interés la ciudad de Madrid por su mayor influencia sobre el contenido de material particulado en la atmósfera y la concentración de población.

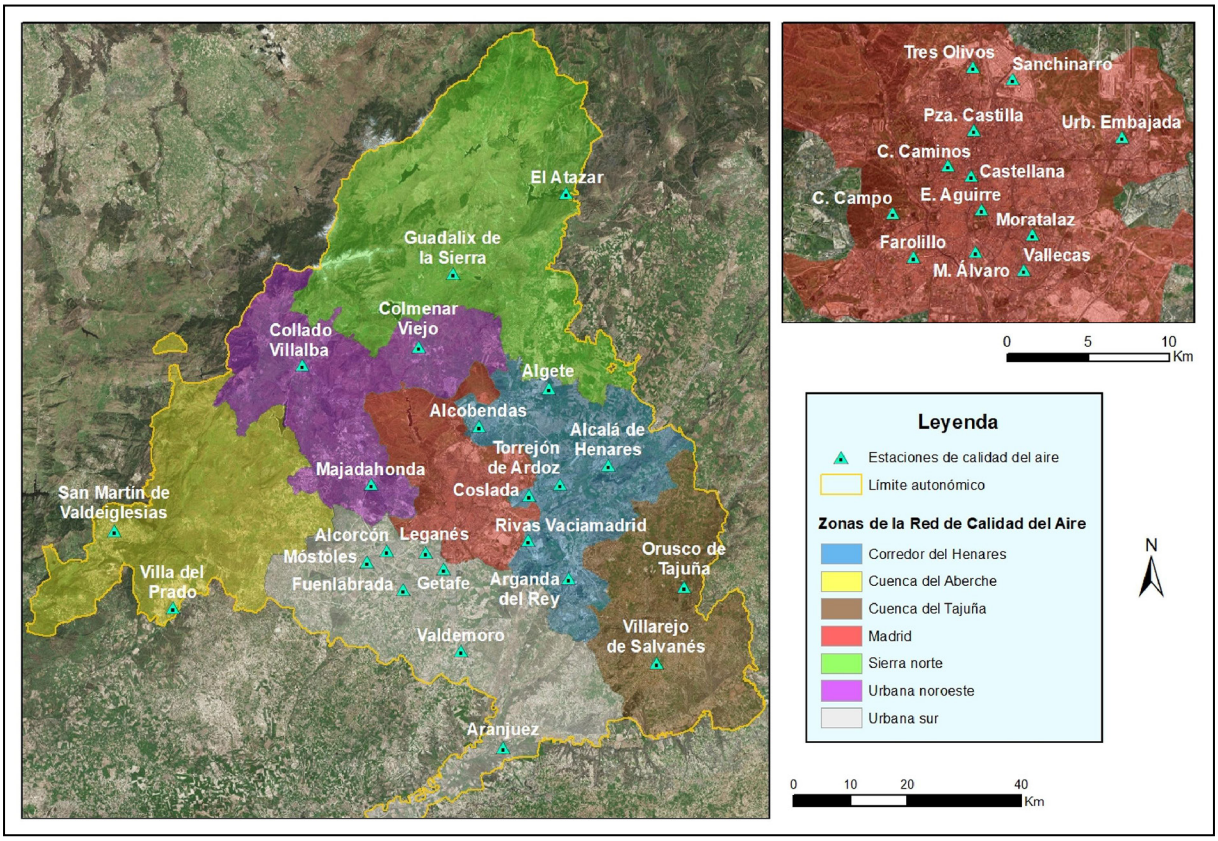
Las investigaciones previas sobre el tema han usado datos terrestres tanto de PM_{10}, como de $PM_{2,5}$, pero en este caso se ha optado por el primero, debido al escaso número de estaciones terrestres con medidas de $PM_{2,5}$ en la zona de trabajo. Los registros de PM_{10} proceden de 35 estaciones superficiales de medición, de las que 23 pertenecen a la Comunidad de Madrid y 12 al Ayuntamiento de Madrid (Figura 1). La Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid se divide en zonas con características similares, delimitadas en base a factores como los usos del suelo, la densidad de población, la orografía o el crecimiento industrial (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2014). Las zonas mejor representadas son, exceptuando el municipio de Madrid, el Corredor del Henares y la Urbana sur, con 7 estaciones cada una. El resto de las zonas contienen 3 estaciones (Urbana noroeste) o 2 estaciones (Sierra norte, Cuenca del Alberche y Cuenca del Tajuña), estando pues menos representadas las zonas con inferior densidad de población.

La cartografía vectorial utilizada se ha obtenido del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y la ortofoto del Instituto Geográfico Nacional (IGN) por medio de ArcGIS Online (ESRI).

Dada la trascendencia que las propiedades atmosféricas poseen en la concentración de partículas en el aire, según los estudios previos, en este trabajo se ha seleccionado una muestra de días representativos de dos tipos de tiempo bien definidos e identificados por Cañada (2017), ambos caracterizados por una elevada contaminación por partículas (en el periodo 2010-2015). El primero de ellos es un tipo de tiempo anticiclónico de verano (TT9), asociado a la formación de una baja térmica en la Península Ibérica, que fuerza la convergencia de vientos superficiales y la resuspensión de polvo en la atmósfera, si bien en altura predominan los movimientos subsidentes del aire (Ayuntamiento de Madrid, 2012). Las altas temperaturas y la radiación solar favorecen la formación de aerosoles secundarios que contribuyen al aumento de partículas. Las fechas incluidas en el análisis, previa comprobación de la suficiencia de los datos, son 25-30 de junio de 2012, 9-11, 18 y 21-23 de agosto de 2012 y 7-11 de agosto de 2015.

El segundo tipo de tiempo es el anticiclónico de invierno (TT6). Éste se caracteriza por estabilidad atmosférica general duradera que aumenta la concentración de contaminantes propiciada por inversiones térmicas; ellas favorecen el estancamiento del aire y la ausencia de movimientos ascensionales ventiladores. De este tipo se han seleccionado datos de los días 12-14 de enero de 2011, 3, 4 y 9 de febrero de 2011, 21-23 de diciembre de 2011 y 21 y 22 de diciembre de 2015. Ambos tipos de tiempo tienden a mostrar episodios de elevada polución, especialmente por material particulado en el TT9, debido a la intrusión sincrónica de polvo sahariano en la Península Ibérica (Cañada, 2017; Cañada y Moreno, 2017).

Figura 1. Localización de las estaciones de medición de la contaminación del aire y zonificación de la Comunidad de Madrid según la Red de Calidad del Aire



Elaboración propia

Las mediciones remotas de AOD provienen del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua, que cubren el globo terráqueo diariamente, sobrepasando el ecuador en torno a las 10:30 y 13:30 UTC (Hora Universal Coordinada), respectivamente. El producto empleado se denomina MxD04_L2 (MOD para Terra y MYD para Aqua) y es similar al adoptado en el estudio de Moreno *et al.* (2018), donde se describe la organización de tales datos MODIS. Tal producto contiene, a una resolución de 10 km, el parámetro *Optical Depth Land and Ocean* (AOD medido a una longitud de onda de 0,55 µm), el cual ha sido seleccionado mediante herramientas de post-procesamiento dentro del portal de la NASA *Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System, Distributed Active Archive Center* (LAADS DAAC) https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/, desde el que se ha llevado a cabo la descarga. El procedimiento de estimación del AOD permite un rango de valores de -0,1 a 5, estando vinculados los valores negativos a incertidumbres inherentes al cálculo (Remer *et al.*, 2006).

Los datos de la colección 6.1 aquí utilizados son fruto de la actualización por la NASA de la colección 6, que fue estudiada anteriormente por Moreno *et al.* (2018), por lo que difieren en buena medida respecto a los de ese trabajo. En dicha actualización (*vid.* Gupta, Levy, Mattoo, Remer y Munchak, 2016) se modificó el algoritmo para estimar la AOD sobre superficies urbanas, lo que afectaba significativamente a buena parte de los datos (ciudades del área metropolitana de Madrid). Aunque la actualización debiera conllevar una mejora en la calidad de los datos, en este caso ha supuesto una disponibilidad menor de éstos. Es conocido que la pérdida de datos (en ciertos lugares y momentos) por diversas causas es una limitación importante de los sensores MODIS; ello ha obligado aquí a renunciar a los de resolución de 3 km y a incluir aquellos con niveles de calidad 2 y 3. Recuérdese que cada dato lleva asociado un indicador de calidad, siendo el nivel 3 el de menor incertidumbre (Remer *et al.*, 2006).

En este estudio se han considerado también algunas variables meteorológicas en superficie: temperatura (grados centígrados), humedad relativa (%) y velocidad (m/s) y dirección del viento (grados respecto al N), aunque solo para los 23 observatorios de la Comunidad de Madrid, ya que las estaciones del Ayun-

tamiento carecían de esa información. Tanto los datos de material particulado, como los de índole meteorológica, se han tomado considerando la hora más cercana al paso del satélite sobre la zona estudiada.

2.2. Procedimientos de análisis

Con objeto de sondear de manera más amplia la hipotética relación entre AOD y PM_{10} se ha adoptado un proceso analítico con varias fases en las que se emplean diversas técnicas estadísticas exploratorias uni y bivariadas.

Primero se examina, para cada tipo de tiempo, el conjunto total de datos para caracterizar con estadísticos univariados los indicadores por separado y estudiar luego las asociaciones entre AOD, PM_{10} y las variables meteorológicas. La relación bivariada entre AOD y PM_{10} se aborda con diferentes variantes: por una parte se obtienen correlaciones lineales, con y sin el factor de corrección sobre el PM_{10} por humedad relativa, $f(HR) = 1 / (1 - HR / 100)$, empleado por Li *et al.* (2005), lo que se complementa con un filtrado de ciertos datos anómalos (*outliers*) detectados en el paso previo. Dicha corrección posibilita considerar el crecimiento higroscópico de las partículas sobre la medición en superficie, ya que la medición de AOD no discrimina dicha modificación del coeficiente de extinción, al no poder calibrarse con un método de referencia. Por otra parte, y tras clasificar los datos de AOD y PM_{10} en sendos intervalos indiciariamente relevantes, se elaboran tablas de contingencia y se usan técnicas de correlación / asociación bivariadas, que resultan menos exigentes métricamente que el coeficiente de Pearson.

