



ISSN: 1988-5245  
<https://doi.org/10.51896/delos>

# DELOS. DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE

D I C E latindex IDEAS EconPapers Dialnet ÍNDICES CSIC MIAR Sucupira

## ESTUDIO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS PRINCIPALES PLAZAS Y GLORIETAS DE LA CIUDAD DE MURCIA

**María del Mar Durán del Amor**

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Murcia  
0000-0002-2913-4083  
[mariamar.duran@um.es](mailto:mariamar.duran@um.es)

**Antonia Baeza Caracena**

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Murcia  
0000-0002-8207-0453  
[abaeza@um.es](mailto:abaeza@um.es)

**Mercedes Llorens Pascual del Riquelme**

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Murcia  
0000-0003-3983-9922  
[llorens@um.es](mailto:llorens@um.es)

**Daniel Cruz López**

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Murcia  
[daniel.cruzl@um.es](mailto:daniel.cruzl@um.es)

Correspondencia: [mariamar.duran@um.es](mailto:mariamar.duran@um.es)

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

María del Mar Durán del Amor, Antonia Baeza Caracena, Mercedes Llorens Pascual del Riquelme y Daniel Cruz López (2021): "Estudio de contaminación atmosférica en las principales plazas y glorietas de la ciudad de Murcia", Revista DELOS, (Especial noviembre 2021). En línea: <https://www.eumed.net/es/revistas/delos/especial-nov-21/estudio-contaminacion>

### RESUMEN

Este trabajo se centra en el estudio de la contaminación atmosférica por dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y materia particulada de 10 y 2.5 micras ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ), en las rotondas o plazas más transitadas de la ciudad española de Murcia. Las 5 plazas a estudio seleccionadas han sido la Plaza Circular, Cruz Roja e Ingeniero de la Cierva y la glorieta de unión entre Abenarabi-Juan Carlos I y Reino de Murcia-Juan Carlos I y se han ubicado alrededor de 80 puntos de medida en cada plaza siguiendo una estrategia de muestreo en forma de espiral. Los niveles de concentración de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en cada uno de esos puntos se han determinado a través del dispositivo portátil Flow 2.0. A partir de estos valores experimentales, mediante el software Surfer, se han elaborado mapas de concentración de cada día, plaza y compuesto, permitiendo evaluar el comportamiento y la distribución de los contaminantes, y, teniendo en cuenta los valores límite de exposición, se han identificado posibles zonas de riesgo, cuantificando el nivel excedido y proponiendo estrategias de mitigación. Por otro lado, con el fin de establecer un posible patrón de comportamiento para cada contaminante, se normalizan todos los datos de contaminación de cada plaza y se realiza un estudio

estadístico (ANOVA) comprobando la existencia, o no, de diferencias significativas entre las concentraciones. Finalmente, se ha analizado la contribución de las fuentes biogénicas, como los episodios de polvo sahariano, en la materia particulada.

**Palabras clave:** Dióxido de nitrógeno, materia particulada, contaminación atmosférica, contaminación urbana, plazas, exposición personal, mapeo.

## **STUDY OF ATMOSPHERIC POLLUTION IN THE MAIN SQUARES AND ROUNDABOUTS OF THE CITY OF MURCIA**

### **ABSTRACT**

This work focuses on the study of air pollution by nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) and particulate matter of 10 and 2.5 microns (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>), in the busiest roundabouts or squares of the Spanish city of Murcia. The 5 places selected for the study were Plaza Circular, Cruz Roja and Ingeniero de la Cierva and the roundabout between Abenarabi-Juan Carlos I and Reino de Murcia-Juan Carlos I. Around 80 measurement points were located in each square following a spiral sampling strategy. The concentration levels of NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at each of these points were determined using the Flow 2.0 portable device. From these experimental values, using the Surfer software, concentration maps were elaborated for each day, square and compound, allowing the evaluation of the behaviour and distribution of the pollutants, and, taking into account the exposure limit values, possible risk areas were identified, quantifying the level exceeded and proposing mitigation strategies. On the other hand, in order to establish a possible behaviour pattern for each pollutant, all the pollution data for each square were normalized and a statistical study (ANOVA) was carried out to verify the existence, or not, of significant differences between concentrations. Finally, the contribution of biogenic sources, such as Saharan dust episodes, to particulate matter was analyzed.

**Keywords:** Nitrogen dioxide, particulate matter, atmospheric pollution, urban pollution, squares, personal exposure, mapping.

### **INTRODUCCIÓN**

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales más importantes en la actualidad. El desarrollo exponencial de las zonas urbanas y el aumento de la emisión por fuentes estacionarias y móviles ha dado lugar a un crecimiento de los niveles de contaminantes en el aire. Dicha contaminación se representa principalmente por cuatro contaminantes: dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), materia particulada de diámetro equivalente inferior a 10 y 2.5 micras respectivamente (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y Ozono (Dédélé et al., 2019).

El tráfico es uno de los principales focos de contaminación en las ciudades. La emisión de PM y gases del propio escape del motor, la formación de contaminantes secundarios a partir de las emisiones primarias o la generación de polvo suspendido en el aire por el desgaste de los frenos,

neumáticos y de la superficie de carretera, son algunas de las formas en las que los vehículos contribuyen a la contaminación urbana. Por ello, autores como Harrison et al. en 2020 pusieron de manifiesto la necesidad de tener en cuenta la naturaleza de la ciudad, a la hora de gestionar la calidad del aire.

