

Análisis y modelado de episodios de intensa contaminación por PM₁₀ en Madrid con Sistemas de Información Geográfica

Cañada Torrecilla, María Rosa¹, Moreno Jiménez, Antonio¹

¹ Departamento de Geografía/Facultad de Filosofía y Letras/Universidad Autónoma de Madrid
Francisco Tomás y Valiente, 1.
28049 Madrid (España)
rosa.canada@uam.es, antonio.moreno@uam.es

RESUMEN

La conjunción de técnicas estadísticas y SIG está facilitando clarificar la relación entre la atmósfera urbana y la polución del aire y en esta investigación, profundizando en trabajos previos, se abordan dos objetivos principales: primero, determinar y caracterizar los tipos de tiempo asociados a concentraciones altas y severas de PM₁₀ en Madrid y, segundo, tras elegir un episodio de severa contaminación, estimar y visualizar su distribución intraurbana diaria durante el periodo que dura.

La información (diaria) utilizada ha sido la concentración media de PM₁₀ y datos de diferentes variables meteorológicas para caracterizar los tipos de tiempo, considerando un período sexenal desde 2010 a 2015.

La metodología ha consistido en la aplicación de técnicas estadísticas para definir qué es contaminación elevada y extrema, y de técnicas de interpolación espacial para modelar la concentración de PM₁₀ en la ciudad de Madrid.

Los resultados evidencian, por un lado, que los episodios de alta contaminación abundan más en verano, donde la principal fuente de emisión de partículas es el polvo sahariano, y en invierno, donde lo son los procesos de combustión, favorecidos por la baja capacidad de dispersión de la atmósfera en esta época. Por otro lado, los mapas interpolados para el período crítico estival examinado han posibilitado identificar y visualizar los niveles de polución por PM₁₀ que se soportan en las distintas zonas de la ciudad. Todo ello abre vías para políticas preventivas mejor fundadas, discriminando incluso zonas dentro de la ciudad, y para análisis de salud pública y de justicia ambiental.

Palabras clave: **Contaminación urbana, PM₁₀, tipo de tiempo, interpolación espacial, Madrid.**

ABSTRACT

Joint use of statistics and GIS are considerably aiding to elucidate the relations between urban atmosphere and air pollution. In this paper, deepening in previous works, two main objectives are addressed: First, to outline and characterize the weather types associated to high and severe PM₁₀ concentrations in Madrid, and second, focusing on one severe pollution episode, to estimate and visualize the daily intra urban distribution of a pollutant along the period.

The information used includes the daily medium average of PM₁₀ as well as some other meteorological variables, in order to better characterize the weather types, considering a sexennial period from 2010 to 2015.

Methodologically, various statistical techniques have been applied for a precise definition of High and Extreme pollution levels, and spatial interpolation has been used to estimate surface models of PM₁₀ concentrations in the city of Madrid.

Results show, on the one hand, that episodes of high pollution occur more commonly in summer, when the main source of particle's emission is the Saharan dust. It also happens in winter, due to combustion processes increased by the low capacity of dispersion in the atmosphere in this season. Interpolated maps for the critical summer period examined have allowed to identify and to visualize the PM₁₀ pollution levels affecting different areas of the city. These findings encourage better founded policies and prevention, even discriminating different areas within the city; as well as more refined analysis on public health and environmental justice issues.

Keywords: *Urban pollution, PM₁₀, weather types, spatial interpolation, Madrid.*

I. INTRODUCCIÓN

Las partículas son uno de los contaminantes más peligrosos para la salud en las grandes ciudades como Madrid. Este contaminante es uno de los indicadores más utilizados en los informes sobre calidad y salud de la OMS, en los de la Agencia Europea de Medio ambiente (AEMA), en el Programa APHEIS (Contaminación atmosférica y Salud: un Sistema de Información Europeo (Alonso et al., 2005) y, en general, en todos los informes que se elaboran sobre calidad del aire.

Las partículas en suspensión abarcan un amplio espectro de sustancias orgánicas e inorgánicas, dispersas en el aire, procedentes de fuentes naturales y artificiales (Gurjar et al., 2010). La combustión de carburantes fósiles generada por el tráfico (la principal fuente de contaminación por partículas en la ciudad de Madrid) puede producir diversos tipos de partículas: partículas grandes, por la liberación de materiales no quemados (cenizas volátiles), partículas finas, formadas por condensación de materiales vaporizados durante la combustión, y partículas secundarias, generadas mediante reacciones químicas entre los contaminantes desprendidos como gases en la atmósfera. Tampoco hay que olvidar las procedentes por la resuspensión de materiales procedentes del firme de la calzada, como consecuencia de la abrasión mecánica de vehículos, frenos, ruedas, etc. y las derivadas de obras de construcción, demolición, etc. A ello hay que añadir el polvo mineral procedente del Sahara que con frecuencia alcanza el centro de la Península Ibérica (Salvador et al. 2004, 2008) e incluso llega hasta Atenas (Grigoropoulos et al., 2009; Remoundaki et al., 2011).

En relación con sus efectos sobre la salud se suelen distinguir las PM₁₀ (partículas "torácicas" menores de 10 micras (μm), que pueden penetrar hasta las vías respiratorias bajas), las PM_{2.5} (partículas "respirables" menores de 2,5 μm, que pueden penetrar hasta las zonas de intercambio de gases del pulmón), y las partículas ultrafinas, menores de 100 nm (nanómetros), que pueden llegar a pasar al torrente sanguíneo. Los estudios toxicológicos indican que las partículas finas de origen antrópico, especialmente las generadas por la combustión de carburantes fósiles, provocan mayores daños sobre la salud que las partículas de origen geológico, como el polvo sahariano, al que a veces se suele imputar la contaminación.

Numerosos estudios epidemiológicos afirman que existe una relación entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud, tales como afecciones respiratorias y cardiovasculares. Su influencia

sobre el clima se recoge también en algunos estudios que tratan de evaluar la influencia de las partículas sobre el balance radiativo, formación de nubes y albedo. Finalmente, los ecosistemas también sufren los efectos de la exposición a las partículas atmosféricas ya que su deposición puede suponer la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales y repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas (Querol et al., 2006).

Su inmisión depende de la dinámica atmosférica, que influye en su dispersión, estancamiento o en su transporte, como se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios sobre Barcelona, el Mediterráneo Occidental (Viana et al., 2005; Querol et al., 2003; Rodríguez et al., 2002) o sobre Madrid (Cañada, 2017).

Esta comunicación se sitúa en esta línea de estudio y arranca de un trabajo previo donde se elaboró una tipología de tipos de tiempo en la ciudad de Madrid y una caracterización de los mismos según la concentración de contaminantes asociada (Cañada, 2017). Ahora se pretende avanzar un paso más, estableciendo primero los periodos de intensa y extrema contaminación por partículas (PM₁₀) en la ciudad de Madrid durante el sexenio 2010-2015 y su relación con el tipo de tiempo dominante durante los mismos, lo que permitirá identificar los escenarios atmosféricos singularmente críticos. Seguidamente, y tras elegir uno de esos periodos, se procederá a modelar el comportamiento espacial del contaminante en la ciudad, con el fin de hacer visible cartográfica y diacrónicamente el decurso de la concentración de PM₁₀ a lo largo de la secuencia de días que duró el episodio. En síntesis, se espera profundizar en el conocimiento del nexo entre tipos de tiempo y alta polución del aire y desvelar las condiciones ambientales vividas por la población en las distintas zonas de la ciudad.

