

# **MEDICIÓN DE PM<sub>2,5</sub> SEGÚN LAS CONDICIONES DEL TRÁFICO EN EL CENTRO DE MADRID MEDIANTE UN DISPOSITIVO MÓVIL**

**Diego Lamas Casado**

TRANSyT Centro de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, España

**Belén Martín Ramos**

TRANSyT Centro de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, España

**Carlos Calderón Guerrero**

ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid,  
España

**Emilio Ortega Pérez**

TRANSyT Centro de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, España

## **RESUMEN**

El control de la calidad del aire en las ciudades es uno de los grandes retos en los próximos años. La ciudad de Madrid, como muchas otras ciudades del mundo, cuenta con un sistema de monitorización de la calidad del aire mediante estaciones fijas de medición. Distintos estudios defienden la idea de que los modelos de este tipo presentan ciertas carencias en cuanto a representatividad de la información generada. En este trabajo, se ha evaluado la calidad del aire en ciertas calles de Madrid mediante el uso de sensores móviles. Para ello, se ha diseñado una ruta, analizando las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> agrupadas en los tramos de la ruta. La recopilación de datos mediante un sensor móvil permite una cobertura homogénea de datos en la ruta, gracias a la cual se han mapeado las zonas con mayor riesgo de presentar concentraciones elevadas. Así mismo, se han comparado los resultados dentro y fuera de Madrid Central y se ha estudiado la relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> con factores meteorológicos y condiciones del tráfico. A pesar del bajo coste de esta tecnología, se han obtenido mediciones de calidad aceptable que pueden ser complementarias a las realizadas con las estaciones fijas del Sistema de vigilancia de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 La contaminación en las ciudades**

La contaminación se considera uno de los problemas más acuciantes en las grandes ciudades, debido a las grandes concentraciones de población expuesta..

Estudios científicos señalan a la contaminación ambiental como causante de la muerte de 6,4 millones de personas en el mundo en 2015 (Landrigan, 2017). Por otro lado, el Banco Mundial estimó unas pérdidas relacionadas con la contaminación de 225.000 millones de

dólares en 2016 y la Agencia de Protección Ambiental del Gobierno de los EE.UU. (EPA), la considera un factor de intensificación de las consecuencias del cambio climático.

El tráfico en sí, los atascos y la presencia de bloques continuos de edificios y construcciones altas provocan los llamados *street canyons*, que bloquean la dispersión de las emisiones y dan lugar a altas concentraciones de contaminación (Wu et al., 2017). Esta contaminación atmosférica engloba la presencia de distintos elementos potencialmente peligrosos para los seres vivos que habitan en las ciudades. Estos elementos se presentan en dos estados, gaseoso y sólido (partículas). Los contaminantes gaseosos en los que se centra la OMS en sus Directrices de calidad del aire (OMS, 2005) son el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). El NO<sub>2</sub> es un gas emitido principalmente en procesos de combustión y fertilizantes y es particularmente peligroso en condiciones de humedad debido a que, en combinación con el agua, genera ácido nítrico, el causante de la lluvia ácida. Por su parte, el O<sub>3</sub> es un fuerte oxidante que se presenta de forma natural en la estratosfera en concentraciones variables, pero su presencia en la troposfera está directamente relacionada con las actividades humanas (Godish et al., 2018) y se considera uno de los contaminantes secundarios más problemáticos de cara al futuro, por sus daños, tanto para el hombre, como para la vegetación (Calderón-Guerrero et al., 2013). Por último, el SO<sub>2</sub> es un gas cuyas principales fuentes de origen son la quema de combustibles fósiles ricos en sulfuro para calefacción doméstica, generación de energía y en vehículos motorizados.

Además, existen otros contaminantes gaseosos que generan preocupación a expertos de todo el mundo, como los compuestos orgánicos volátiles (COVs), importantes precursores del ozono troposférico (Camargo et al., 2015). Todos ellos provocan afecciones al ser humano, relacionadas con problemas respiratorios principalmente.

Las partículas en suspensión que se estudian en materia de contaminación ambiental son las que tienen un tamaño menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>). Según se estima, en Madrid el tráfico rodado constituye la fuente principal de emisiones de partículas. Estas provienen tanto de los tubos de escape de los vehículos a motor, como del levantamiento de capas acumuladas en el firme de rodadura por abrasión mecánica, frenos, obras de construcción y demolición, etc. Así mismo, se considera en Madrid la intrusión de aire africano como fuente probable de episodios de elevadas concentraciones (Ayuntamiento de Madrid, 2004). De ellas, las menores de 2,5 micras (PM<sub>2,5</sub>) son capaces de llegar hasta los bronquios y en el caso de las PM<sub>1</sub> serían transportadas a la sangre a través de los alveolos. Recientemente, un estudio (Soldevilla et al., 2020) ha demostrado que la presencia de partículas ultrafinas está altamente relacionada con el aumento de la presión arterial. También se las relaciona con enfermedades neurodegenerativas, como consecuencia del aumento generalizado de las partículas en suspensión en los ambientes urbanos (Maher et al., 2016).