Durante este último año, el confinamiento domiciliario impuesto a causa de la pandemia por COVID-19 redujo significativamente la movilidad de la ciudadanía. Esto ofreció una oportunidad excepcional para comprobar la contribución de las actividades humanas, el tráfico o la producción industrial a la contaminación. Donzelli et al. en 2021 llevaron a cabo un estudio en la ciudad de Valencia, en el que se evaluaban los niveles de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> Y NO<sub>2</sub> en el periodo de confinamiento. Tras el análisis de los datos, se comprobó que las medidas de bloqueo supusieron una disminución significativa de las concentraciones de PM entre un 40 y 60% y de NO<sub>2</sub> entre un 35 y 67%. En otras ciudades, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub> llegaron a reducirse hasta en un 80% (He et al., 2021).

Desde el punto de vista de la salud humana, la contaminación atmosférica es responsable de una gran variedad de patologías (Szyszkowicz et al., 2020). Varios estudios han investigado la asociación entre la exposición a los contaminantes y enfermedades cardíacas o atópicas, inflamaciones, alergias, problemas respiratorios... tanto en niños como en adultos, e incluso problemas psicológicos.

Wang et al. en 2020 observaron que un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en un intervalo de tres días, incrementó las hospitalizaciones por neumonía en adultos, un 0,19% por PM<sub>10</sub> y 0,31% por PM<sub>2.5</sub>. Dédelé et al. en 2019 analizaron el porcentaje de personas con enfermedades alérgicas relacionadas con la exposición a PM<sub>10</sub>, siendo del 8,2%, y observaron una prevalencia de casos de alergia y un incremento en el riesgo con el aumento de PM<sub>10</sub>. Chen et al. en 2021 realizaron una investigación sobre la conjuntivitis, comprobando que los vasos sanguíneos y tejidos linfoides son afectados con facilidad por la contaminación del aire, especialmente por el NO<sub>2</sub>, aumentando así la posibilidad de inflamación de la conjuntivitis. Qibin et al. en 2019 con PM<sub>2.5</sub> y Greenberg et al. en 2017 con NO<sub>2</sub>, realizaron una evaluación de la exposición de estos contaminantes y la función de los pulmones en adultos con asma, encontrando que la exposición a elevadas concentraciones de estas sustancias aumentaba el riesgo de hospitalización por asma. Han et al. en 2021 confirmaron que existe una correlación positiva entre la exposición de contaminación del aire por tráfico y el asma infantil, ya que los resultados indicaban que la PM<sub>2.5</sub>, el NO<sub>2</sub> y el Benceno aumentaban el riesgo de desarrollar asma infantil.

Por último, se ha demostrado cómo la contaminación también puede influir en enfermedades psicológicas como la ansiedad, la depresión y el suicidio (Szyszkowicz et al. 2020). La PM<sub>2.5</sub> representa el contaminante con la mayor asociación significativa a los trastornos de salud mental. Chen et al. en 2021 investigaron la influencia que tienen varios factores económicos y el desarrollo urbano y ambiental de una ciudad sobre la ansiedad de la población. Tras analizar y controlar varios factores económicos como el PIB de la región, el precio promedio anual de las viviendas, el grado de urbanización... en el ámbito ambiental, la variable destacada fue el nivel de PM<sub>2.5</sub>, resultando el

contribuyente más significativo en los índices de ansiedad. Por otro lado, también se han encontrado evidencias que relacionan la  $PM_{10}$  con la agravación de la salud mental, concluyendo que una exposición a elevados niveles de  $PM_{10}$  intensifica la depresión en ancianos y el estrés mental (Jung et al., 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, la contaminación atmosférica constituye un riesgo evidente para la población. Por ello, es necesario implantar planes de control y medidas de mitigación que protejan la salud humana de los ciudadanos, además de una educación sanitaria de acciones preventivas adecuadas para ayudar a los ciudadanos vulnerables a afrontar esta situación (Chen et al., 2021). En España, como herramienta legislativa, se establece el Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire. En él, se define el Valor Límite Ambiental (VLA) de cada contaminante (Tabla 1), es decir, la concentración máxima permitida a la que un ciudadano puede estar expuesto sin suponer un riesgo para su salud (BOE, 2011).

**Tabla 1**

Valores límites ambientales establecidos en el Real Decreto 102/2011 (BOE, 2011).