En una segunda fase se han segmentado los datos por días y satélites para cada tipo de tiempo, analizando las relaciones bivariadas con tales muestras; posteriormente se examinan días selectos de potencial interés por sus condiciones específicas (mayor número de casos, diferentes niveles de correlación, etc.), y se investiga el impacto derivado de agregar las medidas superficiales de PM_{10} por píxel de AOD (mediante su promedio) o tener en cuenta factores meteorológicos.

La ejecución de los tratamientos analíticos se ha sustentado en los sistemas estadísticos SPSS y NCSS y la producción de mapas en el sistema de información geográfica ArcGIS.

3. Resultados

De acuerdo con los objetivos formulados, el análisis se centrará en los rasgos y relaciones espaciales entre las medidas de partículas en cada uno de los dos tipos de tiempo contemplados.

3.1. Visión de conjunto de las características de los datos y correlaciones entre PM_{10} y AOD

A) La distribución estadística de los datos

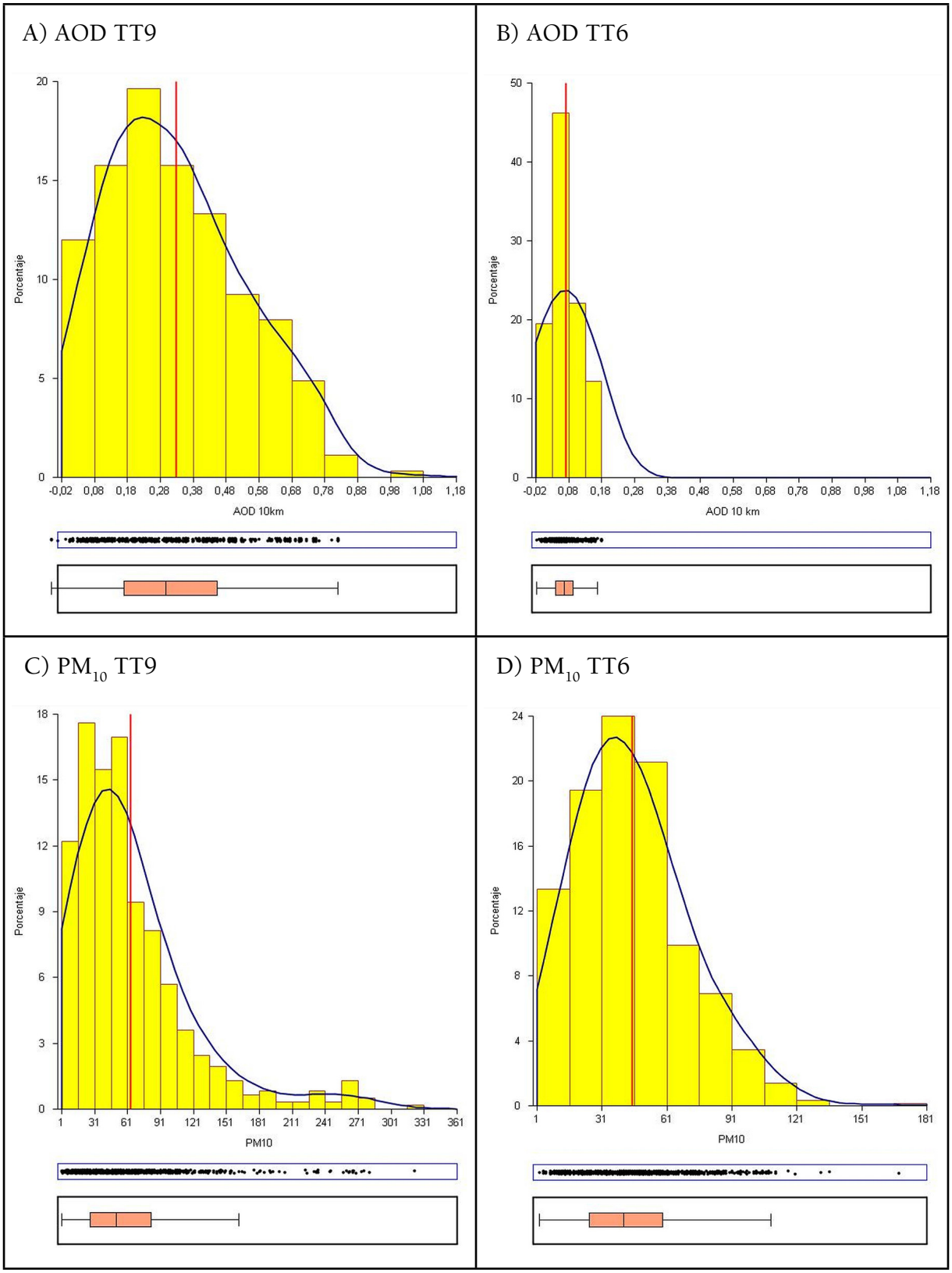
En la Tabla 1 con los resúmenes de los datos se aprecia que hay más disponibilidad de datos de alta contaminación en la muestra de tipo de tiempo anticiclónico de verano (TT9) que la de tiempo anticiclónico de invierno (TT6). Ello no repercutirá en los resultados, pues se analizarán separadamente. Las medias exhiben unos valores, tanto en AOD 10 km, como PM_{10}, claramente superiores en el TT9 respecto al TT6, como consecuencia de que en verano son muy frecuentes las intrusiones de aire sahariano provocadoras de niveles elevados de inmisión de partículas, cuya concentración supera el límite diario permitido por la legislación (50 $\mu g/m^3$).

Los estadísticos de variabilidad (desviación típica y coeficiente de variación) detectan que ésta también es visiblemente superior en el TT9 (verano) y los valores extremos (amplitud) ratifican esa impresión. Conviene señalar la presencia de valores mínimos sospechosamente anómalos (*outliers*), por bajos, lo que da indicios de mediocre fiabilidad, sobre todo porque los días seleccionados poseen una contaminación por partículas elevada.

Para comparar los histogramas de ambas variables entre los dos tipos de tiempo se han construido con unos límites inferiores comunes (y también el superior en AOD), aunque con intervalos de desigual amplitud. Todas las variables poseen asimetría positiva, mucho más exagerada en las partículas superficiales (Figura 2, Gráficos C y D) que en el AOD (A y B). Se aprecia también la mayor homogeneidad de los valores en el TT6 que en el TT9, en el cual destaca para AOD una larga cola a la derecha.

Finalmente, procede añadir que ninguna variable se ajusta a la normalidad, según los dos test aplicados (Tabla 1).

Figura 2. Histogramas del conjunto de datos, MODIS AOD arriba (A y B) y PM_{10} abajo (C y D), divididos según el período de tiempo al que pertenecen: tipo de tiempo anticiclónico de verano, TT9, a la izquierda (A y C) y anticiclónico de invierno, TT6, a la derecha (B y D)



Elaboración propia

Tabla 1. Estadísticos de la profundidad de aerosoles (MODIS AOD) y PM_{10} en los tipos de tiempo anticiclónico de verano (TT9) y anticiclónico de invierno (TT6) durante los días considerados

ESTADÍSTICOS	*TT9 – Verano*		*TT6 – Invierno*	
	AOD 10 km	*PM_{10} ($\mu g/m^3$)*	*AOD 10 km*	*PM_{10} ($\mu g/m^3$)*
N	619	995	263	638
Media	0,33	61,91	0,07	44,94
Desviación típica	0,21	51,25	0,04	25,45
Coeficiente de variación	0,64	0,83	0,57	0,57
Mínimo / Máximo	-0,05 / 1,02	1 / 322	-0,017 / 0,180	2 / 168
Asimetría	0,521	1,86	0,482	0,811
Test de normalidad Kolmogorov-Smirnov/valor de p	0,086 / 0,000	0,146 / 0,000	0,088 / 0,000	0,068 / 0,000
Test de normalidad Shapiro-Wilk / valor de p	0,962 / 0,000	0,835 / 0,000	0,968 / 0,000	0,956 / 0,000

Elaboración propia

B) Las correlaciones bivariadas

El diagrama bivariado entre AOD y PM_{10} para el TT9 (Figura 3A) muestra una tendencia escasamente definida y lejos de la linealidad. El coeficiente de Pearson arroja un valor positivo, pero exiguo. La nube de puntos para el TT6 (Figura 3D) insinúa sin embargo una tendencia positiva y significativa entre ambas variables (Tabla 2), con un r = 0,366, más acorde con la hipótesis plausible. En ambos casos se aprecia una heterocedasticidad muy marcada que afecta al tramo de datos medio bajo de AOD (eje X) en el TT9 y que adopta forma de abanico en el TT6.

La aplicación de la corrección por humedad, f(HR), mejora la r en unas décimas en ambos tipos de tiempo (Figura 3 B y E y Tabla 2), pero la fórmula no parece funcionar bien con todos los datos. Cuando la humedad relativa es alta (por encima del 60%) los valores obtenidos con ese factor de humedad son exageradamente elevados, sobre todo en el TT6. Esas altas tasas de humedad relativa durante el invierno se vinculan a las bajas temperaturas.

Apreciando que en el diagrama B (Figura 3) ciertos valores transformados (eje Y) resultan bastante anómalos (por altos) se ha construido el diagrama C, aplicando el filtro (condición de inclusión) de los datos < 250 a la variable PM_{10}*f(HR), para explorar luego la correlación. El resultado mejora solo muy ligeramente hasta r= 0,152. En el caso del TT6, sin embargo, la aplicación a la variable PM_{10}*f(HR) de un filtro de datos < 285 (condición de inclusión) hace que la correlación resultante mejore bastante, llegándose a alcanzar una r de 0,5 (Figura 3, diagrama F). Se colige, pues, la importancia que pueden tener ciertos datos anómalos en la medición de la relación entre las variables en cuestión.