## 1.2 Redes de monitorización ambiental

En España, los criterios de medición y evaluación de la calidad del aire quedan dictados por el Real Decreto 39/2017 del 27 de enero, que modifica al RD 102/2011. En las grandes ciudades, de cara a solventar el problema de la contaminación atmosférica se han planteado redes de medición o Air Quality Monitoring Networks (AQMN). Las principales ventajas derivadas de una red efectiva de medición se resumen: (i) poder comparar los niveles monitorizados con los estándares establecidos por el organismo competente; (ii) prevenir el riesgo de exposición a los contaminantes monitorizados; y (iii) mitigar y controlar las emisiones de fuentes conocidas (Afshar-Mohajer et al., 2018). Generalmente, estas redes están compuestas por puestos fijos y suelen contar con mediciones históricas de largos períodos de tiempo. Sin embargo, algunos expertos (Castell et al., 2017; Munir et al., 2019) apuntan que las AQMN generalmente no son suficientemente densas. Además, según Nagendra et al. (2019) las redes de muestreo fijo no proveen variaciones espaciales de las concentraciones de los contaminantes y tienden a subestimar la exposición de los humanos.

Las concentraciones de los contaminantes pueden variar enormemente en el espacio y en el tiempo (Afshar-Mohajer et al., 2018). Consecuentemente, es importante registrar estos picos de polución. Recientes estudios (Nagendra et al., 2019) establecen que los dispositivos de medición basados en sensores *low-cost* pueden ser efectivos para capturar variaciones espaciales y temporales de los contaminantes y constituir un suplemento a las mediciones actuales. En la actualidad, existe una serie de acciones de ciencia ciudadana mediante el empleo de estos sensores *low-cost* dentro de la comunidad escolar (Calderón-Guerrero et al., 2021), que pretenden concienciar a los jóvenes de los niveles de contaminación a nivel local y ser miembros activos en la toma de datos mediante el diseño y empleo de sensores móviles.

## 2. LA CALIDAD DEL AIRE EN MADRID

### 2.1 Actuaciones recientes

En los últimos años, la preocupación social y política por la contaminación del aire, ha provocado la puesta en marcha de diversas medidas recogidas en el Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático en la ciudad de Madrid de 2017, conocido como Plan A y reestructurado posteriormente y denominado MADRID 360 (Ayuntamiento de Madrid, 2019a). El transporte por carretera es la causa principal de 3 de los 5 contaminantes más relevantes (Ayuntamiento de Madrid, 2019b). En el Plan de 2017, en torno a un 30% del presupuesto se destinaba a las medidas dirigidas a reducir la intensidad del tráfico (154 M€), y un 60% a actuaciones sobre el parque móvil y la ordenación de sectores clave con alto impacto en la movilidad urbana (330 M€) (Ayuntamiento de Madrid, 2017). Plan A de Calidad del Aire y Cambio Climático, 2016).

MADRID 360 pretende cumplir los límites de calidad del aire establecidos en la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008.

Entre otras medidas, se actúa principalmente en la movilidad. Se pretende llevar a cabo nuevas peatonalizaciones; favorecer el transporte público, con líneas cero emisiones y renovación de flotas de autobuses, el uso de la bicicleta y la moto; construir más aparcamientos disuasorios; limitar la entrada de los vehículos más contaminantes en toda la ciudad; y establecer restricciones al tráfico en la zona de emisiones bajas, atendiendo al distintivo ambiental de vehículos.

## **2.2 Sistema de vigilancia de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid**

Sistema de vigilancia forma parte del Sistema Integral de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2021). Está compuesto por 24 estaciones de monitorización que miden de forma precisa los niveles de gases y partículas contaminantes. No todas las estaciones miden los mismos contaminantes, lo que repercute en la representatividad de la información. El Sistema de Vigilancia cuenta además con captadores manuales para la determinación de contaminantes específicos y de unidades móviles de vigilancia para la realización de campañas de medición específicas.

## **3. OBJETIVO**

Como se ha visto, la contaminación en las ciudades es uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la ciudad de Madrid. El Sistema Integral de la Calidad del Aire está diseñado para permitir al Ayuntamiento una toma de decisiones basada en la información que aportan 24 estaciones de medición. Sin embargo, aunque la calidad de dichas mediciones en cuanto a precisión es indudable, es muy posible que se presenten deficiencias en cuanto a cantidad de puntos de muestreo y representatividad de los datos.

Por tanto, el objetivo general de este trabajo es conocer la concentración de  $PM_{2.5}$  en un conjunto de calles de Madrid mediante el uso de sensores móviles. Para ello, se ha diseñado una ruta por la ciudad de Madrid y para conocer el estado de las distintas partes del recorrido, se llevará a cabo un análisis de las concentraciones agrupadas en los tramos de la ruta. Además, se caracterizarán los puntos más controvertidos dentro de los tramos mediante una malla poligonal, algo totalmente imposible mediante los métodos de información de contaminación convencionales. Del mismo modo, la recopilación de datos mediante un sensor móvil permitirá una cobertura homogénea de datos en la ruta, gracias a la cual se mapearán las zonas con mayor riesgo de presentar concentraciones elevadas. En cuanto a Madrid Central, se compararán los niveles medios observados dentro y fuera de sus límites, con el fin de conocer la efectividad de las medidas de regulación del tráfico.