Contaminante		Periodo de promedio	Valor Límite
<b>PM<sub>10</sub></b>	Valor límite anual	1 año	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Valor límite anual	1 año	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Valor límite horario	1 hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no puede superarse en más de 18 ocasiones por año
<b>NO<sub>2</sub></b>	Valor límite anual	1 año	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Nivel crítico	1 año	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

La finalidad de este proyecto es, por tanto, estudiar en detalle la contaminación atmosférica a causa del  $NO_2$ , la  $PM_{10}$  y la  $PM_{2.5}$  en las plazas y glorietas más transitadas de Murcia. En primer lugar, se seleccionarán las plazas y glorietas a estudiar de la ciudad de Murcia, atendiendo a los criterios de mayor densidad de tráfico, y se ubicarán los diferentes puntos de muestreo. A continuación, se elaborará una estrategia de muestreo adecuada que permita la medida de la concentración del  $NO_2$ , la  $PM_{10}$  y la  $PM_{2.5}$  en cada punto de la forma más representativa posible. Con los datos experimentales se elaborarán los mapas de concentración para cada plaza, día y contaminante con el fin de conocer los niveles de concentración, las características de dispersión y la evolución de los tres contaminantes en los espacios seleccionados, identificando, los principales focos de emisión y analizando los factores que influyen en su comportamiento como la radiación o la materia biogénica. Además, se realizará una normalización de los valores medidos y se aplicará un test estadístico ANOVA para evaluar la existencia, o no, de diferencias significativas entre los niveles de concentración medidos en los distintos días de muestreo para cada contaminante y poder establecer un patrón de comportamiento. Finalmente, se comprobarán si se superan los valores límite de exposición establecidos en la legislación (VLA) (BOE, 2011), de este modo, se establecerá si existe un potencial riesgo para la salud humana y se propondrán acciones de mejora para reducir los niveles de contaminación de las plazas y rotondas que sean necesarias.

## **MATERIAL**

### **Datos de tráfico**

El Servicio de Tráfico y Transporte del Ayuntamiento de Murcia ha proporcionado el informe de tráfico anual actualizado de la ciudad. En este documento se recopilan los datos de Intensidad Media de Tráfico Diaria (IMD) de todas las principales calles de Murcia. El registro del número de vehículos que pasa por cada calle se realiza mediante unas espiras electromagnéticas instaladas bajo el asfalto (Pyramid Consulting, 2018).

### **Flow 2.0, air pollution sensor**

Para medir los niveles de contaminación del aire, se utilizó el medidor portátil de calidad del aire Flow 2.0, versión v2018, diseñado por Plume Labs en colaboración con el estudio Frog (Plume Labs, s.f.a). Es capaz de medir, cada minuto, los índices de calidad del aire (AQI) y el nivel de concentración en el aire de diferentes contaminantes: dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en ppb (v/v) y Materia Particulada igual o inferior a 10, 2.5 y 1 micras (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>, respectivamente) en µg/m<sup>3</sup>.

Flow 2.0 debe estar vinculado a un teléfono móvil a través de una aplicación. Esto permite el seguimiento en tiempo real de los índices de calidad de todos los contaminantes en la pantalla del dispositivo mientras se registran en la plataforma junto con los niveles de concentración de aire medidos. Una vez finalizado el muestreo, todos los datos pueden exportarse en formato de hoja Excel a una cuenta de correo electrónico vinculada al dispositivo para su tratamiento. Este archivo excel contiene el AQI medido y las concentraciones de los contaminantes con su correspondiente fecha, hora y ubicación geográfica. (Plume Labs, s.f. b).

### **Software: Surfer, para Windows**

Se utilizó el programa informático "Surfer" para Windows, desarrollado por la empresa "Golden Software" para el modelado, análisis y elaboración de los mapas de concentración bi y tridimensionales y para el cálculo del área de riesgo en cada plaza (Surfer 8, 2002).

## **METODOLOGÍA**

### **Selección de plazas estudio**

Para la selección de las plazas a estudiar, con ayuda de los datos de tráfico, se comparan y se escogen las calles de mayor IMD, es decir, con el mayor número de vehículos que circulan por la calle en un día. Teniendo en cuenta que no se produce el mismo tránsito de vehículos cada día, se realiza un IMD semanal, este es una media de todos los días de la semana (Anexo I).

**Tabla 2**

Clasificación de las calles con mayor intensidad media diaria semanal de vehículos de Murcia.

<b>Calles</b>	<b>IMD Semanal</b>
Avenida Primero de Mayo I	35627
Avenida Reino de Murcia I	31748
Calle Floridablanca	27839
Avenida Teniente Flomesta	26273
Avenida General Primo de Rivera	25878
Ciudad de Almería	22888
Juan Carlos I	21889
Primero de Mayo	18914
Infante Juan Manuel	18414
Abenarabi	17725

Conociendo las calles con mayor IMD (Tabla 2), se comprueba si algunas de ellas contienen una plaza o afluyen a la misma glorieta. De esta forma, las cinco plazas elegidas para el estudio han sido: Plaza Circular, Plaza Abenarabi – Juan Carlos I, Plaza Cruz Roja, Plaza Reino de Murcia- Juan Carlos I y Plaza Ing. De la Cierva.

**Figura 1**

Localización de las plazas estudiadas en la ciudad de Murcia.



### **Estrategia de muestreo/Metodología de medida**

A la hora de ubicar los puntos de medida y la estrategia de muestreo en cada plaza, teniendo en cuenta la geometría de las plazas, la forma más eficaz de medir es en forma de espiral desde el interior hacia el exterior de la plaza. El muestreo se inicia en el centro de la plaza (punto 1) y se va rodeando hasta llegar al anillo exterior, de este modo se consigue medir de forma casi simultánea en toda la plaza y obtener unas medidas lo más representativas posibles y distribuidas homogéneamente.