En el apartado siguiente se presentan brevemente los aspectos metodológicos, para luego extendernos en el análisis de resultados, particularmente la frecuencia de días de alta y severa contaminación en cada tipo de tiempo y el estudio espacio-temporal de un episodio ejemplar en 2012, breve pero de intensa concentración de PM₁₀. Se terminará con unas breves conclusiones y perspectivas.

II. DATOS Y MÉTODOS

La tipología de tipos de tiempo se ha establecido con información meteorológica diaria de superficie y de altura de la estación sinóptica de Madrid (Barajas) (vid. Cañada, 2017), aunque para averiguar las causas meteorológicas del periodo de intensa contaminación por PM₁₀ seleccionado se ha recurrido

además a información de las estaciones sinópticas de Cuatro Vientos y Getafe de esos mismos días. Las variables meteorológicas empleadas han sido de superficie: la presión, temperatura máxima y mínima, dirección y velocidad del viento, humedad relativa y cubierta nubosa. Los datos de altura corresponden a la superficie de 850 hPa y han sido: altura a que se encuentran los 850 hPa, temperatura a esa altura, temperatura del punto de rocío y dirección y velocidad del viento. El indicador utilizado para el estudio de episodios de elevada concentración de PM_{10} por m^3 es la media diaria. Al ser reducido el número de estaciones del Ayuntamiento de Madrid que miden partículas (sólo doce), para el modelado de la distribución espacial de la contaminación por PM_{10} en el periodo anómalo seleccionado (entre el 26 y el 29 de junio de 2012), se ha recurrido además a datos de seis estaciones de municipios limítrofes a Madrid, pertenecientes a la red de calidad del aire de la Comunidad de Madrid (figura 1).

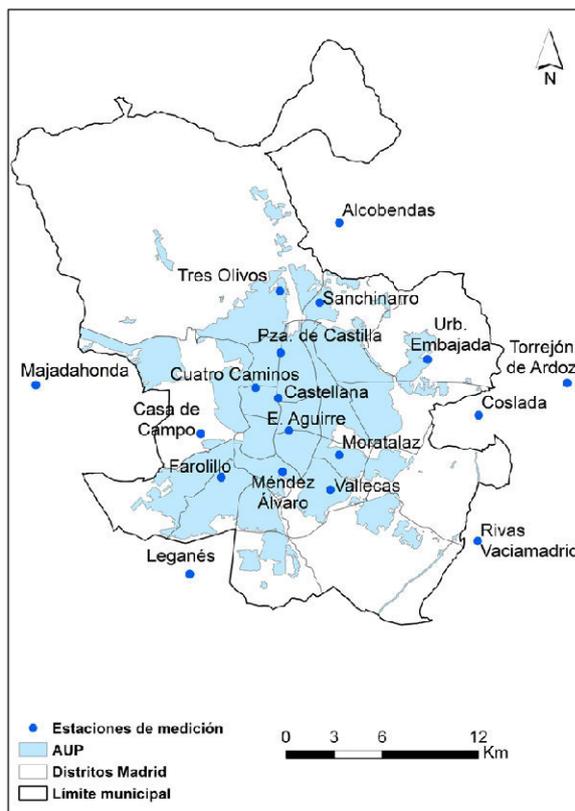


Figura 1. Ubicación de las estaciones de medida de contaminación por PM_{10} en Madrid y área limítrofe
Fuente: Elaboración propia

El foco de interés recae en el área urbana poblada (AUP 2015), esto es, la zona donde hay presencia habitual de residentes y que excluye las grandes áreas de uso industrial y de transporte. Su delimitación se realizó a partir del manejo y contraste de información de más de 30 capas cartográficas diferentes procedentes de diversas fuentes (IGN, Ayuntamiento de Madrid, IECM, etc.). Destaca, sobre todo, la labor de interpretación de imágenes aéreas (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del Instituto Geográfico Nacional) y de cartografía de usos del suelo (Corine Land Cover, CLC2006).

Como cartografía digital básica se ha usado la del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (IECM), vigente en 2015, para los distritos municipales y término municipal.

El método para el estudio de los episodios de contaminación por PM_{10} , habitualmente empleado en trabajos de semejantes características, se basa en establecer una diferenciación entre días con contaminación elevada y días con contaminación severa en el periodo que se extiende desde el 1 de enero de 2010 al 31 de diciembre de 2015. Se considera día con alta contaminación aquel en el que la concentración diaria del contaminante está entre 2 y 3 puntuaciones Z sobre el promedio diario de todo el periodo. Si el valor diario es igual o superior a 3 Z el día se considera con contaminación severa (Kalstein y Corrigan, 1986; Kassomenos et al., 2003). El recuento de estos días se ha realizado para cada tipo de tiempo establecido en un trabajo de investigación previo en vías de publicación (Cañada, 2017).

Para realizar una cartografía diacrónica del episodio de elevada contaminación por PM_{10} (26-29 junio de 2012) se ha recurrido a técnicas de interpolación espacial implementadas en la extensión Geostatistical Analyst de ArcGIS 10.2. Las capas resultantes se exportarán a raster con una resolución de 50 m. Por último, se recortarán para ajustarlas a los límites de la zona urbana poblada (AUP 2015), mediante una operación de álgebra de mapas. En el análisis se abordará la secuencia desde un día previo a uno posterior al periodo de alta intensidad de contaminación, para caracterizar su dinámica espacio-temporal en una perspectiva diacrónica.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III.1. FRECUENCIA DE LOS EPISODIOS DE ALTA CONTAMINACIÓN Y CONTAMINACIÓN SEVERA POR PM_{10} EN MADRID ENTRE 2010-2015

III.1.1. Episodios de alta contaminación por PM_{10}

Entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2015 se han contabilizado para toda la red un promedio de 45 días con alta polución de PM_{10} , es decir, con valores diarios entre 2 y 3 desviaciones típicas respecto de la media de todo el periodo (Kalstein y Corrigan, 1986; Kassomenos et al., 2003). El examen de la tabla I indica que estos episodios van asociados a tipos de tiempo diferentes (excepto el 1 y 4) y que se pueden desencadenar en varios momentos del año, si bien, hay dos tipos que destacan sobre el resto: el 9 y en menor medida el 6. Corresponden a dos estaciones del año donde la inmisión de partículas es importante, el verano, donde la principal fuente de partículas es el polvo sahariano, y el invierno donde lo son los procesos de combustión, favorecidos por la baja capacidad de dispersión de la atmósfera en esta época (Artiñano et al., 2003). El tipo 9, anticiclónico de verano, es el que presenta la máxima frecuencia, alcanzando una media de 22 días (tabla I). La configuración isobárica que desencadena este tipo de tiempo es una cresta sahariana centrada sobre la Península Ibérica, con su eje en torno a los 5° oeste (Martín Vide y Olcina Cantos, 2001) con un predominio de las altas presiones en altura y bajas presiones térmicas en superficie. Bajo estas condiciones meteorológicas se dificulta la dispersión de contaminantes. A nuestra región llegan masas de aire muy cálidas y secas, procedentes del norte de África que desencadenan polvo en suspensión y calima. Las temperaturas máximas son muy elevadas, alcanzan 32,3 °C de media, aunque las máximas diarias pueden llegar a 40 °C, y las mínimas llegan a 16 °C de media. Se acompañan de vientos del suroeste, tanto en superficie como en altura, velocidades entre 2,8 y 2,73 m/s (brisas suaves según Beaufort), valores exiguos de humedad relativa (22,4%) y mínima cubierta nubosa (2 octas), luego alto valor de insolación. La altura media a la que se alcanza los

850 hPa es de 1546,3 metros, donde la temperatura llega a de 17 °C (Cañada, 2017).