Por último, se tratará de evaluar la relación entre las concentraciones de  $PM_{2.5}$  observadas y las variables externas, tales como la meteorología y la velocidad del tráfico.

## 4. METODOLOGÍA

La metodología seguida consta de 4 fases: (i) una primera fase de selección de componentes y montaje del sensor móvil; (ii) calibración del sensor; (iii) selección del caso de estudio y de las rutas de medición, que recorren distintas calles de la ciudad, tanto dentro como fuera del área de tráfico restringido; (iv) toma de datos; (v) análisis de los datos.

### 4.1 Selección de componentes y montaje del sensor móvil

Se ha escogido un procesador *ARDUINO UNO*, en el que se ha montado un sensor de PM *BJHIKE HK-A5*. Se trata de un sensor láser que mide partículas desde 0.3 hasta 10 micras y se ha escogido por la sensibilidad que presenta. Además, el sensor debe contar con un GPS que registra en todo momento la latitud, longitud, hora, altitud (m) y velocidad (km/h). El dispositivo escogido ha sido un *Ublox Neo-6M*. Por último, el sensor registra datos de humedad (%) y temperatura (°C), suministrados por un sensor *DHT22* de *Adafruit Industries LCC*. Una vez conectados los diversos componentes a la placa, el sensor *CAELUS*, que es como se ha llamado, se ha montado sobre una carcasa específicamente diseñada para ello.

### 4.2 Calibración del sensor

Se ha realizado una calibración en campo de los datos registrados por el sensor, comparándolos con a los datos oficiales publicados por el Ayuntamiento de Madrid. Se ha realizado un circuito de tal modo que la ruta coincide con la situación de 2 estaciones con medidores de PM del Sistema de Vigilancia del Ayuntamiento de Madrid (Castellana y Escuelas Aguirre). El dispositivo lleva a cabo mediciones que coinciden en un 75% con los datos oficiales, atendiendo exclusivamente a la clase ICA a la que pertenecen. Las diferencias se deben en parte a que el dato de la estación oficial corresponde a un valor interpolado entre medias horarias. En este proceso se han constatado la capacidad del sensor para captar concentraciones pico frente al sistema de datos promedio del Sistema de Información del Ayuntamiento.

### 4.3 Selección del caso de estudio y de la ruta de medición

Se ha seleccionado un conjunto de calles de Madrid para realizar las mediciones que se encuentran dentro y fuera de Madrid Central. Por tanto, la ruta de medición planteada alterna salidas y entradas al recinto restringido, así como por su perímetro. Del mismo modo, se considera fundamental el paso por las estaciones del Sistema de Vigilancia del Ayuntamiento, ya que servirán para mantener una calibración de campo y asegurar en todo momento la fiabilidad de nuestras mediciones. De este modo, la ruta diseñada es la que puede observarse en la Figura 1, con un recorrido total de 17,2 km.

#### 4.4 Toma de datos

El sensor se ha colocado en el techo de un *Mitsubishi Outlander Phev* híbrido enchufable y se han tomado datos durante 19 días.

Por otro lado, ya que se trata de factores determinantes en la calidad del aire, es necesario disponer de datos de los factores meteorológicos y el estado del tráfico correspondientes a cada uno de los días de toma de datos. Para los factores meteorológicos (velocidad del viento, temperatura, radiación solar, HR y presión atmosférica) se cuenta con los datos de las estaciones más cercanas a la ruta de medición la red de control meteorológico del Ayuntamiento de Madrid. Los datos de intensidad de tráfico media diaria (IMD) se han obtenido de la Web del Portal de Datos Abiertos del Ayto. de Madrid. En este repositorio se obtienen datos del número de vehículos que pasan por cada estación de medición, en períodos de 15 minutos.