Cada plaza se midió en tres ocasiones a la misma hora y el mismo día de la semana para mantener un mayor control y homogeneidad en el flujo de vehículos, coincidiendo con el momento en que el tráfico tenía mayor incidencia. Además, se evitaron periodos festivos y condiciones atmosféricas adversas como viento intenso, humedad o lluvia.

La humedad y lluvia desplaza los contaminantes al suelo, obteniendo un valor menor del

esperado y el viento desplaza los contaminantes en la dirección predominante provocando un perfil más concentrado en la zona donde se orienta el viento y menor en la que no, independientemente del comportamiento dispersivo o de las características de emisión. También se han evitado gasolineras en las proximidades, ya que según Morales Terrés et al. en 2010 las gasolineras son una fuente importante de contaminantes VOCs que pueden alterar los valores de concentración en un radio en torno a 40 metros de diámetro.

Las medidas se realizaron durante los meses de febrero y marzo, ya que, junto con octubre y noviembre, son los meses más representativos de la situación media anual (Durán et al, 2020). En este periodo se consigue evitar temperaturas excesivamente elevadas, que se produzca con mayor frecuencia la inversión térmica y el cielo suele estar despejado, con poca probabilidad de precipitaciones y el viento en calma.

En base a los criterios descritos anteriormente, se establecen los puntos de muestreo para las cinco plazas (Figura 2) y la planificación para las medidas de las plazas, en función del día y la hora de mayor densidad de tráfico (Tabla 3).

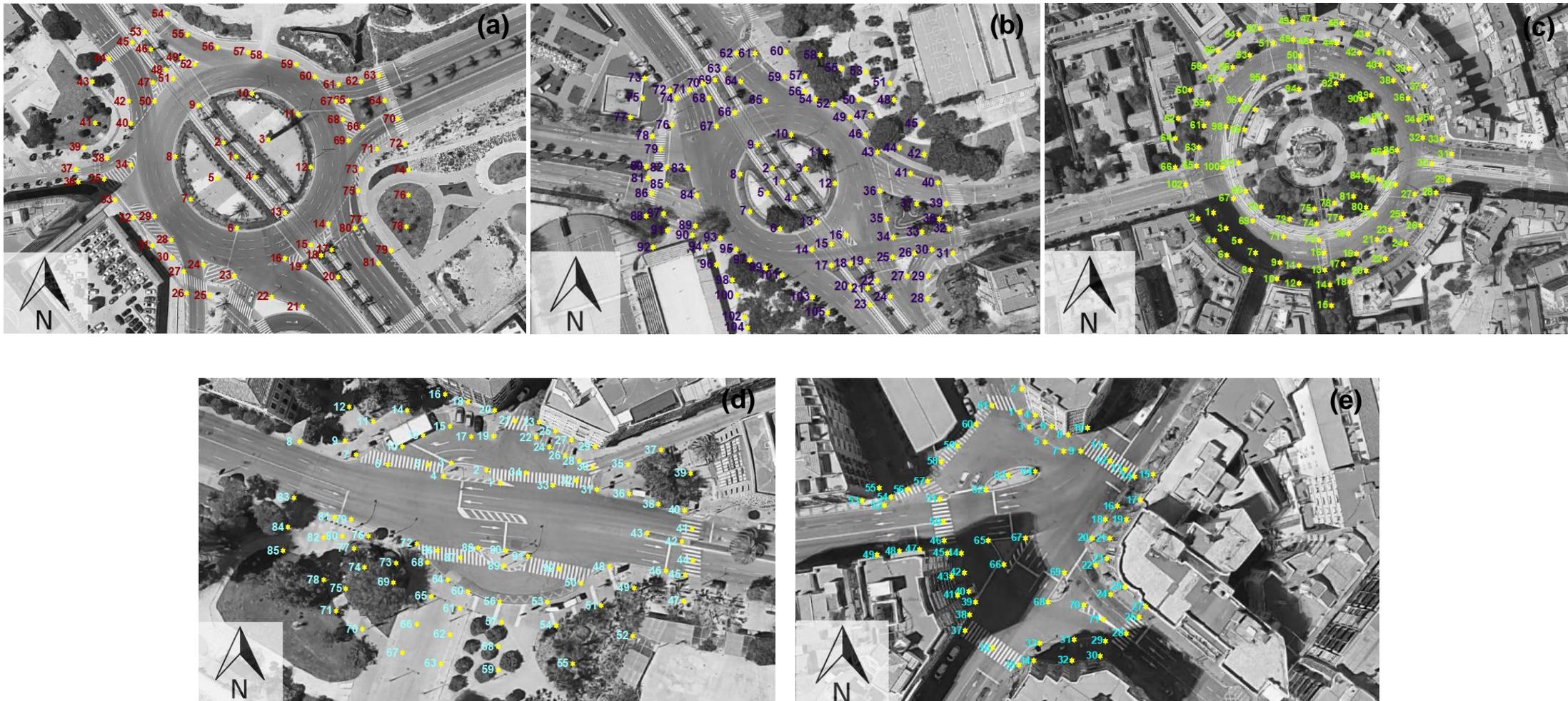
**Tabla 3**

Plan de medida de las plazas.