Tabla 2. Correlaciones lineales entre la profundidad óptica de aerosoles (MODIS AOD) y PM_{10} para el conjunto de datos según los tipos de tiempo, aplicando el factor de corrección por humedad (fHR) y determinados filtros

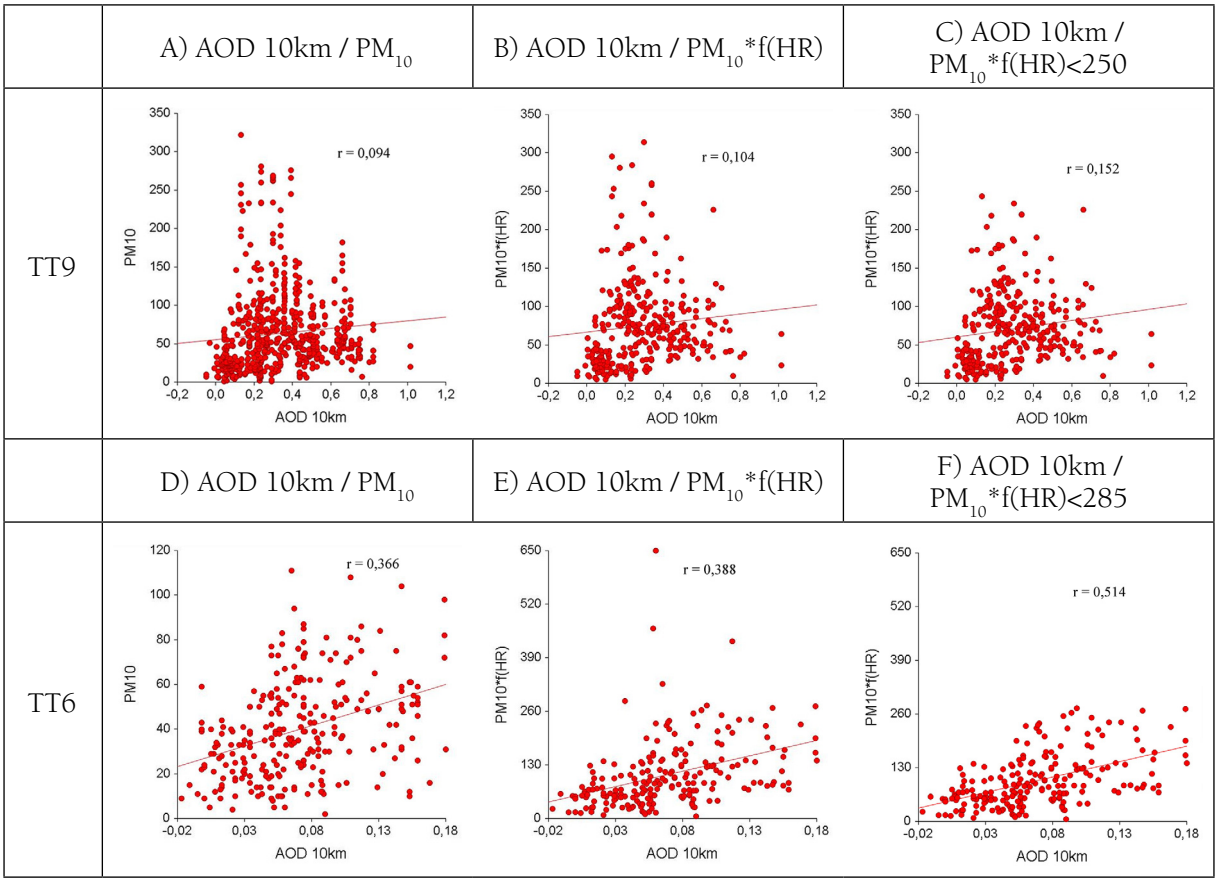
	TT9			*TT6*		
	r	N	Significación/p-valor[4]	R	N	Significación/p-valor[4]
AOD 10km / PM_{10}	0,094	614	0,019*	0,366	261	0,000**
AOD 10km / PM_{10}*f(HR)	0,104	326	0,06	0,388	210	0,000**
	*Aplicación del filtro: PM_{10}*f(HR) < 250*			*Aplicación del filtro: PM_{10}*f(HR) < 285*		
AOD 10km / PM_{10}	0,149	319	0,008	0,443	205	0,000**
AOD 10km / PM_{10}*f(HR)	0,152	319	0,007	0,514	205	0,000**

Elaboración propia

4 Como se ha señalado antes, la distribución de las variables originales (AOD y PM_{10}) no se ajusta a la normalidad, requisito básico para el test t de significación de r (i. e. $\rho = 0$). Por ese motivo, en esta tabla y en el resto del artículo, los resultados presentados de dicho test no se pueden considerar rigurosos, sino como una mera referencia comparativa.

Un examen atento de la heterocedasticidad en el diagrama del TT9 (Figura 3A) permite vislumbrar el valor de 0,09 como un umbral de AOD (eje X) a partir del cual la variabilidad en la PM_{10} crece mucho. En el diagrama de dispersión del TT6 (Figura 3D) es el umbral 0,05 de AOD el que permite diferenciar dos zonas: una por debajo, donde a cifras más bajas de AOD corresponden también valores bajos de PM_{10}, y otra zona por encima, donde hay menos relación (a valores medios y altos de AOD pueden corresponder valores bajos, medios o altos de PM_{10}) (Figura 3 D).

Figura 3. Diagramas de dispersión entre PM_{10} y MODIS AOD 10km en el TT9 (A, B y C) y TT6 (D, E y F)



Elaboración propia

A partir de tales observaciones se planteó acometer análisis agrupando los datos y generando tablas de contingencia. La variable AOD se ha dividido en dos intervalos, usando como límites los umbrales recién mencionados. Las PM_{10}, por su parte, se han dividido mediante el límite diario permitido por la legislación, 50 µg/m³. El resultado se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla de contingencia de los datos de PM_{10} y AOD para el tipo de tiempo anticiclónico de verano (TT9) y tipo de tiempo de invierno (TT6)

		PM_{10}					
	AOD 10Km	<50		>50		Total	
		Frec.	%	Frec.	%	Frec.	%
TT9	<0,09	84	13,68	10	1,63	94	15,31
	>0,09	222	36,16	298	48,53	520	84,69
	Total	306	49,84	308	50,16	614	100
TT6	<0,05	79	30,27	9	3,45	88	33,72
	>0,05	103	39,46	70	26,82	173	66,28
	Total	182	69,73	79	30,27	261	100

Elaboración propia

La distribución de los datos en la Tabla 3 insinúa una relación positiva, acorde con la hipótesis esperada. La aplicación del test de la χ^2 (Chi Cuadrado) arroja un valor de 69,36 con un valor p = 0,0000, lo que permite rechazar la hipótesis nula (H_0) de que las dos variables son independientes y aceptar la hipótesis alternativa (H_1) de que existe relación entre ambas variables. Los coeficientes V de Cramer (0,336) y el coeficiente γ (Gamma) de Goodman y Kruskal (0,837) confirman la asociación entre ambas variables y, en este último caso, positiva.

Para el TT6, la tabla de contingencia arroja un valor del test de la χ^2 de 25,26 con una p de 0,000, que permite rechazar H_0 y aceptar también la relación entre ambas variables; los coeficientes de V de Cramer (0,311) y, particularmente, la Gamma (0,713) avalan la relación de nuevo dicha asociación positiva.

La falta de normalidad de las dos variables ha aconsejado la utilización de una tercera técnica en el estudio de estas relaciones bivariadas, el coeficiente de correlación biserial. En él se consideran las dos variables cuantitativas, si bien la variable PM_{10} se ha dicotomizado por el valor 50. Los resultados dan unos coeficientes de 0,22 para el TT9 y 0,42 para el TT6, ambos estadísticamente significativos con un p valor de 0,0000.

C) Relaciones de AOD y PM_{10} con factores meteorológicos

La correlación del espesor óptico de aerosoles y PM_{10} superficial con variables meteorológicas de tierra (velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa) da unos resultados diferentes en función del tipo de tiempo, lo cual es lógico porque ambos se corresponden con estaciones del año caracterizadas por unas condiciones atmosféricas distintas. En el **tiempo anticiclónico de verano (TT9)** la atmósfera es muy compleja: por un lado, el fuerte calentamiento superficial favorece la formación de una baja térmica que produce una convergencia de vientos superficiales y el desarrollo de un sistema convectivo, el cual a su vez incrementa la resuspensión de polvo atmosférico (Viana *et al.*, 2005). AOD y PM_{10} tienen una relación positiva con la temperatura en superficie (Tabla 4). La humedad relativa correlaciona positivamente con $PM_{10,}$ pero la asociación resulta nula con el AOD (-0,058). La velocidad del viento superficial exhibe estadísticamente un comportamiento dispar, con AOD muestra una relación negativa y con PM_{10} positiva (Tabla 4). Los vientos del sur y sureste, procedentes de África es el que trae esa elevada carga de concentración de partículas superficiales, vientos que cuando llegan a la Meseta se calientan aún más y provocan movimientos convectivos locales. Estos vientos no se dan en altura donde predomina una subsidencia generalizada. Lo normal es que el viento contribuya a la dispersión de contaminantes, salvo en estos casos de oleadas de aire sahariano donde la elevada concentración de partículas está ligada a cierta velocidad de viento en superficie.