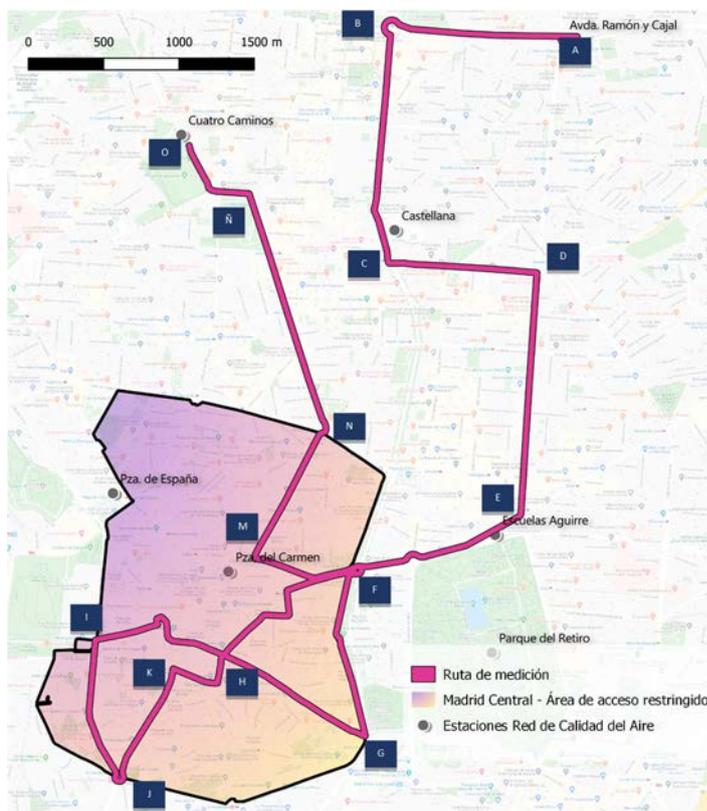
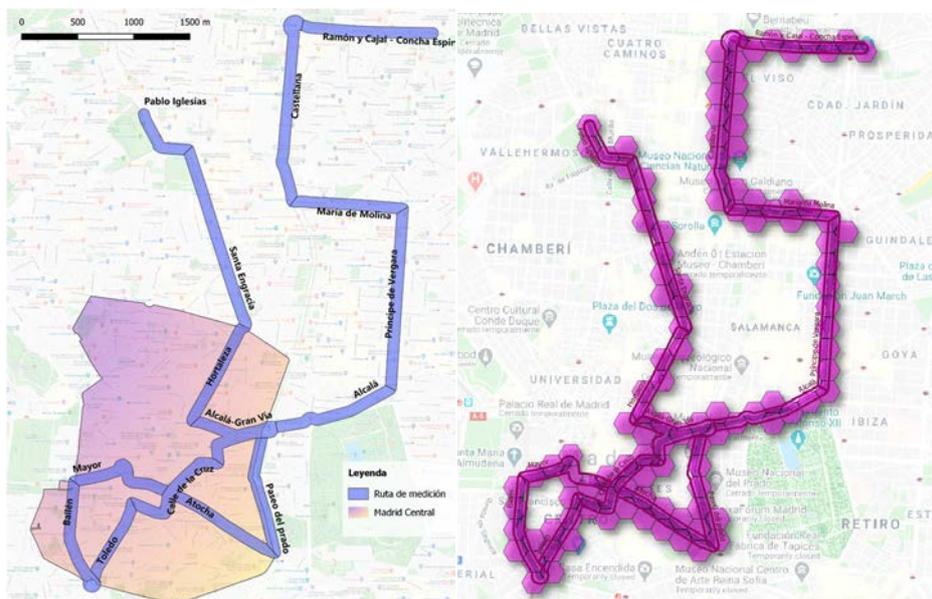


Fig. 1 – Ruta de medición

#### 4.5 Análisis de los datos

Se han realizado varios análisis de las mediciones realizadas: (i) por tramos (Figura 2 izquierda); (ii) mediante malla hexagonal de 50 metros de apotema que contienen puntos de medición (Figura 2 derecha). De este modo, se pretende observar el comportamiento de las diversas concentraciones de contaminantes en puntos más concretos del recorrido; (iii) de altas concentraciones, mediante la generación de mapas de calor que identifiquen las zonas de mayores concentraciones en la ruta de medición; (iv) en Madrid Central,

comparando los niveles medios de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  que aparecen en los tramos interiores del área de bajas emisiones (dentro de Madrid Central) frente a las medias de los tramos externos; y (v) de las variables meteorológicas externas, que pueden condicionar la aparición de patrones de aumento o descenso de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  en la ciudad.



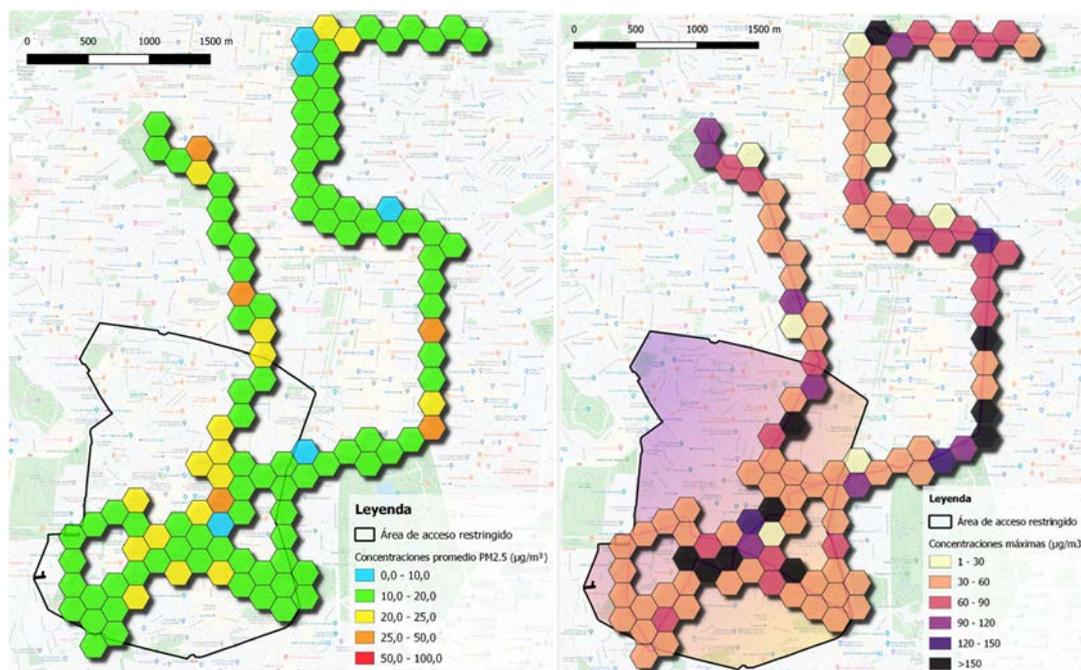
**Fig. 2 – izquierda: división de la ruta en tramos; derecha: malla hexagonal**