Horario	Plaza
Lunes 8 AM	Plaza Reino de Murcia- Juan Carlos I
Martes 8AM	Plaza Abenarabi – Juan Carlos I
Miércoles 2PM	Plaza Cruz Roja
Jueves 8AM	Plaza Ing. De la Cierva
Viernes 2PM	Plaza Circular

**Figura 2**

Ubicación de los puntos de muestreo de la plaza Reino de Murcia –JCI (a), Abenarabi – JCI (b), Plaza Circular (c), Plaza Cruz Roja (d) y Plaza Ingeniero de la Cierva (e).



## Elaboración de mapas de concentración

Los mapas concentración de NO<sub>2</sub> y PM de 10 y 2.5 micras se han elaborado a partir de las medidas de los niveles de los contaminantes obtenidas con los dispositivos Flow 2.0 empleando el programa informático Surfer.

Inicialmente, se parte de un plano de la plaza a estudiar, obtenido desde el satélite de Google Maps, sobre el que se sitúan los puntos de muestreo, de modo que cada punto tendrá un valor de coordenadas espaciales X e Y determinadas y un valor experimental de contaminante. A partir de esta información, el programa elabora una malla regular sobre el plano con un número de celdillas y dimensiones fijos, dependiendo del número de intervalos en los que se dividan los ejes X e Y. Cada nodo de la malla creada tendrá un valor de concentración de contaminante, interpolado a partir de los valores experimentales medidos en la plaza según el método matemático definido previamente en Surfer y permitirá la elaboración de un mapa de concentración de contorno bidimensional y/o tridimensional compuesto por diferentes superficies de igual valor de nivel de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Para este estudio, se aplica el método de interpolación "Radial Basic Multiquadatic". Este modelo establece que la concentración varía linealmente con la distancia desde un foco en dirección radial, moderando la unión entre nodos de igual concentración, mediante un parámetro R. Así, para n puntos de muestreo, la concentración interpolada para cada uno de los nodos de la malla viene dada por la siguiente expresión:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{C_i}{\sqrt{h_{ij}^2 + R^2}}}{\frac{1}{\sqrt{h_{ij}^2 + R^2}}} \text{ Eq.1}$$

Donde:

*C*: Valor de concentración interpolado para un nodo de la malla regular (predicción).

*C<sub>i</sub>*: Valor de concentración medido en el *i* de muestreo adyacente.

*h<sub>ij</sub>*: Distancia entre el nodo de la malla y el dato asociado al punto *i* medido.

*n*: Número total de puntos de medida.

*R*: Parámetro de unión entre nodos de igual concentración

Con esta metodología se elaborarán dos tipos de mapas. Por un lado, se obtendrán mapas de concentraciones de contorno bidimensional para todas las plazas estudiadas, representando los valores de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> medidos en ppb v/v y µg/m<sup>3</sup> y, en algunos casos, los valores normalizados. Y, por otro lado, mapas de concentraciones tridimensionales de aquellas plazas que presenten una distribución simétrica-radial de los contaminantes con la intención de verificar la existencia de un perfil parabólico-radial de concentración.

En la representación de los mapas se ha empleado escalas de colores, asociando cada color con un valor de concentración, esto facilita visualizar las diferentes zonas y focos, y conocer cualitativamente los niveles de concentración. Para cada contaminante, la escala y su viraje se limita

en distinto valor (Tabla 4).

**Tabla 4**

Escala de colores de los diferentes contaminantes utilizada en los mapas de concentración.

NO <sub>2</sub> (ppb)		PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	
0	Blanco	0	Blanco	0	Blanco
10	Azul	10	Azul	5	Azul
30	Verde	30	Verde	10	Verde
70	Amarillo	50	Amarillo	15	Amarillo
110	Rojo	80	Rojo	20	Rojo
150	Lila	120	Lila	25	Lila
180	Negro	150	Negro	30	Negro

Nota. Los valores en rojo representan los valores límites diarios establecidos por el Real Decreto 102/2011, estos se han tomado como referencia para el cálculo de la Superficie de riesgo.

### Normalización de los valores de concentración y estudio estadístico ANOVA

Cada semana, el rango de valores de contaminante que se obtiene para un mismo contaminante y en la misma plaza es diferente debido a los numerosos factores que influyen en el estudio. Por ello, se realiza una normalización de los datos de concentración de los contaminantes obtenidos en las mediciones, ajustando los datos experimentales en diferentes escalas respecto a una escala común, y, posteriormente, se aplica un estudio estadístico ANOVA para evaluar cuantitativamente la similitud de las medidas de concentración obtenidas entre los tres días de medición.