Tabla 4. Correlación entre AOD y PM_{10} con las variables meteorológicas: velocidad del viento (VV), temperatura (TEMP) y humedad relativa (HR) para el tipo de tiempo anticiclónico de verano (TT9) y tipo de tiempo de invierno (TT6)

		TT9			TT6		
		VV	TEMP	HR	VV	TEMP	HR
AOD 10km	Correlación de Pearson	-0,215	0,329	-0,058	-0,083	-0,286	0,276
	Significación / p-valor	0,000	0,000	0,294	0,244	0,000	0,000
	n	334	439	331	197	233	213
PM_{10}	Correlación de Pearson	0,310	0,278	-0,220	-0,137	-0,152	0,126
	Significación/ p-valor	0,000	0,000	0,000	0,006	0,001	0,009
	n	628	753	625	402	501	427

Elaboración propia

El **TT6, tiempo anticiclónico de invierno,** está dominado por la estabilidad atmosférica, que favorece el estancamiento de las masas de aire (Viana *et al.*, 2005). Hay un mayor enfriamiento del aire en la parte baja de la atmósfera que en la parte alta, lo que favorece las inversiones térmicas y la ausencia de ventilación y de dispersión de contaminantes. Tanto AOD como PM_{10} tienen una correlación negativa baja, pero que sería significativa, con la temperatura, es decir, tiende a darse una mayor concentración de partículas cuando la temperatura es más baja, plausiblemente por las citadas inversiones térmicas (Tabla 4). La relación de la velocidad del viento superficial con AOD resulta insignificante (-0,083); sin embargo, con PM_{10} es negativa, pero sería significativa, lo que concordaría con su efecto dispersor. En cuanto a la humedad relativa, corre-

laciona de modo positivo (y sería significativo) con ambas variables, lo que implica que a mayores tasas de humedad mayor es la concentración de partículas y de aerosoles atmosféricos. Es frecuente que, en invierno, como la temperatura es muy baja, se sature antes la masa de aire y aumente por tanto la humedad relativa.

3.2. Análisis segmentado por día y satélite para el tipo de tiempo de verano (TT9)

Con el fin de soslayar posibles circunstancias temporales perturbadoras, en este apartado se abordará un examen más pormenorizado de las relaciones entre los indicadores de partículas remoto y superficial, desagregando los datos por submuestras según día y satélite. Ello obviamente implica trabajar con cifras de datos mucho menores, con las consiguientes repercusiones en los test de significación (y sus requisitos).

3.2.1. Las relaciones bivariadas entre MODIS AOD y PM_{10} superficial en el tiempo anticiclónico de verano (TT9)

En la Tabla 5 se presenta una panorámica de las relaciones bivariadas (con n ≥ 9) en el TT9 entre AOD y PM_{10}, para luego profundizar en algunos casos reveladores. Se aprecia que las correlaciones de Terra AOD son mayormente positivas, pero sólo cuatro serían significativas. La mejor correlación corresponde al día 29 de junio de 2012 con una r de 0,828 y una p de 0,002, seguido del 26 de junio del mismo año con una r de 0,539 y una p de 0,012. En el resto de los días las correlaciones son próximas a cero (a veces negativas) y no serían significativas.

En cuanto al satélite Aqua, también son mayoría las correlaciones positivas, si bien sólo cuatro son destacadas y significativas. Resalta con una correlación de 0,558 y un valor de p = 0,001 el día 29 de junio de 2012 (mismo día que en el satélite Terra). Otros casos con un coeficiente notable son el 9 y el 18 de agosto de 2012. Sorprende un tanto el alto coeficiente negativo (-0,581) y significativo (p=0,037) del día 23 de agosto de 2012; en los casos restantes las correlaciones son cercanas a cero.

Tabla 5. Correlaciones entre MODIS AOD y PM_{10} desagregando por día y satélite en el TT9 (anticiclónico de verano). Nótese que concurren a veces dos pasadas (P) del satélite en un mismo día

Día	Terra AOD 10km			Aqua AOD 10km		
	r	n	Significación / p-valor	r	n	Significación / p-valor
25/06/2012	Hora 13: 0,026	17	0,922	-0,081	21	0,727
	Hora 14: -0,067	17	0,799			
26/06/2012	**0,539**	21	**0,012***	—		
28/06/2012	P1) 0,338	28	0,078	0,204	15	0,465
	P2) 0,246	34	0,161			
29/06/2012	**0,828**	11	**0,002****	**0,558**	30	**0,001****
30/06/2012	-0,171	27	0,395	—		
09/08/2012	—			**0,415**	29	**0,025***
10/08/2012	-0,04	28	0,838	0,397	12	0,201
11/08/2012	—			-0,258	21	0,26
18/08/2012	-0,036	19	0,885	P1) Hora 14: 0,237	27	0,233
				P1) Hora 15: 0,213	27	0,286
				P2) 0,595	14	**0,025***
21/08/2012	**0,449**	20	**0,047***	0,048	20	0,842
22/08/2012	0,161	14	0,581	—		
23/08/2012	0,164	13	0,591	**-0,581**	**13**	**0,037***
07/08/2015	**0,536**	19	**0,018***	-0,059	16	0,829
08/08/2015	-0,157	17	0,549	0,535	12	0,073
09/08/2015	0,062	9	0,874	-0,098	22	0,664
10/08/2015	0,3	27	0,129	Hora 15: -0,010	12	0,976
				Hora 16: 0,077	12	0,812
11/08/2015	0,509	14	0,063	P1) 0,143	17	0,585
				P2) 0,058	10	0,873

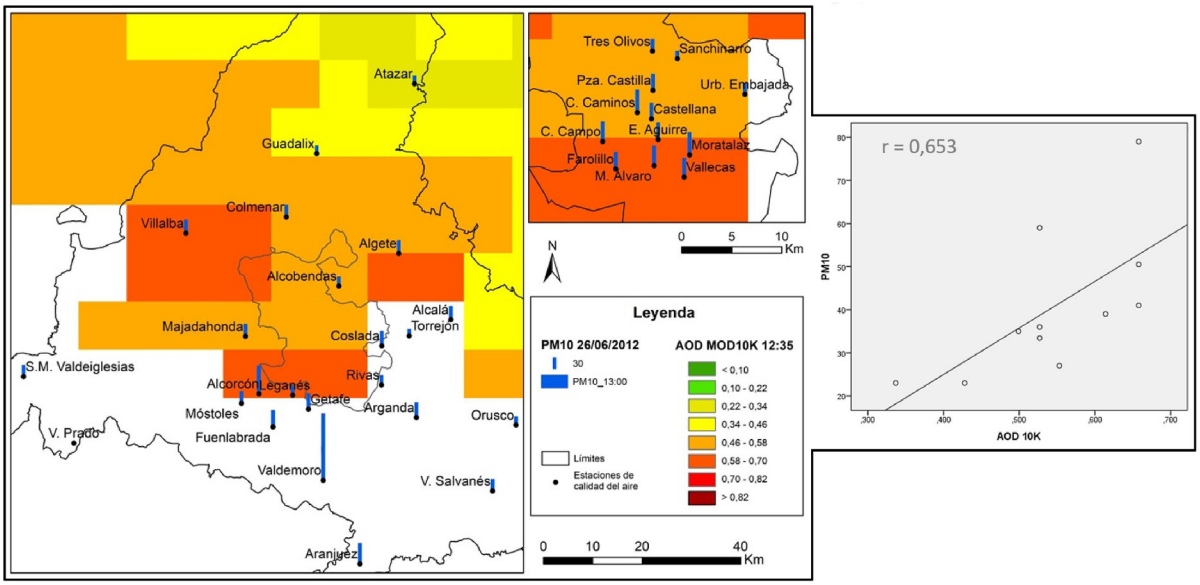
Nota: ** Sería significativo al 0,01; * Sería significativo al 0,05

Elaboración propia

3.2.2. Examen detallado para días selectos del tiempo anticiclónico de verano (TT9)

Los resultados previos invitan a escrutar con mayor detenimiento algunos de tales días, con objeto de conocer detalles de la relación entre medidas terrestres y remotas y su plasmación espacial. La confrontación de tales datos mediante técnicas cartográficas y estadísticas se abordó considerando algunas variantes: introduciendo o no la corrección de PM_{10} por la humedad relativa propuesta por Li *et al.* (2005) y promediando o no los valores de PM_{10} terrestres ubicados en el mismo píxel de MODIS AOD. Con ello se pretendió divisar posibles vías de mejora en la medición de las hipotéticas relaciones estadísticas.

Figura 4. Mapa de MODIS AOD y de PM_{10} del 26 de junio de 2012 de la Comunidad de Madrid (izda.) y de la ciudad de Madrid (recuadro superior derecha). El gráfico de dispersión y r usan valores de AOD y promedios de PM_{10} de las estaciones en cada píxel de AOD



Elaboración propia

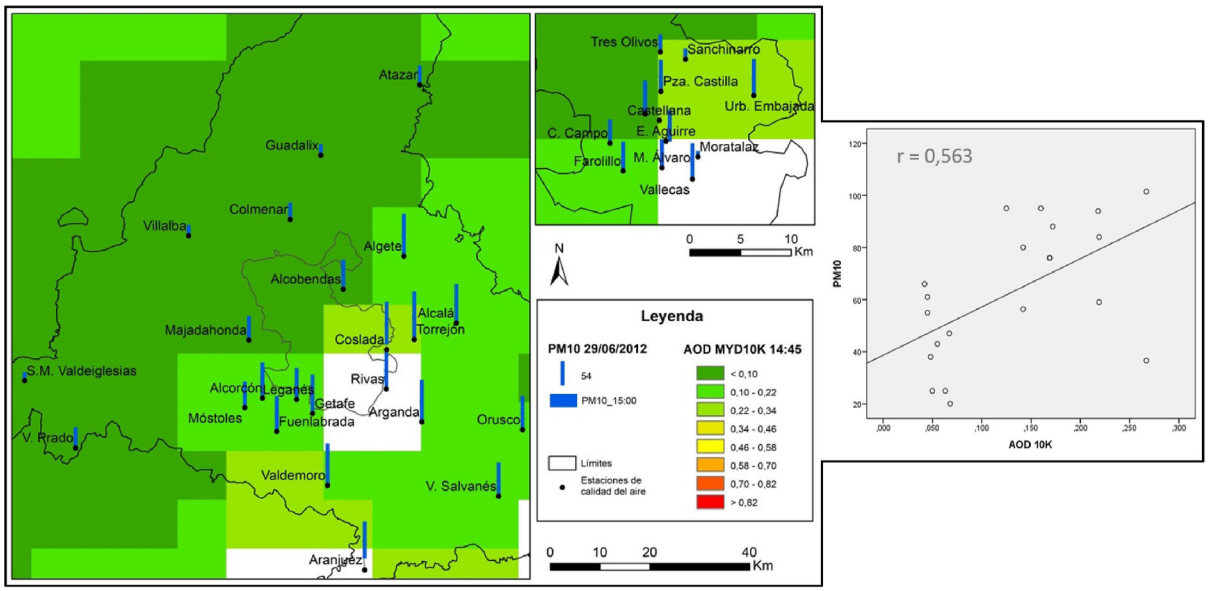
La notable correlación positiva (que sería significativa) del **26 de junio de 2012** (fecha destacada por sus elevados valores de contaminación), como se observa en la Figura 4, no incluye apenas datos de AOD de las zonas Urbana sur, Cuenca del Alberche o Cuenca del Tajuña. De hecho, las únicas estaciones de la primera de ellas incluidas (Alcorcón y Leganés) son las que generan mayor heterocedasticidad en el gráfico de dispersión. Usando la agregación (mediante promedio) de las mediciones de PM_{10} por píxel de AOD aumenta la correlación hasta 0,653, sin comprometer la significación estadística del coeficiente, aunque se reduce el número de casos hasta 11 (véase Figura 4[5]). En cambio, al aplicar la corrección por humedad, aunque la correlación se mantiene casi intacta, no sería significativa. El incremento de partículas que muestra Cuatro Caminos puede estar vinculado a factores locales (estación urbana de tráfico y temperaturas altos).