## 5. RESULTADOS

Atendiendo al estudio de medias por calles, las cuatro calles se superan los promedios globales en un mayor número de ocasiones son: la calle de la Cruz, el Paseo del Prado, la calle Hortaleza y la calle Mayor. Al final de la calle de la Cruz se encuentra la plaza de Canalejas, cuyo acceso está regulado por un semáforo que condiciona plenamente la circulación del único carril de esta calle. Prácticamente todos los días de medición se han encontrado dificultades de acceso a dicha Plaza de Canalejas, con retenciones continuas en la calle de la Cruz en sus 300 metros de recorrido. Este punto concreto, además, supone la sección más estrecha de la ruta, contando con un único carril y apenas cinco metros entre los edificios, lo que puede condicionar la aireación de la zona y el estancamiento de los contaminantes. La suma de los mencionados factores condiciona notablemente la movilidad y la calidad del aire en la calle de la Cruz. Casos similares con los de la calle Hortaleza (supera las concentraciones promedio en 12 ocasiones) y calle Mayor (supera en 8 ocasiones las concentraciones promedio de la ruta), presentando una mayor media global de concentración de  $PM_{2,5}$  durante el período de estudio. En ella se producen frecuentes retenciones y la anchura entre edificios es de las menores de la ruta seguida.

En la Figura 3 se muestran los resultados del análisis por malla hexagonal, divididos en mapa de concentraciones medias y mapa de niveles máximos. En los valores promedio del trabajo global de medición se obtienen valores de clase “Buena” (de acuerdo a los valores

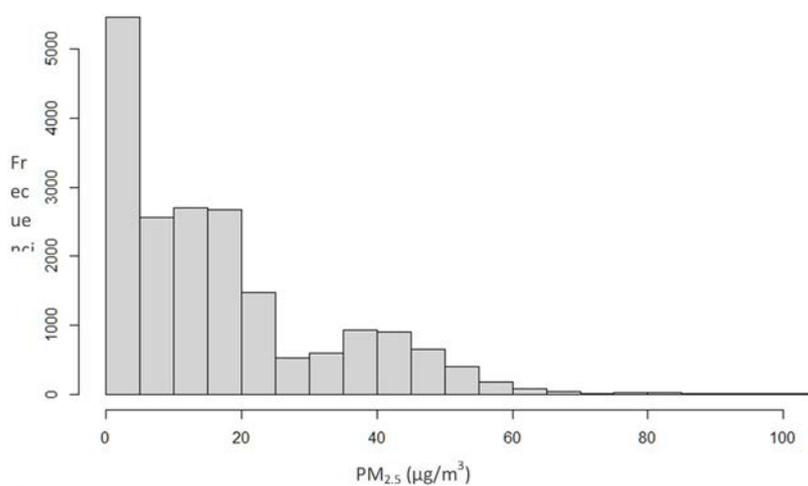
del índice de calidad del aire (ICA)) de forma predominante, excepto en ciertos puntos de la ruta en los que encontramos promedios de concentraciones superiores, con la clase “Regular” e incluso “Mala”. Cabe destacar que la mayor parte de las concentraciones de tipo “Regular”, posicionadas entre 20 y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se encuentran en el interior del área de acceso restringido (Madrid Central). Respecto a los promedios correspondientes a la clase “Mala”, entre 25 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , los principales problemas los encontramos en la calle Príncipe de Vergara, calle de la Cruz y Santa Engracia. El mapa de máximos corrobora dónde se encuentran los principales focos causantes de las altas concentraciones que puedan haberse observado en las distintas calles en el análisis por tramos. Podemos hallar picos máximos puntuales en plaza de Lima, Príncipe de Vergara, calle Atocha, la calle Mayor y la calle de la Cruz.



**Fig. 3 – Mapas de medias globales y máximos de las concentraciones de PM2,5 sobre malla hexagonal**

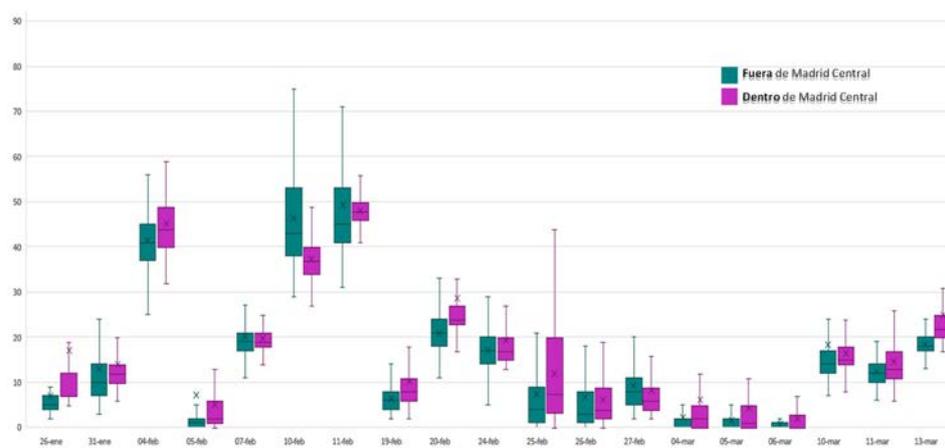
La Figura 4 representa el histograma de distribución de las concentraciones de PM2,5 durante el recorrido. Esta figura revela que el 30% de todos los valores recogidos se encuentra por encima de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , es decir, categorías peores que “Buena”. De todos los valores de altas concentraciones, encontramos la máxima frecuencia en la franja entre 20 y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la cual concentra un 7% de todos los valores recogidos. Mientras tanto, la clase “Mala” (entre 25 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) recoge el 18% de las mediciones y la “Muy mala” (de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en adelante) tan sólo un 5%. Es reseñable que prácticamente un tercio de todos los datos medidos presentan una concentración entre 0 y 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , es decir, con niveles de partículas extremadamente bajos.