TABLA I
DÍAS DE ALTA CONTAMINACIÓN DE PM₁₀ POR TIPO DE TIEMPO Y ESTACIONES. MADRID, 2010-2015

| ESTACIÓN | T. 2 | T. 3 | T. 5 | T. 6 | T. 7 | T. 8 | T. 9 | TOTAL |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| C. Campo | 3 | 3 | | 5 | 2 | 3 | 21 | 37 |
| C. aminos | 3 | 1 | 1 | 14 | 9 | 1 | 18 | 47 |
| E. Aguirre | 3 | 2 | 1 | 9 | 11 | 3 | 34 | 63 |
| Farolillo | 4 | 3 | 1 | 12 | 6 | 3 | 24 | 53 |
| M. Alvaro | 4 | 2 | 2 | 17 | 12 | 2 | 21 | 60 |
| Moratalaz | 4 | | 2 | 6 | 3 | 3 | 18 | 36 |
| Castellana | 3 | 1 | 2 | 9 | 1 | 5 | 19 | 40 |
| P. Castilla | 4 | | 2 | 16 | 4 | 5 | 16 | 47 |
| Sanchinarro | 3 | 1 | 2 | | 2 | 4 | 23 | 35 |
| Tres Olivos | 4 | 2 | 2 | 6 | 4 | 3 | 23 | 44 |
| U. Embajada | 4 | 2 | 2 | 2 | | 3 | 20 | 33 |
| Vallecas | 5 | 4 | 2 | 6 | 1 | 4 | 23 | 45 |
| Media | 4 | 2 | 2 | 9 | 5 | 3 | 22 | 45 |

Fuente: Elaboración propia

Con una frecuencia media de 9 días le sigue el tipo de tiempo 6, anticiclónico de invierno (tabla I). La situación sinóptica de este tipo de tiempo dibuja un centro de altas presiones muy potente sobre el interior de la Península Ibérica que se corresponde con una dorsal en altura. La masa de aire, en origen tropical marítima, experimenta un enfriamiento paulatino en el interior de la Península hasta transformarse en una masa de aire fría y seca. Es un tipo de tiempo con amplias oscilaciones diurnas de temperatura y frecuentes heladas. Presenta las temperaturas mínimas más bajas de todos los tipos de tiempo, la mínima promedio es -0,41°C, debido al enfriamiento del aire en contacto con la superficie fría, por la fuerte irradiación nocturna, favorecida por cielos despejados; temperaturas más altas a 850 hPa (6,3°C de media), siendo, por tanto, frecuentes las inversiones térmicas; ellas impiden los movimientos ascendentes del aire y favorecen el estancamiento de los contaminantes. La temperatura media a 850 hPa es 6,3°C. Los vientos son del suroeste en superficie (0,83 m/s) y del noroeste en altura (1,21 m/s). Su máxima frecuencia se da en los meses de diciembre, enero y febrero. Este tipo de tiempo suele ser muy persistente y durar varios días seguidos (Cañada, 2017).

Los tipos de tiempo 7, 2 y 8, con frecuencias de 5, 4 y 3 días respectivamente (tabla I), corresponden a situaciones anticiclónicas, con características meteorológicas intermedias entre las dos anteriores. El tipo 7 presenta una configuración isobárica semejante al 6, pero con masas de aire más cálidas. La temperatura máxima alcanza un promedio de 23,3°C y la mínima 7,1°C. Vientos del sureste tanto en superficie, como en las capas altas de la atmósfera (0,95 m/s y 0,97 m/s respectivamente). Aire muy seco y escasas nubes (1,8 octas). Es más habitual en los meses de primavera (abril) y otoño (octubre). El tipo 2 agrupa los días con masas de aire polares marítimas que llegan a latitudes muy bajas a través de una gran vaguada atlántica, donde se calientan y envían a la Península vientos húmedos de componente suroeste en superficie (2,65 m/s) y de mayor velocidad (6,36 m/s) en las capas altas de la atmósfera. Sobre el interior de la Meseta hay altas presiones con temperaturas de 13,6°C (máximas medias) y 5,2°C (mínimas medias), un contenido en humedad del 68% y una cubierta nubosa de 7 octas. Este tipo de tiempo predomina principalmente en los meses de enero y diciembre, aunque noviembre también tiene alta frecuencia. El tipo 8 es un tipo de tiempo

con promedios de temperatura máxima de 23,8°C y mínima de 12,5°C, consecuencia de masas de aire tropicales marítimas que llegan a la región con procedencia suroeste a partir de una vaguada atlántica que se corresponde en superficie con una baja presión. La Meseta queda en una situación de altas presiones o de bajas presiones relativas. Los vientos del suroeste soplan desde brisa breve en superficie (4,73 m/s) a brisa moderada a 850 hPa (5,97 m/s). La humedad llega al 42% y la cubierta nubosa es de 5,4 octas. Este tipo de tiempo es representativo de los meses de octubre y septiembre, por un lado, y de abril y mayo por otro (Cañada, 2017).

Los tipos de tiempo 1 y 4 no registran ningún episodio de alta contaminación por PM₁₀ y no se han incluido en la tabla I ni en la figura 2. En el primer caso es un tipo tiempo anticiclónico con presiones no muy elevadas, con brisa leve del suroeste en superficie (5,29 m/s) y brisa moderada a 850 hPa (7,98 m/s) (según la escala Beaufort) y el segundo, es un tipo de tiempo inestable con una masa de aire polar continental procedente del interior de Europa, que llega a nuestra región a través de una vaguada con un eje NE-SW, canalizada por una borrasca ubicada en el mar Ligur. Los vientos son de componente NW en superficie (5,6 m/s) y del NE en altura (7,1 m/s) (brisa moderada en la escala de Beaufort).

El reparto espacial de los días de alta contaminación por partículas (tabla I, figura 2) nos indica que las estaciones que muestran las máximas frecuencias son las de tráfico y de fondo urbano. Las de Escuelas Aguirre y Méndez Álvaro registran 63 y 60 días respectivamente, en todo el período. Seis estaciones presentan entre 40 y 60 días. Por encima de 30 y por debajo de 40 días hay cuatro estaciones, donde además de la estación suburbana de Casa de Campo y de las estaciones urbanas de fondo de Sanchinarro y Urbanización Embajada, hay que mencionar a Moratalaz que es de tráfico. Esta distribución espacial que presentan las partículas en la ciudad se explica por la doble influencia en su formación del polvo arrastrado por el viento y de las emisiones de vehículos y otros medios de combustión (Fernández, 2005).