El día **29 de junio de 2012** corresponde a una bajada de la contaminación generalizada respecto a los días anteriores, pues se trata del final de un período de intrusión de polvo sahariano. En el mapa de la Figura 5[6] se observan los valores bajos de AOD, que cubren casi la totalidad del territorio. Promediando los datos de PM_{10} por píxeles de MODIS se mejora ligeramente la correlación (r=0,563 respecto a r=0,558) manteniendo la significación, hecho menos remarcable que el gran aumento de la correlación al aplicar la corrección por humedad relativa (r=0,807, con n=19). Las estaciones Casa de Campo, Arganda del Rey, Valdemoro y Orusco de Tajuña presentan valores de PM_{10} por encima de la línea de regresión a la vez que registran una mayor velocidad del viento superficial (brisa moderada en la escala de Beaufort), pudiendo deberse a un mayor transporte (advección) de partículas sobre esos lugares.

5 El mapa de MODIS con resolución de 10 km, satélite Terra, corresponde a las 12,35 horas y las PM_{10} a las 13 horas. Los píxeles en blanco son valores de AOD de calidad subóptima o perdidos.

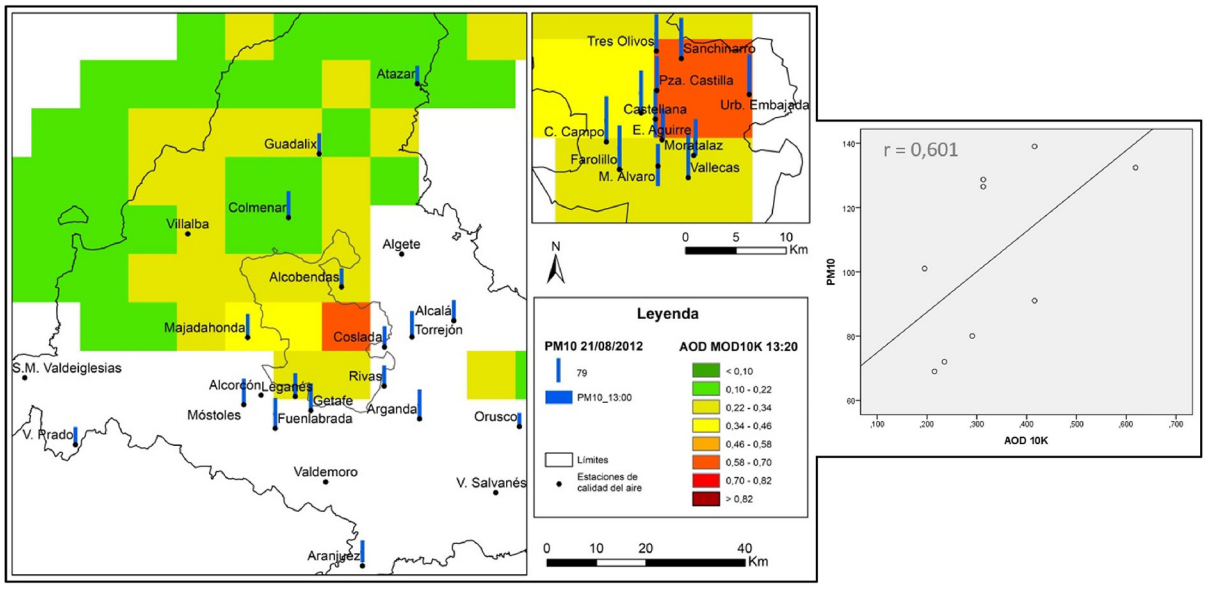
6 El mapa de MODIS con una resolución de 10 km, satélite Aqua, corresponde a las 14,45 horas y las PM_{10} a las 15 horas. Los píxeles en blanco son valores de AOD de calidad subóptima o perdidos.

Figura 5. Mapa de MODIS AOD y de PM_{10} del 29 de junio de 2012 de la Comunidad de Madrid (izda.) y de la ciudad de Madrid (recuadro superior derecha). El gráfico de dispersión y r usan valores de AOD y promedios de PM_{10} de las estaciones en cada píxel de AOD



Elaboración propia

Figura 6. Mapa de MODIS AOD y de PM_{10} del 21 de agosto de 2012 de la Comunidad de Madrid (izda.) y de la ciudad de Madrid (recuadro superior derecha). El gráfico de dispersión y r usan valores de AOD y promedios de PM_{10} de las estaciones en cada píxel de AOD



Elaboración propia

Aunque la mayor parte del territorio carezca de datos de AOD, con la información de las zonas Urbana noroeste, Sierra norte y de la ciudad de Madrid (véase mapa de la Figura 6) emerge una correlación positiva el día **21 de agosto de 2012.** La relación se intensifica con los datos de PM_{10} promediados por píxeles (r=0,601, pero con n=9, que resultaría en una menor significación), y también al incluir la corrección por humedad, aunque ahora ya no sería estadísticamente significativa. En el recuadro de la ciudad de Madrid de la Figura 6 se patentiza el claro impacto de la misma sobre el elevado valor de AOD y también se vislumbran las implicaciones notables de la geometría (y resolución) de los píxeles sobre los datos de MO-

DIS y su relación con las PM_{10}, pues muchas estaciones terrestres próximas al píxel con alto AOD tienen elevados niveles de material particulado, y sin embargo se ubican en píxeles cercanos con menor AOD[7].

Como balance de los precedentes análisis cabe señalar, en primer lugar, la existencia de amplias zonas de la Comunidad de Madrid sin datos de AOD, lo que debilita la representatividad de las muestras. Y en segundo, que aunque en general el signo de los coeficientes r es acorde con la relación hipotética y que en ciertos días éstos serían significativos, abundan también las situaciones en las que la relación queda mal definida, estadísticamente hablando, lo que da lugar a inconsistencias empíricas.

3.3. Análisis segmentado por día y satélite para el tiempo anticiclónico de invierno (TT6)

3.3.1. Las relaciones bivariadas entre MODIS AOD y PM_{10} superficial en el TT6

El número de pares de datos disponibles para analizar es algo distinto entre los dos satélites, siendo n, en general, menor para Terra (Tabla 6). Para este tipo de tiempo invernal existe el mismo número de correlaciones positivas significativas entre AOD y PM_{10} en los dos satélites, Aqua y Terra, aunque solo coinciden en un día. Las mejores correlaciones en Terra son el 9 de febrero de 2012, con una r de 0,921 pero con sólo 5 casos, y el 21 de diciembre de 2011, con un coeficiente de 0,722. Llama algo la atención el coeficiente negativo del 3 de febrero de 2011 (-0,215), aunque no sería significativo. Las correlaciones con los datos del satélite Aqua resultan más sólidas al apoyarse en un mayor número de casos. El 14 de enero de 2011 el coeficiente llega a 0,55 con un valor de p=0,002. El 21 de diciembre de 2011 existe coincidencia en unas correlaciones notables con los datos de ambos satélites. En el resto de los días las correlaciones tienden a ser positivas, pero resultan bajas (véase Tabla 6).

Tabla 6. Correlaciones entre MODIS AOD y PM_{10} desagregando por día y satélite en el TT6 (anticiclónico de invierno). Nótese que concurren a veces dos pasadas (P) del satélite en un mismo día

Día	Terra AOD 10km			Aqua AOD 10km		
	r	n	Significación / p-valor	R	n	Significación / p-valor
12/01/2011	—			0,23	29	0,23
14/01/2011	Hora 12: 0,120	8	0,778	**0,55**	28	**0,002****
	Hora 13: 0,142	8	0,737			
03/02/2011	-0,215	13	0,481	—		
04/02/2011	-0,008	6	0,989	Hora 14: 0,243	22	0,275
				Hora 15: 0,186	22	0,407
09/02/2011	P1) 0,211	10	0,559	-0,055	19	0,822
	P2) 0,921	5	**0,026***			
21/12/2011	**0,722**	9	**0,028***	**0,485**	17	**0,048***
22/12/2011	0,566	12	0,055	P1) Hora 13: 0,240	11	0,477
				P1) Hora 14: 0,283	11	0,399
				P2) -0,651	4	0,349
23/12/2011	0,244	13	0,422	0,581	11	0,061
21/12/2015	—			0,334	15	0,224
22/12/2015	0,465	6	0,353	0,054	23	0,805