Los focos principales de las presencias de la clase “Muy Mala” se encuentran en la Plaza de la Lima, la esquina de Príncipe de Vergara con calle Alcalá, la calle de la Cruz, la conexión entre Hortaleza y Santa Engracia (plaza de Alonso Martínez) y en la propia calle Santa Engracia. Con respecto a la situación en Príncipe de Vergara, este análisis pone de manifiesto que este se trata de uno de los puntos más problemáticos de la ruta, corroborando así las conclusiones que pueden obtenerse al analizar los promedios tanto por calle como por la malla hexagonal.



**Fig. 4 – Histograma de distribución de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  durante los trabajos de medición**

En cuanto a la comparación entre las medias diarias de los tramos del interior del área de tráfico restringido (Madrid Central) y los tramos externos, no se observan diferencias en los promedios entre ambos. Los datos obtenidos no respaldan una menor concentración de  $PM_{2,5}$  en el interior frente al exterior. La Figura 5 muestra una comparativa de los diagramas de cajas y bigotes de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  para cada uno de los días de estudio.



**Fig. 5 – Diagramas de distribución de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  durante los trabajos de medición**

Con respecto a las variables externas evaluadas, el principal resultado obtenido es que únicamente la velocidad del viento muestra una tendencia clara a hacer disminuir las concentraciones de PM, al menos en los rangos de velocidades registrados. Estos resultados coinciden con algunos expertos (Wang y Ogawa, 2015). La temperatura y radiación solar no parecen estar relacionados con el aumento o descenso global de la concentración de PM<sub>2,5</sub>. En el caso de las temperaturas, de hecho, estudios previos obtienen resultados contrarios, ya que mientras que unos aprecian una correlación positiva (Tai et al., 2010), otros defienden la hipótesis contraria (Dawson et al., 2007). La HR y la presión atmosférica deben ser analizadas con mayor profundidad. Aunque también muestran cierta tendencia a ser influyentes en los ascensos y disminuciones de los niveles de PM, la HR afecta a la sensibilidad del sensor de PM<sub>2,5</sub> y la presión barométrica no describe un abanico suficientemente amplio de valores para sacar conclusiones.

En la comparativa con los valores de IMD, se comprueba de nuevo que las calles con mayor nivel promedio de contaminación por PM<sub>2,5</sub> no se corresponden con aquellas con menores niveles de IMD. De este modo, encontramos valores promedio de IMD máximos en el Paseo del Prado y Castellana (2200 y 1700, respectivamente) mientras que los mínimos se dan en la calle de la Cruz y la calle Mayor (260 y 290). En cambio, tanto la calle de la Cruz y la calle Mayor como el Paseo del prado han sido evaluadas como algunas de las más problemáticas del recorrido en cuanto a niveles de PM<sub>2,5</sub>. Por tanto, estos aumentos de PM<sub>2,5</sub> en calles con bajos niveles de IMD deben ser explicados por otros factores, tales como la propia fisonomía de las calles (que en este caso coinciden con las más estrechas de la ruta) y la presencia de elementos perturbadores tales como retenciones constantes en la calle de la Cruz o el túnel de la calle Mayor.

Al comparar los niveles medios de PM<sub>2,5</sub> con las velocidades de tráfico medias recogidas por el sensor, se puede decir que, al menos a nivel cualitativo, las concentraciones promedio de partículas en el ambiente tienden a verse influidas de forma inversa por la velocidad del tráfico. Es decir, en calles con una elevada tendencia a atascos y retenciones se dan unos promedios generalmente más altos de concentraciones de PM<sub>2,5</sub>. No obstante, mientras que los análisis descriptivos, que comparan las PM<sub>2,5</sub> con los valores promedio de los factores externos agrupados en días o calles sugieren una alta afinidad de la velocidad del tráfico promedio en cada calle, el análisis de correlación de Pearson no defiende esta aparente tendencia. Esto quiere decir que no se aprecia una correlación lineal entre los aumentos y descensos de PM<sub>2,5</sub> y los valores de velocidad de tráfico. Esta tendencia podría darse, en parte, por un descenso real de las concentraciones en calles más amplias, con mayor circulación del aire, o por la menor densidad de tráfico presente en el tramo. No obstante, este enfoque también puede estar alterado por una reducción del número de puntos de muestreo debido al menor tiempo de presencia en estas calles.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la concentración de  $PM_{2.5}$  en un conjunto de calles de Madrid mediante el uso de sensores móviles. A pesar del bajo coste de esta tecnología, se han obtenido mediciones de calidad aceptable que pueden ser complementarias a las realizadas con las estaciones fijas del Sistema de vigilancia de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid.