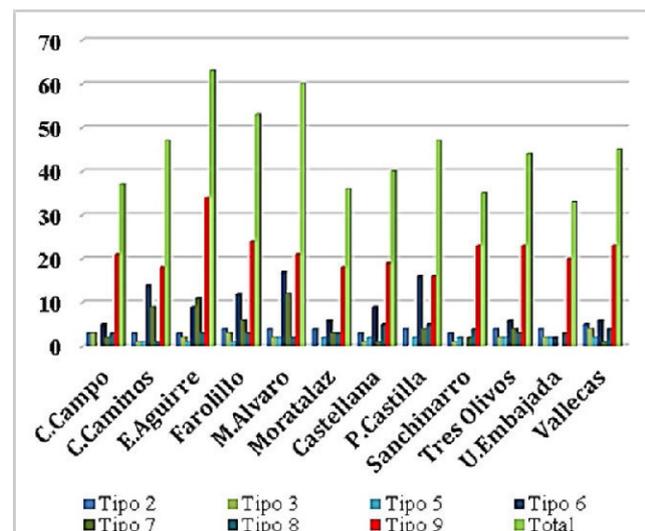


Figura 2. Número de días con alta contaminación de PM₁₀ por tipo de tiempo y estaciones. Madrid, 2010-2015

Fuente: Elaboración propia

III.1.2. Episodios de contaminación severa por PM₁₀

Se considera día con contaminación severa aquel cuyo valor diario es igual o superior a 3 puntuaciones Z (Kalstein y Corrián, 1986; Kassomenos et al., 2003). El promedio de toda la red

asciende a 26 días en todo el periodo (tabla II). El tipo de tiempo de verano (9) es el que presenta la máxima frecuencia de estos episodios de contaminación severa, de manera bastante destacada sobre el resto. Se han contabilizado 18 días de media. Las masas de aire procedentes del norte de África son las responsables de que se alcancen elevados niveles de inmisión. Le siguen, a bastante distancia, el resto de tipos de tiempo en donde puede aparecer, de manera ocasional, algún día de severa contaminación. Como sucedía con los días de alta contaminación, los tipos de tiempo 1 y 4, tampoco presentan ningún día de contaminación severa y no se han incluido en la tabla II ni en la figura 3. Todas las estaciones de medición presentan valores por encima de 20 días de contaminación severa. El examen de la tabla II y de la figura 3 no permite establecer diferencias claras entre estaciones teniendo en cuenta su ubicación, es decir, si son de tráfico, de fondo urbano o suburbanas. Las que registran la máxima frecuencia son Moratalaz (33 días) y Sanchinarro (32 días) y la que menos Farolillo (20 días).

TABLA II.
DÍAS DE CONTAMINACIÓN SEVERA DE PM₁₀ POR TIPO DE TIEMPO Y ESTACIONES. MADRID, 2010-2015

| ESTACIÓN | T. 2 | T. 3 | T. 5 | T. 6 | T. 7 | T. 8 | T. 9 | TOTAL |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Casa Campo | 3 | 2 | 3 | | | | 19 | 27 |
| C. Caminos | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 14 | 25 |
| E. Aguirre | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | | 12 | 22 |
| Farolillo | 2 | 1 | 2 | 4 | | | 11 | 20 |
| M. Álvaro | 3 | 1 | 1 | 3 | | | 13 | 21 |
| Moratalaz | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | | 22 | 33 |
| Castellana | | 3 | 1 | 1 | 1 | | 17 | 23 |
| P. Castilla | 2 | 4 | | 4 | 1 | 1 | 15 | 27 |
| Sanchinarro | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | | 24 | 32 |
| Tres Olivos | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | | 20 | 29 |
| U.Embajada | 2 | 3 | 1 | | | | 23 | 29 |
| Vallecas | 2 | 2 | 2 | | 2 | | 20 | 28 |
| Media | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 18 | 26 |

Fuente: Elaboración propia

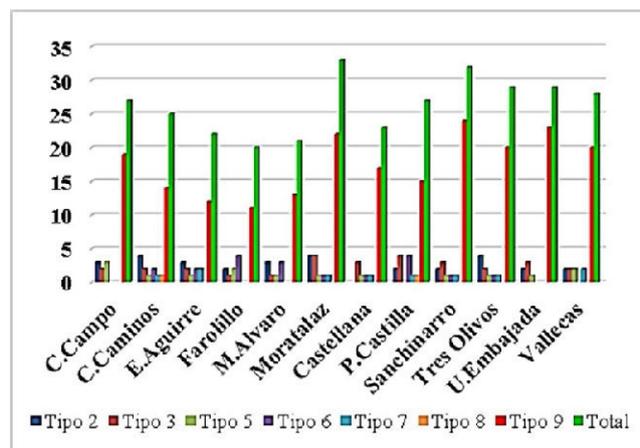


Figura 3. Número de días con contaminación severa de PM₁₀ por tipo de tiempo y estaciones. Madrid, 2010-2015
Fuente: Elaboración propia

III.2. ANÁLISIS DEL EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM₁₀ DEL 26 AL 29 DE JUNIO DE 2012

III.2.1. Caracterización sinóptica y variables meteorológicas

Entre los días 26 y 29 de junio de 2012 se produce una invasión de aire sahariano que alcanza nuestra zona de estudio y queda reflejada en los datos registrados en todas las esta-

ciones de Madrid, que duplican y casi triplican el valor diario permitido por la legislación, fijado en 50 µg/m³, como se puede apreciar en la figura 4. No todos los días se pueden clasificar de la misma manera. Así, los días 25 y 30 de junio estarían fuera de lo que se ha denominado episodio de alta contaminación; el día 26 si sería un día de elevada contaminación y el resto de días (27, 28 y 29 de junio) serían días de contaminación severa, pues sus valores superan 3 desviaciones típicas respecto a la media del periodo (2010-2015). Todo el episodio se enmarca dentro del tipo de tiempo 9, anticiclónico característico de la estación estival, y ligado a la influencia de masas de aire tropical marítimo y tropical continental.

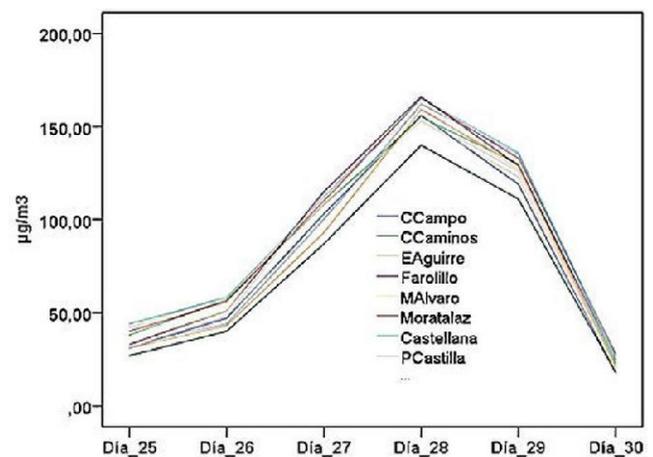


Figura 4. Evolución de la concentración de PM₁₀ en las estaciones de la red de calidad del aire de Madrid, durante el episodio del 26 al 29 de junio de 2012

Fuente: Elaboración propia

Este episodio de alta contaminación va precedido de una ola de calor que se inicia días antes de la irrupción de la masa de aire africana. El día 25, como se puede apreciar en la tabla III, se superan los 38°C de máxima en las tres estaciones sinópticas de Madrid (Barajas, Cuatro Vientos y Getafe) y se alcanzan casi los 40°C al día siguiente, permaneciendo el resto de los días entre 37 y 39°C. Las temperaturas mínimas superan los 20°C todos los días (noches tropicales) excepto el día 30, cuando se aproxima una masa de aire más fresca procedente del Atlántico. El viento de componente sur, que es el que arrastra el polvo en suspensión, no empieza a llegar hasta el 26 y continúa durante los días 27, 28 y 29 con dirección SSW, aunque la máxima concentración de partículas se produce el día 28, cuando las temperaturas ya no son tan elevadas como la de los dos días precedentes.