Nota: ** Sería significativo al 0,01; * Sería significativo al 0,05

Elaboración propia

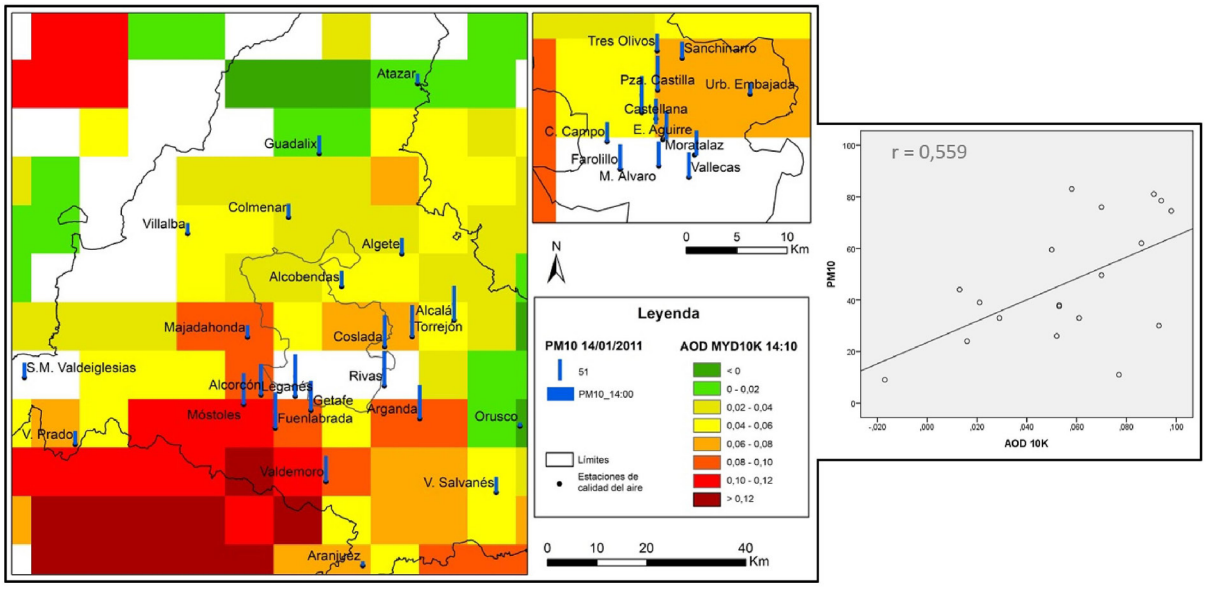
3.3.2. Examen detallado para días selectos del tiempo anticiclónico de invierno (TT6)

Para este tipo de tiempo se han escogido dos días con buena cobertura del satélite Aqua, disponiendo de mayor número de datos. En el mapa de la Figura 7 se aprecia una amplia zona de altos valores de AOD

7 El mapa MODIS AOD con 10 km de resolución, satélite Terra, corresponde a las 13,20 horas y las PM_{10} a las 13 horas. Los píxeles en blanco son valores de AOD de calidad subóptima o perdidos.

al suroeste de la región durante el día **14 de enero de 2011**, que coincide con valores elevados de PM_{10} en varias estaciones terrestres allí ubicadas. Pese a que el sur de la capital carece de información de AOD la correlación es positiva y mejora, aunque levemente, usando el promedio de valores de PM_{10} por píxel (r=0,559; véase el gráfico de la Figura 7[8]) y la aplicación del factor humedad (r=0,594); ambas relaciones serían significativas. La estación de Aranjuez es la que desajusta en mayor medida la correlación (por su escasa PM_{10}), plausiblemente condicionada por factores meteorológicos locales (bajas temperaturas con inversión térmica y humedad relativa alta).

Figura 7. Mapa de MODIS AOD y de PM_{10} del 14 de enero de 2011 de la Comunidad de Madrid (izda.) y de la ciudad de Madrid (recuadro superior derecha). El gráfico de dispersión y r usan valores de AOD y promedios de PM_{10} de las estaciones en cada píxel de AOD



Elaboración propia

En el mapa del **21 de diciembre de 2011**[9] (véase Figura 8) se aprecian valores más altos de AOD en el centro y sur-sureste de la región. El elevado nivel de material particulado en la capital parece acorde al incremento de AOD sobre el sur de la ciudad de Madrid y su periferia, aun faltando datos del grueso de la urbe. La corrección por humedad relativa y el uso de datos promediados de PM_{10} por píxel (véase el diagrama de la Figura 8) mejoran algo la correlación, sin alterar apenas la significación. Destaca (en el gráfico sobre todo) el elevado nivel de partículas en superficie registrado en la estación de Alcobendas y otras en el norte de la capital.

El **22 de diciembre de 2015**[10], con valores de AOD medio-altos por todo el territorio, presenta una correlación cercana a 0. Sin embargo, en el gráfico de la Figura 9 se puede observar cómo, promediando los valores de PM_{10} de las estaciones sitas dentro de un mismo píxel, la correlación se torna ligeramente positiva. Lo mismo ocurre al aplicar la corrección por humedad, aunque ninguna de estas variantes parece lograr que r sea estadísticamente significativo. Aranjuez vuelve a aparecer como la principal estación responsable del desajuste de la correlación, lo que parece abonar de nuevo la acción de factores operando localmente.

En las situaciones diarias analizadas se manifiestan mayores niveles por contaminación en la ciudad de Madrid y la zona Urbana sur; este hecho podría vincularse con la proclividad a las inversiones térmicas (y, por tanto, de estanqueidad de la polución) en el ámbito de estudio, y más frecuentes en zonas de valle,

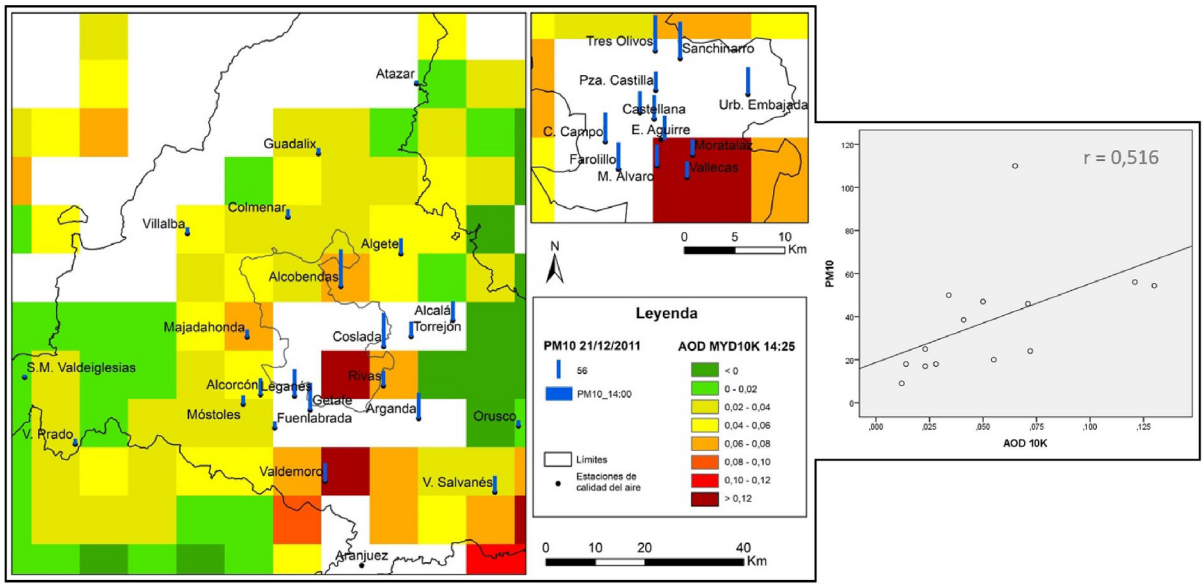
8 El mapa MODIS AOD con 10 km de resolución, satélite Aqua, corresponde a las 14:10 horas y las PM_{10} a las 14:00 horas. Los píxeles en blanco son valores de AOD de calidad subóptima o perdidos.

9 Mapa de MODIS AOD con 10 km de resolución, satélite Aqua, corresponde a las 14:25 horas y las PM_{10} a las 14:00 horas. Los píxeles en blanco corresponden a valores de AOD de calidad subóptima o perdidos.

10 El mapa de MODIS AOD con 10 km de resolución, satélite Aqua, corresponde a las 13:50 horas y las PM_{10} a las 14:00 horas. Los píxeles en blanco corresponden a valores de AOD de calidad subóptima o perdidos.

como sucede en Aranjuez, reforzadas por la específica emisión de contaminantes en cada zona —Madrid por su tráfico y la zona Urbana sur por su actividad industrial (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2014)—.

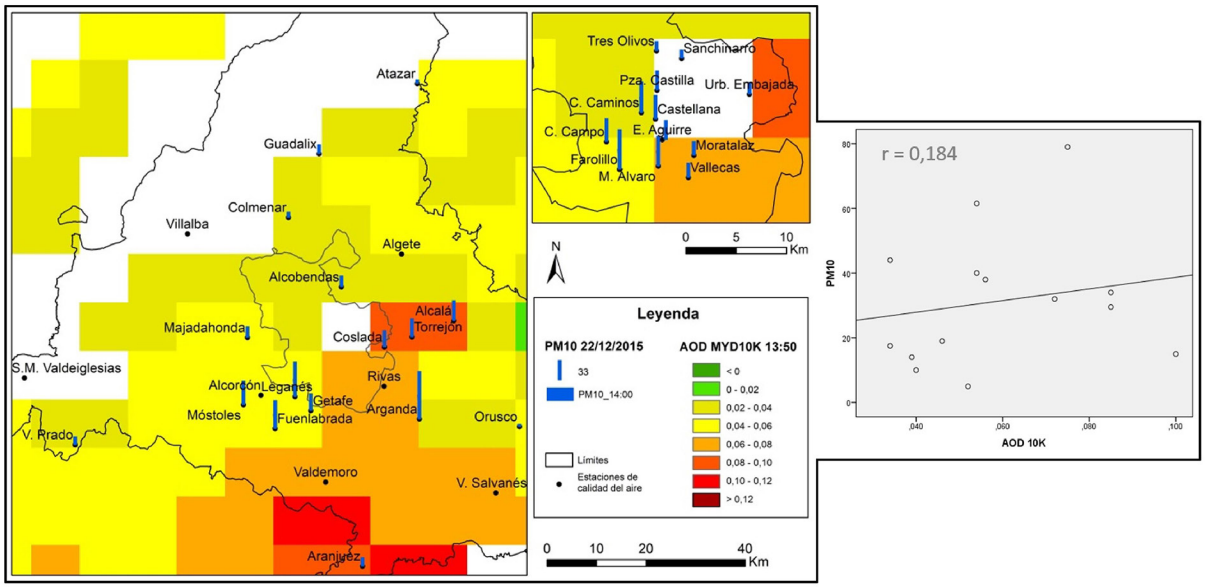
Figura 8. Mapa de MODIS AOD y de PM_{10} del 21 de diciembre de 2011 de la Comunidad de Madrid (izda.) y de la ciudad de Madrid (recuadro superior derecha). El gráfico de dispersión y r usan valores de AOD y promedios de PM_{10} de las estaciones en cada píxel de AOD



Elaboración propia

En resumen, del análisis para días con TT6 se constata una cierta disparidad en la disponibilidad de datos (más abundantes en el satélite Aqua) y que también surgen unas pocas correlaciones positivas entre MODIS AOD y PM_{10}, que serían significativas y acordes con la hipótesis planteada, sin que hayan aparecido coeficientes relevantes que la contradigan.