#### Normalización por Máximos y Mínimos:

El ajuste de las concentraciones (C) se hace a partir de los valores máximo (C<sub>max</sub>) y mínimo (C<sub>min</sub>) registrado en las diferentes semanas. Este cálculo se basa en una escala [0, 1], el máximo representa el 1 y el mínimo el 0, mediante la siguiente ecuación se calcula el valor de cada concentración adaptada a dicha escala (C<sub>N<sub>max/min</sub></sub>):

$$C_{N_{max/min}} = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad \text{Eq.2}$$

#### Normalización por Percentil 90 y 10:

La normalización se lleva a cabo mediante la asignación de percentiles 10 (C<sub>per10</sub>) y 90 (C<sub>per90</sub>). Los percentiles 10 y 90 se definen como el valor de la variable que deja inferiores o iguales a estos las 10/100 ó 90/100 respectivamente (Arduy et al., 1993). En este caso, para adaptar las concentraciones (C) se hará uso del percentil 90 y 10. Este método, se utiliza cuando se encuentran anomalías o picos de valores máximos y mínimos (outlayers) que pueden afectar a la comparación de los datos al distorsionar en exceso la distribución de los niveles. Este cálculo no se basa en una escala de números enteros, sino [ $<0$ ,  $>1$ ], debido a los valores no incluidos, y los valores de C<sub>N<sub>Per</sub></sub> se obtienen de análoga a C<sub>N<sub>max/min</sub></sub> con siguiente expresión:

$$C_{NPER} = \frac{C - C_{PER10}}{C_{PER90} - C_{PER10}} \quad \text{Eq.3}$$

Una vez calculados los distintos valores de concentración normalizada se aplica el estudio estadístico ANOVA (análisis de varianza de un factor) para las tres semanas. El test ANOVA proporciona un factor F de Fisher-Snedecor y un valor crítico de F en función de las características de nuestros datos, de modo que si  $F \leq F_{crítico}$  no hay diferencias significativas entre las medidas y, por el contrario, si  $F > F_{crítico}$  existen diferencias significativas.

### **Determinación de la superficie de riesgo de exposición/Cálculo del porcentaje de superficie superior al valor límite de referencia**

Dentro de las plazas estudiadas, algunos focos alcanzan valores que exceden el valor límite establecido en la legislación. Para evaluar el riesgo de exposición de los ciudadanos a NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, se va a determinar qué porcentaje del área total muestreada en cada plaza excede los valores límite de exposición de 110 ppb v/v para NO<sub>2</sub>, 80 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> y 20 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub>.

A partir de los mapas de isoconcentraciones bidimensionales, el programa Surfer permite obtener la distribución superficial de concentraciones de la zona evaluada. El software opera entre un valor de concentración del contaminante que introduce el usuario, en este caso 110 ppb v/v para NO<sub>2</sub>, 80 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> y 20 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub>, y los dos valores de concentraciones límite (mínimo y máximo) contenidos en la que malla que ha sido creada previamente. Así el programa proporciona dos superficies: la comprendida entre la concentración límite inferior y la introducida por el usuario y la restante, esto es, la incluida entre el valor introducido y la máxima, que será el área de riesgo en este estudio, de forma que la suma de estas dos áreas es la superficie total evaluada (Durán et al., 2020).

$$A_T = A_{i-n} + A_{i-0} \quad \text{Eq.4}$$

Siendo n el valor máximo del contaminante estudiado en cada muestreo (ppb v/v o µg/m<sup>3</sup>) e i el valor límite de exposición del contaminante estudiado.

Finalmente, tras conocer el área total de la malla y el área correspondiente a todas las zonas que presentan valores iguales o superiores a los valores límite de exposición, se calcula el porcentaje de área expuesta al valor de riesgo de referencia:

$$\%Sup_{riesgo} = \frac{\text{ÁreaValorLímite-MaxValor}}{\text{ÁreaTotal}} 100 \quad \text{Eq.5}$$

El procedimiento se aplicará a todas las plazas y a cada semana por separado. En el momento que en una de las semanas se obtenga un porcentaje de área con niveles superiores al valor límite de exposición, se asumirá que existe riesgo para los residentes y esa plaza se catalogará como zona de riesgo.

## **Análisis de la materia particulada: cálculo de la contribución de materia biogénica y polvo sahariano**

En la primera semana de medida, se presenciaron concentraciones muy elevadas de  $PM_{10}$  que se asociaron a un episodio de polvo sahariano. Dada la influencia de este fenómeno en la Materia Particulada, se ha analizado en detalle la composición de este contaminante, tanto cualitativamente mediante la comparación de los mapas de concentración de las tres semanas de medida, como cuantitativamente como se expone a continuación.

El polvo sahariano forma parte de la materia biogénica presente en el aire. Esta, a su vez es un tipo de materia particulada de gran tamaño. Por tanto, es posible obtener la concentración de materia biogénica que forma parte de la  $PM_{10}$  por diferencia de los valores experimentales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ :

$$\text{Materia Biogénica} = PM_{10} - PM_{2.5} \quad \text{Eq.6}$$

Se representan los datos medidos de concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  y los valores calculados de Materia Biogénica y se realiza un ajuste polinómico obteniendo una ecuación que describe la concentración de estos compuestos durante las tres semanas de medida.

$$PM_{10}, PM_{2.5}, \text{Materia Biogénica} = P_6(x) \quad \text{Eq.7}$$

A continuación, se debe estimar el valor de fondo de la Materia Biogénica, que representa la contribución de otras fuentes de tipo biogénico diferente del polvo sahariano. Para ello, se selecciona el rango de datos correspondiente a los niveles de concentración más bajos y estables, y se ajustan a un modelo de tendencia lineal, de forma que:

$$\text{Valor de fondo} = F(x)_{\text{lineal}} = ax + b \quad \text{Eq.8}$$

Finalmente, se calculan los valores de concentración de polvo sahariano para cada punto y día por diferencia entre la ecuación polinómica que representa la Materia Biogénica y la ecuación lineal del valor de fondo. Y se cuantifica la proporción que representa el polvo sahariano en la Materia Biogénica y en el contaminante  $PM_{10}$ , mediante la aplicación del cálculo de áreas por integral definida.