La situación sinóptica está caracterizada por bajas presiones relativas en superficie ligadas al calentamiento del aire superficial y por una cresta anticiclónica a 850 hPa, que favorece la advección de masas de aire cálido y seco hacia la Península durante los días 26 al 29 (véase figura 5). Existe una subsidencia generalizada que propicia el calentamiento adiabático adicional y valores elevados de radiación solar. En la secuencia de mapas de la figura 5 se aprecia que el día 25 una lengua de aire cálido alcanza el suroeste de la Península Ibérica donde la temperatura a 1560 m, es de 25°C. De manera progresiva se va extendiendo hacia el interior y hacia el norte los días 26 y 27. El 28 se desplaza hacia el sureste de la Península y poco a poco se sitúa en el Mediterráneo al oeste de las Islas Baleares, dejando paso, el día 30, a otra masa de aire más fresca de procedencia atlántica, que produce una bajada de las temperaturas, tanto diurnas como nocturnas (véase tabla III y figura 5). La Agencia Espacial de Meteorología (AEMET, 2012) señala el

mes de junio de 2012 como el mes más cálido desde 1960, por detrás de 2003, 2004 y 2005. Las temperaturas mensuales superaron en más de 3°C el valor medio normal en la mayor parte de las zonas incluidas en la mitad suroriental peninsular.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DE LOS DÍAS 25 AL 30 DE JUNIO DE 2012 EN OBSERVATORIOS DE MADRID

| DÍAS | ESTACIÓN | T. MÁX. | T. MÍN. | HR % | DIRECCIÓN VIENTO | VELOCIDAD KM/H |
|------|----------------|---------|---------|------|------------------|----------------|
| 25 | Barajas | 38,5 | 21,8 | 22,5 | N | 10 |
| | Cuatro Vientos | 38 | 22,8 | 30,6 | NNE | 1,9 |
| | Getafe | 38,2 | 23,4 | 32,6 | NNE | 6,3 |
| 26 | Barajas | 39,9 | 22,3 | 21,9 | N | 8,3 |
| | Cuatro Vientos | 39,8 | 24,4 | 27,6 | S | 8,6 |
| | Getafe | 39,6 | 23,6 | 32 | S | 6,3 |
| 27 | Barajas | 37,9 | 22,2 | 20,1 | SSW | 11,5 |
| | Cuatro Vientos | 38,2 | 25 | 26,6 | SW | 11,7 |
| | Getafe | 39,2 | 25,4 | 31,2 | SSW | 11,5 |
| 28 | Barajas | 37,2 | 23,2 | 19,8 | SW | 20,3 |
| | Cuatro Vientos | 37,2 | 23,9 | 27 | SW | 21 |
| | Getafe | 38 | 23,8 | 34 | SW | 27,1 |
| 29 | Barajas | 34 | 20,9 | 24,1 | SW | 20,3 |
| | Cuatro Vientos | 33,5 | 20 | 33,3 | SW | 20,4 |
| | Getafe | 34,4 | 20,4 | 39,8 | WSW | 21,8 |
| 30 | Barajas | 29,2 | 18 | 27,2 | SW | 17,8 |
| | Cuatro Vientos | 28,2 | 16 | 34,3 | WSW | 19,1 |
| | Getafe | 29 | 16,8 | 42,4 | W | 19,3 |

Fuente: Elaboración propia

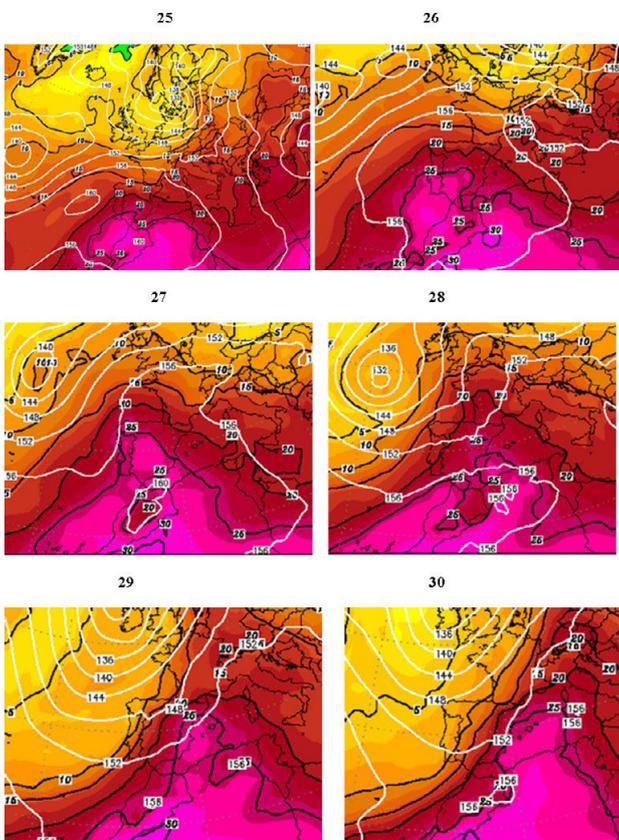


Figura 5. Altura geopotencial (Dm) y temperatura (°C) a 850 hPa durante los días 25-30 de junio de 2012
Fuente: www.wetterzentrale.de

III.2.2. Modelado de la distribución espacial de PM₁₀ durante el episodio del 26 al 30 de junio del 2012

Para disponer de datos de contaminación en todo el espacio urbano se ha interpolado con el método media ponderada por el inverso de la distancia (IDW, inverse distance weighting). Se descartó el método Kriging porque producía excesivo suavizado, aumentando la distancia media entre valores medios observados y estimados. Detalles del proceso de cálculo se pueden consultar en Cañada et al. (2014)

Los parámetros utilizados en la interpolación han variado según los días. Los únicos que han permanecido constantes son, el número de vecinos, que ha variado entre un máximo de 5 y un mínimo de 2, y el número de sectores en que se ha dividido la elipse, que han sido cuatro de 45°. Al considerar que existe influencia direccional en los datos, la forma de búsqueda de vecindad ha sido una elipse, cuyos ejes mayor y menor también varían según los días. El eje mayor ha oscilado entre 9500 m y 8000 m; el eje menor entre 8000 m y 4000 m. Igualmente ha variado el ángulo hacia donde apunta el eje mayor de la elipse, que oscila entre 36° y 40°, aunque para el día 30 se ha utilizado 325° porque resultaba más ajustado a la realidad geográfica que cualquier otra opción (Tabla IV).

La bondad de ajuste permite constatar que a medida que los valores de contaminación aumentan también lo hace el error cuadrático medio (root mean square) y la media de los errores. El día 28 de junio se alcanzan valores de PM₁₀ superiores a 150 µg/m³ en todas las estaciones, dando como resultado un RMS muy elevado si lo comparamos con el obtenido para el día 30 donde la contaminación es inferior a 30µg/m³ (tabla IV).