Figura 9. Mapa de MODIS AOD y de PM_{10} del 22 de diciembre de 2015 de la Comunidad de Madrid (izda.) y de la ciudad de Madrid (recuadro superior derecha). El gráfico de dispersión y r usan valores de AOD y promedios de PM_{10} de las estaciones en cada píxel de AOD



Elaboración propia

4. Discusión

Mientras que la mayor parte de los estudios han tratado de establecer métodos numéricos para estimar la concentración de partículas en el aire a partir de datos satelitales mediante la inclusión de numerosos factores de complejidad diversa, en el presente artículo se acomete una extensa caracterización de los datos con objeto de escudriñar en la compleja y elusiva relación empírica entre material particulado superficial y espesor óptico de aerosoles. El examen de los estadísticos descriptivos, las relaciones bivariadas y los casos singulares (según el día) han permitido desvelar y confirmar hallazgos, apuntar nuevos aspectos y circunstancias a tener en cuenta y resaltar también las limitaciones existentes. Recuérdese siempre que se trata de medidas realizadas sobre ámbitos (unidades espaciales) distintos y con técnicas diferentes, por lo que las divergencias entre ambas son forzosas.

Una de las principales limitaciones de la metodología empleada es la cambiante y a menudo escasa disponibilidad de datos MODIS, que deja sin cobertura amplias zonas del territorio y perturba seriamente la consistencia de los experimentos estadísticos. No extraña que se haya intentado paliar ese problema estimando datos faltantes con métodos de interpolación (e. g. Ma *et al.*, 2014). Otro de los factores adversos y generador de sesgo radica en la resolución de 10 km de los datos de AOD; aunque resulte apta para ámbitos suprarregionales, en estudios de escala regional o local no lo es tanto, ya que en píxeles de ese tamaño suele haber una variedad de concentraciones superficiales de PM_{10}, según las actividades y usos del suelo existentes (y su transporte). Asumir entonces solo un registro terrestre (dependiente de un microentorno específico) es plausible que, como muestra (estimador) puntual, posea una limitada representatividad respecto al dato de AOD (referido a un prisma tridimensional con 10 km de base); ello obviamente afecta a la relación estadística entre los dos indicadores usados aquí. Este hallazgo de que la correlación, en general, mejoraba cuando se usaba el promedio de los registros de PM_{10} de las estaciones del mismo píxel (como estimador estadístico de la realidad superficial) parece concordar con la lógica del muestreo espacial que las estaciones conforman (aunque en muchos píxeles hay solo una estación). Junto a una mayor densidad de estaciones terrestres (al menos experimentalmente), otra vía para avanzar en la concordancia de ambos tipos de datos sería contar con mayores resoluciones para la información remota, por ejemplo 3 km, o de 1 km, como provee el algoritmo MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) empleado por Li, Ma, Xu y Song (2018).

Los resultados obtenidos en este trabajo al desagregar por tipos de tiempo tienen cierta concordancia con los de otros estudios que segmentan sus datos por estaciones del año. Gupta y Christopher (2009) obtienen correlaciones más altas en otoño y primavera, y más bajas en verano e invierno, al igual que Ghotbi, Sotoudeheian y Arhami (2016), aunque este último obteniendo correlaciones más bajas en verano. Ambos sostienen la existencia de diferencias bien definidas entre estaciones, remarcando el peor desempeño de las estaciones de verano e invierno. A ello se suma que en períodos de elevadas concentraciones de PM_{10} la relación con el AOD se deteriora, según Ghotbi *et al.* (2016). En este caso la correlación global entre PM_{10} y AOD (Tabla 2) se mostraba superior en el TT6 (invierno), aunque al segmentar los datos (por días y satélites) han aflorado relaciones positivas de cierta intensidad en ambos tipos de tiempo, si bien con muestras pequeñas.

Finalmente, procede recordar que la disposición de los aerosoles en la componente vertical es variable a lo largo del día, pero el parámetro AOD es una medida instantánea. Molero, Salvador, Núñez, Artíñano y Pujadas. (2001) analizaron la evolución de la capa de mezcla a lo largo de un día en el mes de febrero (invierno, situación anticiclónica) en Madrid mediante tecnología LIDAR. Se observó una estratificación en las primeras horas de la mañana, que va desapareciendo a medida que la superficie se calienta. A partir de las 12:00 h la concentración de aerosoles crece en altura y la capa de mezcla se expande, produciéndose posteriormente un máximo de concentraciones entre las 13:00 y las 14:30 h debido a procesos fotoquímicos que generan partículas secundarias. Aunque la altura de la capa de mezcla atmosférica sea dependiente de la temperatura, si se toma este último parámetro como única referencia se desemboca en una causalidad de signo opuesto, es decir, por una parte, la creciente temperatura indica la mayor actividad fotoquímica generadora de material particulado y sus precursores, mientras que por otra parte la mayor dilución de aerosoles en la ascendente capa de mezcla reduce la concentración en superficie. Todo ello testimonia la necesidad de utilizar la altura de la capa atmosférica como parámetro en esta línea de investigación, o incluir también parámetros meteorológicos habituales, pero en altura.

5. Conclusiones

La caracterización y monitoreo frecuentes, fiables y espacialmente completos de la contaminación del aire es una prioridad a cuyo logro están contribuyendo recientemente los nuevos sensores satelitales con indicadores, como el AOD, fácilmente obtenibles de los organismos de observación terrestre. Sin embargo, la confrontación de esa información con las medidas tradicionales en tierra evidencia no pocas divergencias, las cuales problematizan la valoración del ambiente superficial, suscitando las lógicas dudas interpretativas y aplicadas. Sin olvidar que ambos tipos de medidas son espacial y técnicamente distintos —hecho que justificaría *per se* muchas de esas discrepancias—, en este trabajo se ha realizado un esfuerzo sistemático por explorar cuantitativamente la también hipotética relación entre ambas y algunos de los factores y circunstancias que podrían mediar en la misma.

A tal fin se ha recurrido a una batería de conocidos instrumentos estadísticos bivariados e inferenciales, complementados con técnicas de visualización cartográfica, para mostrar algunas de las muchas caras del problema y los hallazgos que afloran.

En conjunto, los resultados pueden dar una primera impresión de cierta disparidad, que no debería desanimar, puesto que en buena parte son alentadores. Se resumen a continuación:

La hipótesis de la relación positiva entre los registros de PM_{10} en tierra y las medidas remotas de aerosoles (AOD) ha quedado, razonablemente apuntalada, aunque la intensidad de las correlaciones lineales no haya sido alta. Como se ha mostrado, en no pocos análisis ejecutados esa relación cuantitativa se difumina e incluso desaparece. Sin embargo, cuando se rebaja el nivel métrico de los datos (tratándolos como nominales u ordinales mediante su agrupación en intervalos), los coeficientes de asociación alcanzan niveles claramente más altos y, por otro lado, las pruebas de significación estadística (aunque los datos no cumplen el requisito de normalidad) avalarían la relación. Todo ello sugiere que la relación lineal bivariada entre ambos indicadores resulta una suposición demasiado simple para dar cuenta de la variabilidad que cada indicador contiene, y que proviene de muchos factores como los que seguidamente se comentan.

Las variables meteorológicas contempladas han mostrado claroscuros en su papel. La temperatura muestra una incidencia dispar; la humedad relativa no correlaciona con las variables básicas, AOD y PM_{10}, sin embargo, la aplicación de la corrección por humedad relativa de Li *et al.* (2005) tiende a incrementar ligeramente la correlación positiva. El viento superficial parece jugar de manera desigual según el tipo de tiempo (estación del año) o la ubicación de la estación medidora terrestre, por no mencionar que en altura los flujos son otros.

Los resultados comparativos de las relaciones según el tipo de tiempo y desagregación por días y satélites denotan también heterogeneidad. Aunque muchos de ellos no serían significativos, los valores de r más destacados ascienden hasta niveles medios o medio-bajos, son positivos y serían estadísticamente significativos.

Un fenómeno detectado frecuentemente es la existencia de datos anómalos (en AOD o PM_{10}) que degradan la relación, desembocando en r exiguos. Ello suele manifestarse como una fuerte heterocedasticidad, perceptible en los diagramas de dispersión bivariada.

El examen de los mapas ha puesto de manifiesto algunos hechos reseñables. En primer lugar, la abundancia de espacios en la región estudiada para los que faltan datos de AOD, lo cual debilita la consistencia de los análisis estadísticos entre días, satélites, estaciones, etc. En segundo lugar, en los mapas mostrados se constata que los niveles de AOD tienden a ser más elevados en la metrópoli central (y sus distritos meridionales), así como en el sur de la región; por el contrario, suelen ser más bajos en los ámbitos del N y NW (más rurales y naturales), lo que concuerda con la distribución de las actividades emisoras.