Se ha podido comprobar que ciertas calles presentan concentraciones mayores que la media con asiduidad. También cómo la velocidad media del tráfico en cada calle parece afectar a las medias globales de dicho tramo. El método permite caracterizar los puntos problemáticos de la ciudad con un enfoque mucho más minucioso que los sistemas de medición estándar, tal y como se muestra en los resultados por malla y de altas concentraciones. Uno de los factores que más parecen afectar a la aparición de altas concentraciones es la existencia de tramos estrechos de un solo carril, tales como la calle de la Cruz o la calle Hortaleza, donde no circula una gran cantidad de vehículos, pero estos suelen verse sometidos a fuertes retenciones.

De hecho, se han encontrado evidencias de mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$  promedio en las calles con menor intensidad de tráfico media diaria (IMD), dado que coinciden con los tramos menos amplios, con menos carriles y, en definitiva, mayores dificultades de aireación. Esta valoración del estado de cada una de las calles por las que discurre el recorrido no habría sido posible mediante la recopilación de la información suministrada por estaciones fijas. De hecho, los expertos (Qiu et al., 2017) critican que este es el gran problema de la ciencia de los datos de calidad del aire. Hasta ahora la mayoría de los estudios han recopilado información de estaciones fijas, dejando de lado variables estructurales, tales como el trazado de las carreteras, su anchura, etc.

Hay constancia de otros estudios en la ciudad de Madrid, donde sí se ha considerado otros factores, como la presencia y características del arbolado de las zonas verdes, y la IMD de las calles próximas a los puntos de medición, así como la distancia entre las vías de tránsito y arbolado, y el efecto de los factores meteorológicos sobre estos valores (Calderón-Guerrero, 2014), confirmando la variación de los niveles de contaminación atmosférica en función de la presencia de estas zonas verdes, la distancia y la IMD. De igual modo, en estudios posteriores (Sánchez Martín, 2017), se corroboran estas variaciones de los niveles de partículas ( $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) en diferentes zonas de la Casa de Campo de Madrid, mediante la adaptación de unos sensores low-cost, similares a los de este estudio, en una aeronave pilotada de forma remota (*DRON*) en las proximidades de las autopistas A-5 y A-6, lo cual avala los resultados de este estudio, y realza la utilidad de estos sensores móviles a la hora de identificar las variaciones de los niveles de contaminantes atmosféricos por otros factores.

En cuanto a Madrid Central, los resultados de este estudio no han identificado una diferencia entre ambas zonas, por lo cual podría establecerse que las restricciones al tráfico no están resultando en un impacto positivo para el interior de dicha área. Se recomienda continuar con investigaciones de esta línea durante los futuros años, para observar posibles cambios con el endurecimiento de las restricciones previstas en la Estrategia MADRID 360.

En la comparativa con los valores de IMD, los resultados indican que las calles con mayor nivel promedio de contaminación por PM<sub>2,5</sub> no se corresponden con aquellas con menores niveles de IMD. De igual forma, a nivel cualitativo, las concentraciones promedio de partículas en el ambiente tienden a verse influidas de forma inversa por la velocidad del tráfico. Por otra parte, parece claro que las variables meteorológicas como la velocidad del viento y su dirección, la humedad relativa y la presión barométrica tienen un mayor peso que otras variables externas que puedan aplicarse a modelos predictivos en un futuro. Con una mejora futura de los trabajos de medición podrían construirse experimentos con resultados más robustos en este sentido.

Las mayores limitaciones encontradas en el proyecto residen en el diseño del sensor móvil. Por ejemplo, el acabado del prototipo impide su viabilidad de uso en días de lluvia. También se debería incorporar otros sensores como el de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>, de gran importancia para una ciudad como Madrid.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los siguientes proyectos: “Efectos de la configuración urbana sobre la movilidad a pie y la contaminación en las ciudades - DESPACIO” (TRA2017-88058-R), financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España en el “Programa Estatal de I + D + i Orientada a los Retos de la Sociedad” y “Desarrollo de aplicaciones SIG para la implementación de indicadores de fragmentación urbana y mejora de la movilidad” de la Universidad Politécnica de Madrid, proyecto de investigación núm. RP151320028.

## **REFERENCIAS**

AFSHAR-MOHAJER, N., ZUIDEMA, C., SOUSAN, S., HALLETT, L., TATUM, M., RULE, A.M., THOMAS, G., PETERS T.M. Y KOEHLE, K. (2018). Evaluation of low-cost electro-chemical sensors for environmental monitoring of ozone, nitrogen dioxide, and carbon monoxide. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 15(2), pp. 87-98.

AYUNTAMIENTO DE MADRID (2004). Libro blanco de la calidad del aire en el municipio de Madrid. Madrid.

AYUNTAMIENTO DE MADRID (2017). Plan A de Calidad del Aire y Cambio Climático. Madrid.