TABLA IV
PARÁMETROS UTILIZADOS Y BONDAD DE AJUSTE DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN IDW

| MODELO | PARÁMETROS | PERIODO 26-30 DE JUNIO DE 2012 | | | | |
|------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | DÍA 26 | DÍA 27 | DÍA 28 | DÍA 29 | DÍA 30 |
| IDW anisotrópico | Nº vecinos | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 |
| | Valor p | 2,4 | 1,9 | 1,8 | 1,5 | 2 |
| | Vecindad de búsqueda | Elipse 4 partes, 45°, 8000/7500 | Elipse 4 partes, 45°, 8000/4000 | Elipse 4 partes, 45°, 9000/4500 | Elipse 4 partes, 45°, 9500/4000 | Elipse 4 partes, 45°, 9000/8000 |
| | Ángulo | 37 | 36 | 36 | 40 | 325 |
| | Bondad de ajuste | Media errores (mean error) | 3,26 | 4,44 | 7,06 | 5,48 |
| | Error cuadrático medio (RMS) | 6,77 | 14,06 | 24,26 | 20,09 | 4,43 |

Fuente: Elaboración propia

Si cotejamos los estadísticos descriptivos de los datos observados de contaminación con los estimados por el modelo de interpolación se percibe que el ajuste es muy bueno (tabla V). Los valores máximos coinciden plenamente, si bien en los mínimos se produce una cierta diferencia que se explica porque al recortar la capa interpolada por la AUP, las estaciones limítrofes al municipio de Madrid, que registran cifras más bajas, son excluidas. Este hecho también se refleja en unos mayores valores medios, sin embargo, la desviación típica es menor.

TABLA V
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE PM₁₀ DE DATOS OBSERVADOS Y ESTIMADOS

| DÍAS | VALORES | MÁX. | MÍN. | MEDÍA | DES. TÍPICA |
|------|---------|--------|--------|--------|-------------|
| 26 | Obs. | 59 | 27 | 46 | 8,85 |
| | Estima. | 58,99 | 35,52 | 49,47 | 4,5 |
| 27 | Obs. | 115 | 66 | 96,29 | 16,21 |
| | Estima. | 114,99 | 74 | 102,62 | 7,55 |
| 28 | Obs. | 166 | 88 | 142,94 | 25,19 |
| | Estima. | 165,99 | 109,52 | 152,56 | 9,2 |
| 29 | Obs. | 136 | 64 | 111,67 | 23,12 |
| | Estima. | 135,99 | 83,61 | 121,08 | 9,55 |
| 30 | Obs. | 28 | 15 | 21,67 | 3,68 |
| | Estima. | 27,99 | 17,01 | 22,44 | 1,69 |

Fuente: Elaboración propia

III.2.3. Análisis del patrón espacial de PM₁₀ durante los días 26 a 30 de junio de 2012

Como resultado del modelado de la concentración media diaria de PM₁₀ se han obtenido cinco mapas en los cuales la distribución espacial del contaminante varía de un día a otro en función de cómo ha ido aumentando la concentración de partículas a la atmósfera, lo que ha motivado que la construcción de los intervalos se haya realizado con una amplitud diferente según los días.

El mapa del día 26 de junio muestra un patrón espacial con una clara diferenciación entre una zona con colores verdes, donde la inmisión de PM₁₀ es inferior a 50 µg/m³ y otra zona con colores rosáceos donde se supera ese valor límite de protección a la salud humana fijado por la legislación europea y española (figura 6). La superficie de ésta última representa el 47,2% de la AUP, donde se puede establecer una distinción entre una zona central, en torno a los distritos de Tetúan, Chamberí, Salamanca y Centro, con valores que fluctúan entre 55 µg/m³ y 58,99 µg/m³ y una corona en torno a este sector central que se prolongan por el sureste (Moratalaz) y por el sur-suroeste (Arganzuela, Usera y Carabanchel), con cifras entre 50 y 55 µg/m³. La superficie por debajo de 50 µg/m³ alcanza el 52,8% y se extiende por las zonas periféricas de la AUP, principalmente por Fuencarral-El Pardo al norte, por Hortaleza y Barajas al nordeste, Villaverde y Vallecas al sur-sureste y Aravaca-Moncloa al oeste. Este día comienza la llegada de la masa de aire sahariano con viento de componente sur que arrastra partículas de polvo hasta la región, a las que hay que sumar las partículas procedentes del tráfico que de manera habitual predominan donde hay mucha circulación de vehículos.

El día 27 de junio aumenta la concentración de PM₁₀ en la atmósfera, arrastradas por vientos de mayor velocidad y procedencia SSW. Todo el espacio urbano poblado (AUP) incumple el límite legal. El 80,6% de la AUP tiene valores medios diarios entre 95 µg/m³ y 115 µg/m³ y el 19,4% entre 74 y 95 µg/m³. Se trata de un día de contaminación severa con unos máximos que se sitúan en los distritos centrales y se prolongan hacia el sur y sureste, para después disminuir de manera generalizada hacia la periferia de la ciudad en todas direcciones (figura 7).

En el día 28 (figura 8) la inmisión de PM₁₀ empeora, alcanzándose los máximos valores de todo este periodo de severa contaminación. El 72,4% de la AUP registra valores por encima de 150 µg/m³ y otro 23,6% entre 130 y 150 µg/m³. Aunque la masa de aire cálido procedente del norte de África se desplaza hacia el este, siguen llegando vientos de componente SSW a nuestra región que traen partículas en suspensión. Además, la subsidencia anticiclónica en las capas altas de la atmósfera

impide la dispersión de las partículas y favorece su persistencia en el aire.

En el día 29 se produce ya una disminución en las concentraciones atmosféricas de PM₁₀ respecto al día anterior, aunque siguen siendo elevadas, y se incumple la normativa en todo el espacio urbano. El 67,7% de la AUP con valores entre 120 y 136 µg/m³ ocupa una gran mancha central de color rojo oscuro y desde ahí los valores disminuyen hacia la periferia, reflejados en unos tonos rojos cada vez más claros (figura 9).

El día 30 hay un cambio atmosférico radical, consecuencia de un tipo de tiempo diferente. La masa cálida de aire africano se ha desplazado al Mediterráneo y llega a nuestra región otra masa de aire atlántico sin partículas, con vientos más húmedos y más frescos que producen una bajada generalizada de las temperaturas (figura 10). Las máximas no superan los 30°C y las mínimas bajan de 20°C (tabla III).

Los colores rojos de los mapas de los tres días anteriores son sustituidos por colores verdes que indican que en toda el área urbana poblada la concentración media diaria está por debajo de 50 µg/m³, valor límite diario para la protección de la salud humana establecido por la directiva europea y española, incluso no se superan los 30 µg/m³. La superficie con cifras más elevadas, entre 24,5 y 27,99 µg/m³, representa el 9%. Comprende un espacio que se extiende desde Plaza Castilla por el Paseo de la Castellana hasta Chamberí; Moratalaz y una pequeña área en torno a Sanchinarro y Farolillo. El 91% de la AUP registra valores entre 17 y 24,5 µg/m³. Este patrón refleja la situación normal de distribución de PM₁₀, es decir cifras más altas donde hay más tráfico y menores valores en zonas periféricas como Casa de Campo o Fuencarral.