En clave de futuro resultan oportunas algunas consideraciones adicionales. En primer lugar que, dada la complejidad de la relación PM_{10}-AOD, parece recomendable, en estudios de escala regional o local, no solo incluir aquellos factores que físicamente modifican dicha relación (e. g. temperatura, humedad, precipitaciones, vientos, etc.), sino profundizar en el entendimiento de su interacción en un contexto espacial y temporal determinado.

En segundo, que en la comparación de los dos indicadores de partículas aquí examinados existe un problema nuclear: el distinto ámbito medido en cada caso, *i.e.* las unidades espaciales monitoreadas en ambos tipos de medidas, lugares - punto en las estaciones y prismas (píxeles) de tamaño grande, comparativamente hablando, son muy dispares. Parece obvio que los datos en tales estaciones estáticas serán

una muestra débilmente apta para representar un ámbito como la columna atmosférica registrada (y su amplia base espacial), por lo que cabe pensar en sesgos múltiples en tal muestra de puntos. Piénsese, como ejemplo, en estaciones situadas en corredores con circulación de viento continua o fuentes de contaminación presentes en las inmediaciones y poco representativas de la realidad del macro-entorno, etc. Quizá una mejor aproximación experimental se tendría con un muestreo en superficie más amplio, i.e. más medidas y definiendo un estimador apropiado (e.g. una media ponderada según los rasgos del terreno de cada píxel). Se cuenta ya con algún trabajo (costoso por demás) de obtención de abundantes medidas superficiales de partículas como el realizado por Pons *et al.* (2018), quienes elaboraron mapas de contaminación del aire con una resolución de escasos metros, al utilizar sensores portátiles con lecturas cada 10 segundos. Una confrontación experimental con datos de tal tipo podría conducir a un progreso importante en la determinación de las relaciones con el AOD.

Finalmente, cabe apuntar que, como respuesta a las importantes "lagunas" espaciales de datos de AOD, ha surgido el nuevo sensor TROPOMI del satélite precursor Sentinel-5P, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) dentro del Programa Copérnico. Sus productos están disponibles al usuario para descarga desde julio de 2018 e incluyen el parámetro *Aerosol Index*, sustituto del clásico AOD. Este índice se obtiene mediante el contraste de reflectancias en un par de longitudes de onda en el espectro ultravioleta, y dado que el cálculo de esta ratio es posible en presencia de nubes (Apituley *et al.*, 2018), ello puede solventar la frecuente pérdida de datos del sensor MODIS.

Financiación

Estudio realizado dentro del proyecto de investigación "*Polución del aire, poblaciones vulnerables y salud: análisis de injusticias ambientales basados en geotecnologías*" (Ref. CSO2014-55535-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España.

Referencias

Apituley, A., Pedergnana, M., Sneep, M., Veefkind, J.P., Loyola, D. y Stein, D. (2018). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI level 2 product user manual UV aerosol index*. Royal Netherlands Meteorological Institute, Ministry of Infrastructure and the Environment.

Ayuntamiento de Madrid (2012). *Memoria de calidad del aire*. Madrid: Dirección General de Sostenibilidad.

Cañada, M.R. (2017). Clasificación de tipos de tiempo y su influencia en las concentraciones de dióxido de nitrógeno, material particulado (PM_{10}) y ozono en la ciudad de Madrid, España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *75,* 447-470. https://doi.org/10.21138/bage.2508

Cañada, M.R. y Moreno, A. (2017). Análisis y modelado de episodios de intensa contaminación por PM_{10} en Madrid con Sistemas de Información Geográfica. *Memorias Universidad Del Azuay, 1*(XVI), 105-114. Recuperado de http://201.159.222.81/index.php/memorias/article/view/54

Chu, D.A., Kaufman, Y.J, Zibordi, G., Chern, J.D., Mao, J., Li, C. y Holben, B.N. (2003). Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observation System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research*, *108* (D21), 4661. https://doi.org/10.1029/2002JD003179

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2014). *Estrategia de calidad del aire y cambio climático de la Comunidad de Madrid 2013-2020. Plan Azul +*. Dirección General de Medio Ambiente y Sostenibilidad, 26-29.

Ghotbi, S., Sotoudeheian, S. y Arhami, M. (2016). Estimating urban ground-level PM_{10} using MODIS 3km AOD product and meteorological parameters from WRF model. *Atmospheric Environment*, *141*, 333-346. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.057

Gupta, P. y Christopher, S.A. (2009). Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach. *Journal of Geophysical Research*, *114*, D14205. https://doi.org/10.1029/2008JD011497

Gupta, P., Levy, R. C., Mattoo, S., Remer, L. A., y Munchak, L. A. (2016). A surface reflectance scheme for retrieving aerosol optical depth over urban surfaces in MODIS Dark Target retrieval algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, *9*, 3293-3308. https://doi.org/10.5194/amt-9-3293-2016

Harbula, J. y Kopačková, V. (2011). Air pollution detection using MODIS data. *Proceedings of SPIE*, *8181*, 1-15. https://doi.org/10.1117/12.898107

Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Pope III, C. A., Krewski, D., Newbold, K. B., …. y Thun, M. J. (2005). Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles. *Epidemiology, 16*(6), 727-736. https://doi.org/10.1097/01.ede.0000181630.15826.7d

Kaufman, Y.J. y Fraser, R.S. (1983). Light extinction by aerosols during summer air pollution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, *22*, 1694-1706. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1694:LEBADS>2.0.CO;2

Kaufman, Y.J., Tanré, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouin, R., …. y Teillet, P.M. (1997). Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research*, *102*, 16815-16830. https://doi.org/10.1029/97JD01496

Kloog, I., Koutrakis, P., Coull, B.A., Lee, H.J. y Schwartz, J. (2011). Assessing temporally and spatially resolved PM2.5 exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements. *Atmospheric Environment*, *45*, 6267-6275. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.066

Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F. y Hsu, N.C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, *6*, 2989-3034. https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013

Li, R., Ma, T., Xu, Q. y Song, X. (2018). Using MAIAC AOD to verify the $PM_{2.5}$ spatial patterns of a land use regression model. *Environmental Pollution*, *243*, 501-509. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.026

Li, C., Mao, J., Lau, A.K.H., Yuan, Z., Wang, M. y Liu, X. (2005). Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing. *Science in China, Series D Earth Sciences*, *48*(II), 209-219.

Liu, Y., Koutrakis, P. y Kahn, R. (2007). Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: Part 1— Method development. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *57*(11), 1351-1359. https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.11.1351

Ma, Z., Hu, X., Huang, L., Bi, J. y Liu, Y. (2014). Estimating ground-level PM2.5 in China using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology*, *48*, 7436-7444. https://doi.org/10.1021/es5009399

Molero, F., Salvador, P., Núñez, L., Artíñano, B. y Pujadas, M. (2001). Teledetección LIDAR de aerosoles troposféricos en la ciudad de Madrid. En J. A. Martínez y J. I. Rosell (Eds.), *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*. (pp.417-421). Recuperado de http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida92.pdf

Moreno, A., Cañada, M.R. y Méndez, D. (2018). Exploración de la contaminación del aire por partículas en Madrid mediante imágenes MODIS y datos terrestres. En M. J. López, P. Carmona, J. Salom y J. M. Albertos (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica. Perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento* (pp. 180-190). Recuperado de http://www.age-geografia.es/tig/2018_Valencia/actasXVIIICongresoTIG.pdf

Pons, J.J., Santamaría, J.M., Ariño, A., Serrano, M., Galicia, D., Elustondo, D. y Baquero, E. (2018). Cartografía de la contaminación a través de sensores portátiles. El mapa de la calidad del aire urbano de Pamplona. En M.G. López, P. Carmona, J. Salom y J.M. Albertos (Eds), *Tecnologías de la Información Geográfica: Perspectivas multidisciplinares en la sociedad del* conocimiento (pp. 414-423). Recuperado de http://www.age-geografia.es/tig/2018_Valencia/actasXVIIICongresoTIG.pdf

Prieto-Flores, M.E., Moreno, A., Gómez-Barroso, D., Cañada, R. y Martínez, P. (2017). Contaminación del aire, mortalidad cardiovascular y grupos vulnerables en Madrid: un estudio exploratorio desde la perspectiva de la justicia ambiental. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, 21*(559). https://doi.org/10.1344/sn2017.21.18008

Remer, L., Kaufman, Y., Tanré, D., Mattoo, S., Li, R.R., Martins, J.V., …. y Koren, I. (2006). *Collection 005 change summary for MODIS aerosol (04_L2) algorithms*. Retrieved from https://modis-images.gsfc.nasa.gov/C005_Changes/C005_Aerosol_5.2.pdf

Royé, D., Zarrabeitia, M.T., Riancho, J. y Santurtún, A. (2019). A time series analysis of the relationship between apparent temperature, air pollutants and ischemic stroke in Madrid, Spain. *Environmental Research*, *173*, 349-358. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.065

Shi, Y., Ho, H.C., Xu, Y. y Ng, E. (2018). Improving satellite aerosol optical depth-$PM_{2.5}$ correlations using land use regression with microscale geographic predictors in a high-density urban context. *Atmospheric Environment*, *190*, 23-34. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.021

Tsai, T.C., Jeng, Y.J., Chu, D.A., Chen, J.P. y Chang, S.C. (2011). Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical depth and particulate matter from 2006 to 2008. *Atmospheric Environment*, *45*, 4777-4788. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.006

Viana, M., Pérez, C., Querol, X., Alastuey, A., Nickovic, S. y Baldasano, J.M. (2005). Spatial and temporal variability of PM levels and composition in a complex summer atmospheric scenario in Barcelona (NE Spain). *Atmospheric Environment, 39*, 5343-5361. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.039

Wang, J. y Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite derived aerosol optical thickness and $PM_{2.5}$ mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, *30*(21), 2095. https://doi.org/10.1029/2003GL018174

World Health Organization (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project*. Copenhagen: WHO, Regional Office for Europe.