$$\text{Polvo Sahariano} = \text{Materia Biogénica}(P_6(x)) - \text{Valor de fondo}(F(x)) \equiv P_6(x) \quad \text{Eq.9}$$

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Mapas de niveles concentración de contaminantes**

A la hora de estudiar los mapas de concentraciones de forma exhaustiva, por un lado, se analiza cualitativamente para cada contaminante, semana y plaza, la influencia de los siguientes factores en los valores de contaminación:

1. Dispersión radial, estimando la distancia de seguridad (distancia entre el valor de concentración más álgido en la rotonda hasta que se alcanza el valor de fondo).
2. Cruces o calles.
3. Focos puntuales (semáforos, paradas de autobús...).
4. Sumideros (vegetación, parques...).
5. Situaciones anómalas.
6. Distribución e intensidad de tráfico.
7. Dispersión muy buena (alta densidad de tráfico, pero poca contaminación).

Por otro lado, se determinará cuantitativamente la existencia o no de un patrón de comportamiento de los contaminantes en cada plaza, en función del parámetro F obtenido tras comparar las medidas de contaminación normalizadas mediante el test estadístico ANOVA (Tabla 5). Observando los parámetros F de sendos métodos se observa que, si se aplica la normalización por percentiles, en la mayoría de casos, no existen diferencias significativas entre las medidas, debido a que se excluyen los focos puntuales o valores anómalos.

**Tabla 5**

Resultados de la normalización y aplicación el test ANOVA.

Plaza	Cont.	F Crítico	F (Per)	F(máx/min)	Dif sig (Per)	Dif sig (máx/min)
Reino Murcia-JC I	NO <sub>2</sub>	3,033	3,502	19,649	Si	Si
	PM <sub>10</sub>	3,033	1,807	106,227	No	Si
	PM <sub>2.5</sub>	3,033	2,776	65,424	No	Si
Abenarabi-JC I	NO <sub>2</sub>	3,025	1,826	9,171	No	Si
	PM <sub>10</sub>	3,025	0,908	85,482	No	Si
	PM <sub>2.5</sub>	3,025	1,501	25,352	No	Si
Plaza Cruz Roja	NO <sub>2</sub>	3,029	4,584	44,018	Si	Si
	PM <sub>10</sub>	3,029	4,506	61,293	Si	Si
	PM <sub>2.5</sub>	3,029	2,784	4,202	No	Si
Plaza Ing. De la Cierva	NO <sub>2</sub>	3,039	3,397	2,710	Si	No
	PM <sub>10</sub>	3,039	1,958	0,671	No	No
	PM <sub>2.5</sub>	3,039	2,253	24,701	No	Si
Plaza Circular	NO <sub>2</sub>	3,026	3,324	31,375	Si	Si
	PM <sub>10</sub>	3,026	1,355	4,922	No	Si
	PM <sub>2.5</sub>	3,026	0,377	3,321	No	Si

Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)*Plaza Reino Murcia-JC1*

Comparando los tres mapas de la Figura 3 se visualizan discrepancias sobre todo en la

segunda semana. En la Figura 3. b, la distribución es más irregular, una concentración prácticamente nula en la parte superior y un foco de concentración que excede el límite permitido en la parte inferior. Este foco también se observa en la tercera semana y se puede deber a la presencia de semáforos y a los accesos de la calle Juan Carlos I, muy transitada (Tabla 2). Por otro lado, se observa una dispersión radial parcial en la Figura 3. b cuya distancia de seguridad es aproximadamente, de 7.5 metros. En la Tabla 5 el valor de F obtenido por ambos métodos es superior al valor crítico,  $F(\text{per}) = 3,502$  y  $F(\text{máx}/\text{min})=19,649$ , corroborando que las discrepancias encontradas en las medidas son importantes, de modo que se puede afirmar que no existe un patrón de comportamiento en la distribución del contaminante.

#### *Plaza Abenarabi-JC1*

Lo más destacable de estos mapas es la dispersión radial parcial observada en la Figura 4. b, donde la distancia de seguridad es aproximadamente de 5 metros. Por otro lado, aparentemente, las medidas guardan una relación en la distribución de los contaminantes: el contaminante tiende a acumularse en la zona este de la rotonda, lo cual se aprecia con mayor claridad en la Figura 4. a y en la 4 c, donde los niveles de concentración son aún mayores. Este comportamiento se debe a la influencia de los cruces y accesos a calles y a la presencia de semáforos. No obstante, en la segunda semana de medida aparece una clara diferencia con respecto a las otras dos: en la parte noroeste de la glorieta se observa un gran aumento en la concentración, llegando a superar los valores límites establecidos, a consecuencia de un atasco provocado por el tranvía que sucedió de forma anómala en el momento del muestreo. Esto explica los valores obtenidos para el valor de F del estudio ANOVA (Tabla 5), por el método de máximos y mínimos existen diferencias significativas ( $F(\text{máx}/\text{min})=9,171$ ), sin embargo, por el método de los percentiles ( $F(\text{per})=1,826$ ), esta anomalía se corrige concluyendo que las diferencias en las medidas no son sustanciales, confirmando la tendencia de acumulación del contaminante en la dirección este.