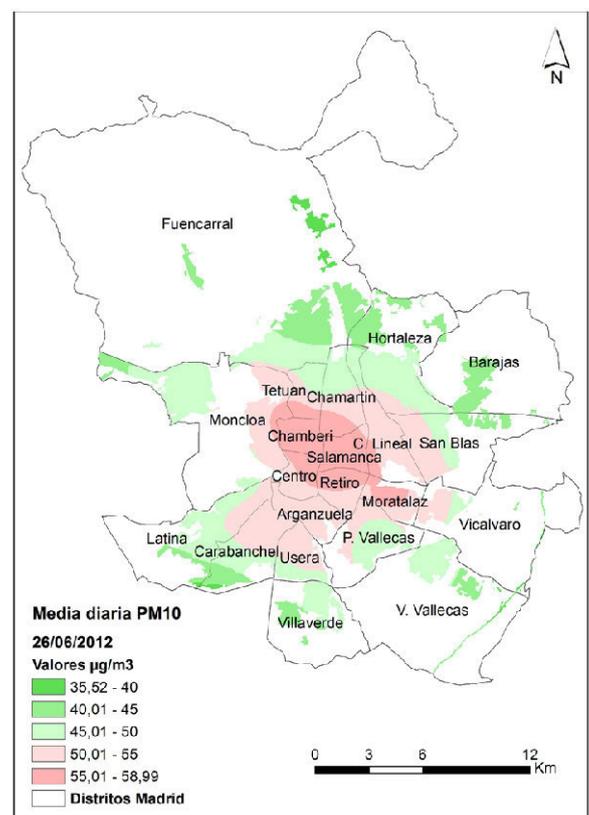


Figura 6. Distribución espacial de PM₁₀ el 26 de junio de 2012
Fuente: Elaboración propia

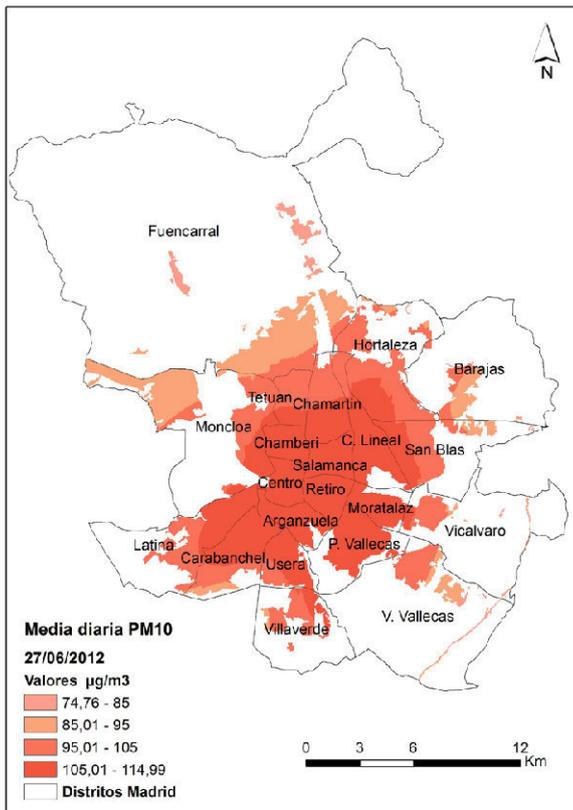


Figura 7. Distribución espacial de PM10 el 27 de junio de 2012
Fuente: Elaboración propia

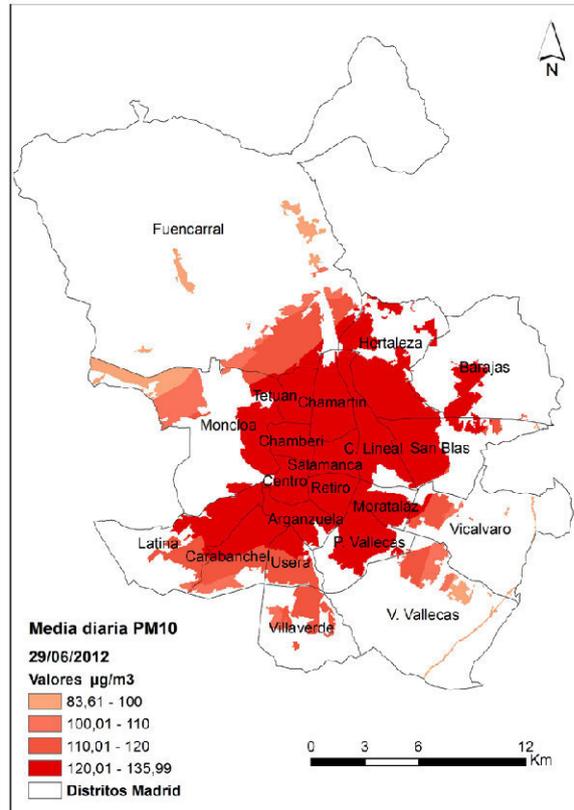


Figura 9. Distribución espacial de PM10 el 29 de junio de 2012
Fuente: Elaboración propia

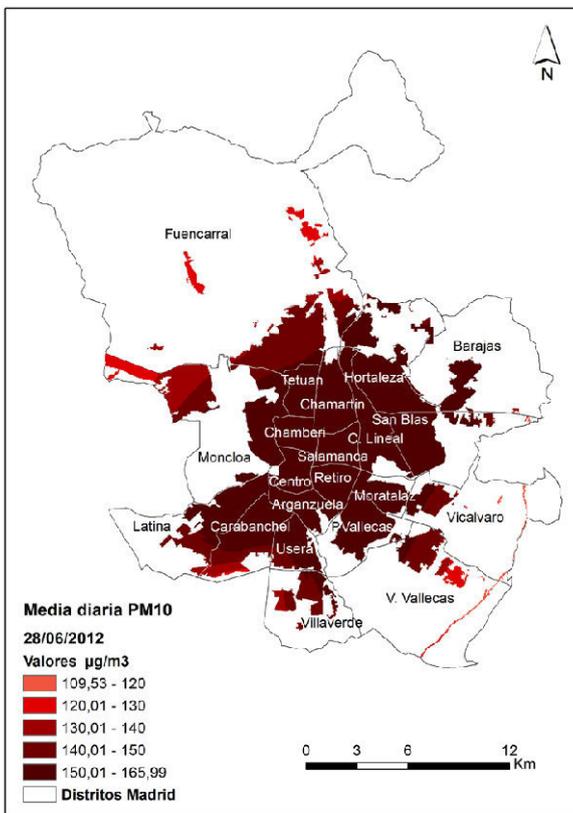


Figura 8. Distribución espacial de PM10 el 28 de junio de 2012
Fuente: Elaboración propia

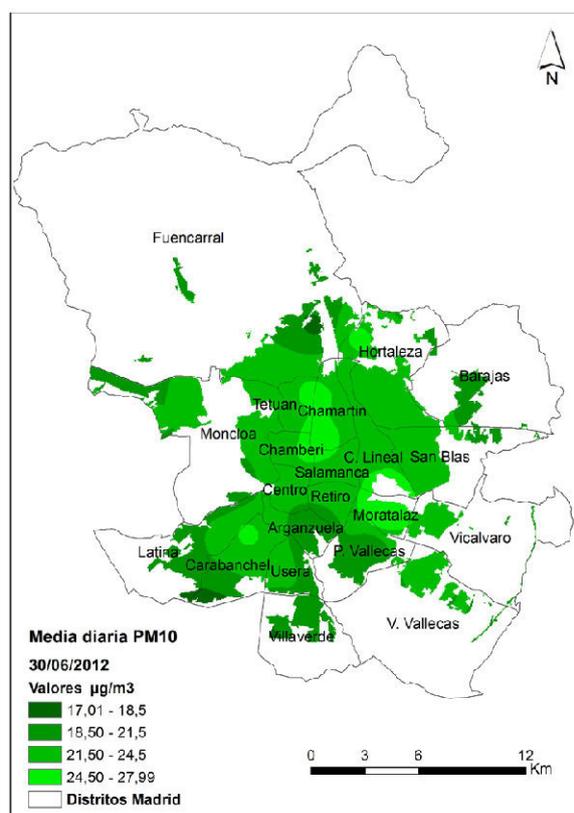


Figura 10. Distribución espacial de PM10 el 30 de junio de 2012
Fuente: Elaboración propia

IV. CONCLUSIONES

Por la fuerte concentración humana en las ciudades, el deterioro que su medio ambiente exhibe y los intensos impactos que se están constatando en muchas de ellas, la calidad del aire urbano está siendo objeto de atención preferente gubernativa, social y científicamente.