AYUNTAMIENTO DE MADRID (2019a). Avance de la estrategia de sostenibilidad ambiental. MADRID 360. Área de gobierno de medio ambiente y movilidad. Madrid.

AYUNTAMIENTO DE MADRID (2019b). Encuesta de Calidad de Vida y Satisfacción con los Servicios Públicos de la Ciudad de Madrid 2019. Madrid.

AYUNTAMIENTO DE MADRID (2021). El Sistema Integral de la Calidad del Aire. <http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/calaire/SistemaIntegral/concepto.html> (acceso: 08-02-2021).

CALDERÓN-GUERRERO, C., GÜNTHARDT-GOERG, M. Y VOLLENWEIDER, P. (2013). Foliar Symptoms Triggered by Ozone Stress in Irrigated Holm Oaks from the City of Madrid, Spain. PLOS ONE 8(7): e69171.

CALDERÓN-GUERRERO, C. (2014). Urban trees and atmospheric pollutants in big cities: Effects in Madrid. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural (UPM).

CALDERÓN-GUERRERO, C., MARTÍNEZ NÚÑEZ, M., SASTRE MERINO, S. Y MARCHAMALO, M. (2021). Pilot experience to increase the environmental awareness of young students (12-18 years) through innovating formation by upm researchers in the classroom. INTED2021 Proceedings. 15th International Technology, Education and Development Conference. Pp. 8815-8823.

CAMARGO, Y., BOLAÑO-ORTIZ, T. Y ÁLVAREZ, A. (2015). Emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico y su contribución a la dinámica atmosférica. Revista intropica, 5, pp. 77-86.

CASTELL, N., DAUGE, F.R., SCHNEIDER, P., VOGT, M., LERNER, U., FISHBAIN, B., BRODAY, D. Y BARTONOVA, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? Environment International, 99, pp. 293-302.

DAWSON, J. P., ADAMS P.J. Y PANDIS, S. (2007) Sensitivity of PM<sub>2,5</sub> to climate in the Eastern U.S: a modeling case study. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 7(3), pp. 6487-6525.

DIRECTIVA 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Diario Oficial de la Unión Europea. Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea.

GODISH, T., DAVIS, W.T. y FU, J.S. (2018). The Air Quality. Boca Ratón, Taylor & Francis Group.

LANDRIGAN, P.J. (2017). Air pollution and health. The Lancet, 2(1), 4-5.

- MAHER, B.A., AHMEDB, I.A.M., KARLOUKOVSKIA, V., MACLARENC, D.A., FOULDS, P.G., ALLSOP, D., MANNE, D.M.A., TORRES-JARDÓN, R. Y CALDERON-GARCIDUENAS, L. (2016). Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39).
- MUNIR, S., MAYFIELD, M., COCA, D. Y JUBB, S.A. (2019). Structuring an integrated air quality monitoring network in large urban areas - Discussing the purpose, criteria and deployment strategy. *Atmospheric Environment: X*, 2, pp. 100027.
- NAGENDRA, S.S.M., REDDY, P., YASA, NARAYANA M.V., SEEMAR KHADIRNAIKAR, P. Y RANI, P. (2019). Mobile monitoring of air pollution using low cost sensors to visualize spatio-temporal variation of pollutants at urban hotspots. *Sustainable Cities and Society*, 44, pp. 520-535.
- OMS (2005). *Guías de la Calidad del aire*. Organización Mundial de la Salud. Ginebra.
- QIU, Z., XU, X., SONG, J., LUO, Y., ZHAO, R., XIANG, B., ZHOU, W., LI, X. Y HAO, Y. (2017). Pedestrian exposure to traffic PM on different types of urban roads: A case of study of Xi'an Chian. *Sustainable Cities and Society*, 32, pp. 475-485.
- REAL DECRETO 39/2017, de 27 de enero, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. «BOE» núm. 24, de 28 de enero de 2017, páginas 6918 a 6930 (13 págs.) I. Disposiciones generales, Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales, BOE-A-2017-914.
- SÁNCHEZ MARTÍN, S. (2017). El uso de aeronaves pilotadas de forma remota para el control de la calidad del aire en entornos periurbanos. Trabajo fin de Grado (TFG). E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural (UPM).
- SOLDEVILA, N., VINYOLES, E., TOBIAS, A., BANEGAS, J.R., DE LA SIERRA, A., GOROSTIDI, M., SEGURA, J., DE LA CRUZ, J., MUÑOZ-PÉREZ, M.A., QUEROL, X. Y RUILOPE, L.M. (2020). How do ultrafine particles in urban air affect ambulatory blood pressure?. *Journal of Hypertension*, 38(5), pp. 845-849.
- TAI, A., MICKLEY, L. Y JACOB, D. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM<sub>2,5</sub>) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM<sub>2,5</sub> to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), pp. 3976-3984.
- WANG, J. Y OGAWA, S. (2015). Effects of Meteorological Conditions on PM<sub>2,5</sub> Concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), pp. 9089-101.
- WU, H., REIS, S., LIN, C. Y HEALA, M.R. (2018). Effect of monitoring network design on land use regression models for estimating residential NO<sub>2</sub> concentration. *Atmospheric Environment*, 149, pp. 24-33.