Es bien conocido que la dinámica atmosférica constituye un condicionante principal de los niveles de contaminación del aire y ello se ha evidenciado en estudios realizados a escalas medias (Rodríguez et al., 2002; Querol et al., 2003) o considerando episodios singulares en ciertas ciudades (e.g. Remoundaki et al. 2011; Viana et al., 2005). Nuestro estudio se inserta en ese frente de indagación, aunque presenta dos diferencias novedosas respecto a otros.

En primer lugar, parte y se sustenta en un plan sistemático que ha buscado establecer una tipología de tipos de tiempo en la ciudad de Madrid, durante el período 2010-2015, para determinar luego los rasgos generales de polución aérea que presentaba cada uno de ellos. Tal fue el resultado de un trabajo anterior (Cañada, 2017). En la presente contribución se ha pretendido avanzar un paso más, definiendo primero los periodos de intensa y extrema contaminación por partículas (PM₁₀) en la ciudad de Madrid durante dicho sexenio y su relación con el tipo de tiempo dominante durante los mismos, lo que permite identificar los escenarios atmosféricos singularmente críticos. De acuerdo con ello, se ha analizado la frecuencia con la que aparecen días de alta y severa contaminación por PM₁₀ en los distintos tipos de tiempo. Ello ha desvelado como especialmente proclives a alta polución los tipos de tiempo 9 (anticiclónico de verano) y 6 (anticiclónico de invierno) y a severa el tipo de tiempo 9 ya mencionado. Este hallazgo, en combinación con las previsiones de tiempo a corto plazo, posibilitaría orientar acciones preventivas generales que paliasen situaciones graves en la ciudad.

En segundo lugar, se ha estudiado un episodio, bien definido temporalmente, que resulta representativo de un tipo de tiempo que acarrea niveles severos de concentración por partículas en el aire urbano. El recurso a técnicas de interpolación espacial ha permitido desvelar la secuencia temporal de las PM₁₀ en las distintas zonas de la ciudad de Madrid durante varios días, lo que proporciona una apreciación de dónde y con qué intensidad se sufre esa atmósfera adversa.

El esfuerzo realizado en esas dos direcciones complementarias y significativas representa utilidades potenciales en dos direcciones: primero, aporta bases para plantear acciones preferentes y más intensas en aquellos ámbitos donde los niveles de polución se han mostrado más graves; y segundo, abre vías tanto para ulteriores análisis más refinados sobre impactos en la salud humana, como para aflorar desigualdades entre grupos de población y, por ende, medir discriminaciones lesivas desde el principio de justicia ambiental. Estas serán líneas en las que se espera continuar ampliando la indagación en el próximo futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco 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. Se agradece la ayuda de Heizer González Lorenzo, Ana Mellado San Gabino y Pedro Martínez Suárez en el tratamiento de datos y preparación de resultados.

REFERENCIAS

- AEMET (2012). Informe mensual climatológico junio 2012. Área de climatología y aplicaciones operativas, 10 pp.
- Alonso, E., Martínez, T., Cambra, K., López, L., Boldo, E., Zorrilla, B., Daponte, A., Aguilera, I., Toro, S., Iñiguez, C., Balles-ter, F., García, F., Plasencia, A., Artazcoz, L. y Medina, S. (2005). Evaluación en cinco ciudades españolas del impacto en salud de la contaminación atmosférica por partículas. Proyecto europeo Apheis. Rev. Esp. Salud Pública, 79, pp. 297-308.
- Artiñano, B., Salvador, P., Alonso, D.G., Querol, X., 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, 3, 453-465.
- Cañada Torrecilla, M.R., Moreno Jiménez, A. y González Lorenzo, H. (2014). Modelado de la calidad del aire urbano. Un experimento metodológico con técnicas de interpolación espacial. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, nº 65, 317-342.
- Cañada Torrecilla, M.R. (2017). Clasificación de tipos de tiempo y su influencia en las concentraciones de dióxido de nitrógeno, material particulado (PM₁₀) y ozono en la ciudad de Madrid, España. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, nº 75 (aceptado para su publicación).
- Fernández García, F. (2005). Contaminación atmosférica y calidad del aire en Madrid: análisis de las concentraciones de SO₂, CO, NO₂, ozono y PM₁₀ (1980-2003). Estudios Geográficos, vol.56, nº 259, 507-532.
- Grigoropoulos, K.N., Nastos, P.T. y Ferentinos, G. (2009). Spatial distribution of PM₁₀ and PM₁₀ during Saharan dust episodes in Athens, Greece. Advances in Science and Research, 3, 59-62.
- Gurjar, B.R., Molina, L.T. y Ojha, C.S.P. (Eds.) (2010). Air pollution. Health and environmental impacts. New York, CRS Press. Taylor and Francis Group, 518 pp.
- Kalstein, L.S. y Corrigan, P. (1986). A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. Annals of the Association of American Geographers, 76 (3), pp. 381-395.
- Martín Vide, J. y Olcina Cantos, J. (2001). Climas y tiempos de España. Madrid, Alianza Editorial, 258 pp.
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M.M., Castillo, S., Pey, J., Rodríguez, S., Cristóbal, A., Jiménez, S., Pallarés, M., de la Rosa, J., Artiñano, B., Salvador, P., Sánchez, M., García, S., Herce, M.D., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M.C., Monfort, E., Sanz, M. J., Palomo-Marín, R., Pinilla Gill, E. y Cuevas, E. (2006). Material particulado en España: niveles, composición y contribución de fuentes. Madrid CSIC y Ministerio de Medio Ambiente, 41 pp.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Viana, M.M., Artiñano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Santos, S.G.D., Patier, R.F., Rosa, J.D.L., Campa, A.S.D.L., Menedez, M. (2003). Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España: Informes finales. IJA-CSIC, ISCIII, CIEMAT, Universidad de Huelva, Universidad del País Vasco.
- Remoundaki, E., Bourliva, A., Kokkalis, P., Mamouri, R.E., Papayannis, A., Grigoratos, T., Samara, C. y Tsezos, M. (2011). PM₁₀ composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). Science of the Total Environment, 409, 20, 4361-4372.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Plana, F. (2002). Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric aerosol in the Western Mediterranean. Journal of Geophysical Research, 107 (D24), 4777.
- Salvador, P., Artiñano, B., Alonso, D.G., Querol, X. and Alastuey, A. (2004). Identification and characterisation of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods. Atmospheric Environment, 38, 3, 435-447.
- Salvador, P., Artiñano, B., Querol, X. and Alastuey, A. (2008). A combined analysis of backward trajectories and aerosol chemistry to characterise long-range transport episodes of particulate matter: The Madrid air basin, a case study. Science of the Total Environment, 495-506.
- 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.