#### *Plaza Cruz Roja*

El contaminante se comporta de forma diferente cada semana debido a la geometría anómala de esta glorieta (Figura 5). Se asemeja mucho a una calle, por lo que el estudio de estructura radial no es aplicable a este caso. Se contemplan focos puntuales asociados a semáforos y en zonas de acceso a la calle y una caída de los niveles de concentración en la zona inferior por influencia de la vegetación, aunque, en la Figura 5.b, la parte inferior también alcanza una concentración superior al valor límite establecido. En la Tabla 5 se comprueba que el valor de F es mayor al valor crítico ( $F(\text{per})=4,584$  y  $F(\text{máx}/\text{min})=44,018$ ), los focos particulares presentados en las distintas semanas son bastante relevantes, por lo que, la distribución del contaminante es muy irregular y no es posible encontrar un modelo de comportamiento.

#### *Plaza Ingeniero de la Cierva*

En este caso, la glorieta presenta una geometría totalmente cerrada haciendo que factores como la

dirección del viento o las calles de alrededor tengan una influencia crucial en la dispersión de los contaminantes (Figura 6). Es de mayor importancia, conocer si alguna de estas calles se considera como “calle cañón”, caracterizadas por presentar una relación entre su anchura (A) y la altura de los edificios (H) del tipo  $A/H < 1$ , lo que genera graves problemas de dispersión, entre otros. Teniendo en cuenta las dimensiones de la calle central de esta glorieta, la calle Floridablanca ( $A/H=0.80$ ), efectivamente, se define como calle cañón y va a provocar diferencias notables en el comportamiento del contaminante. En los tres mapas se observa una fuerte influencia por el acceso a calles y por la presencia de semáforos, estos factores se intensifican en la Figura 6. b, donde se puede ver que incluso se sobrepasan los valores límite. Algo a resaltar, es la existencia de un valle de concentración en la zona central de la plaza los tres días de medida. En la Tabla 5 se obtiene que para el caso percentil si existe una diferencia significativa entre las medidas ( $F(\text{per})=3,397$ ), pero en la normalización por máximo y mínimo no ( $F(\text{máx}/\text{mín})=2,710$ ), esto puede deberse a que la distribución de los valores se aproxima más a los extremos o valores álgidos y al valle en la zona central de la plaza, por lo que en el percentil se toma como zona de rechazo parte importante de los valores.

#### Plaza Circular

En la Figura 7, el  $\text{NO}_2$  presenta diferentes niveles de concentración y una dispersión irregular durante los tres días de medida, aunque se visualiza una distribución radial clara con una distancia de seguridad de 5,5 m (Figura 7 c). Numéricamente, se confirma que las diferencias entre las semanas son significativas, ya que el valor de F, en los dos métodos, es superior al valor crítico ( $F(\text{per})=3,324$  y  $F(\text{máx}/\text{mín})=31,375$ ) (Tabla 5). Esta desigualdad de comportamiento se debe a la acumulación de tráfico a lo largo de la plaza por la presencia de semáforos y las numerosas entradas y salidas con las que cuenta esta glorieta, ya que, por su ubicación y accesibilidad, es una de las más transitadas de la ciudad de Murcia. Esto puede provocar niveles de contaminación bastante elevados casi en la totalidad de la plaza (Figura 7 a).

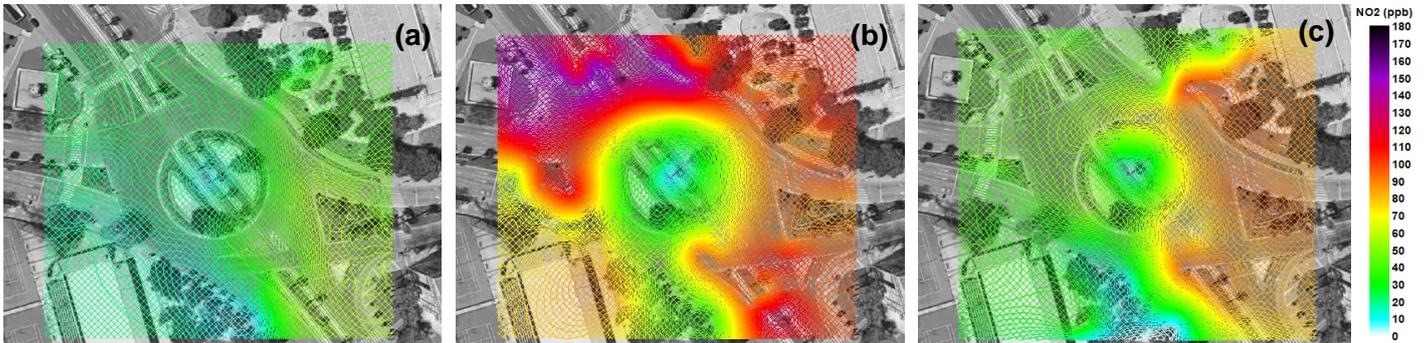
#### Figura 3

Mapa de concentración de  $\text{NO}_2$  de la plaza Reino de Murcia – JCI. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



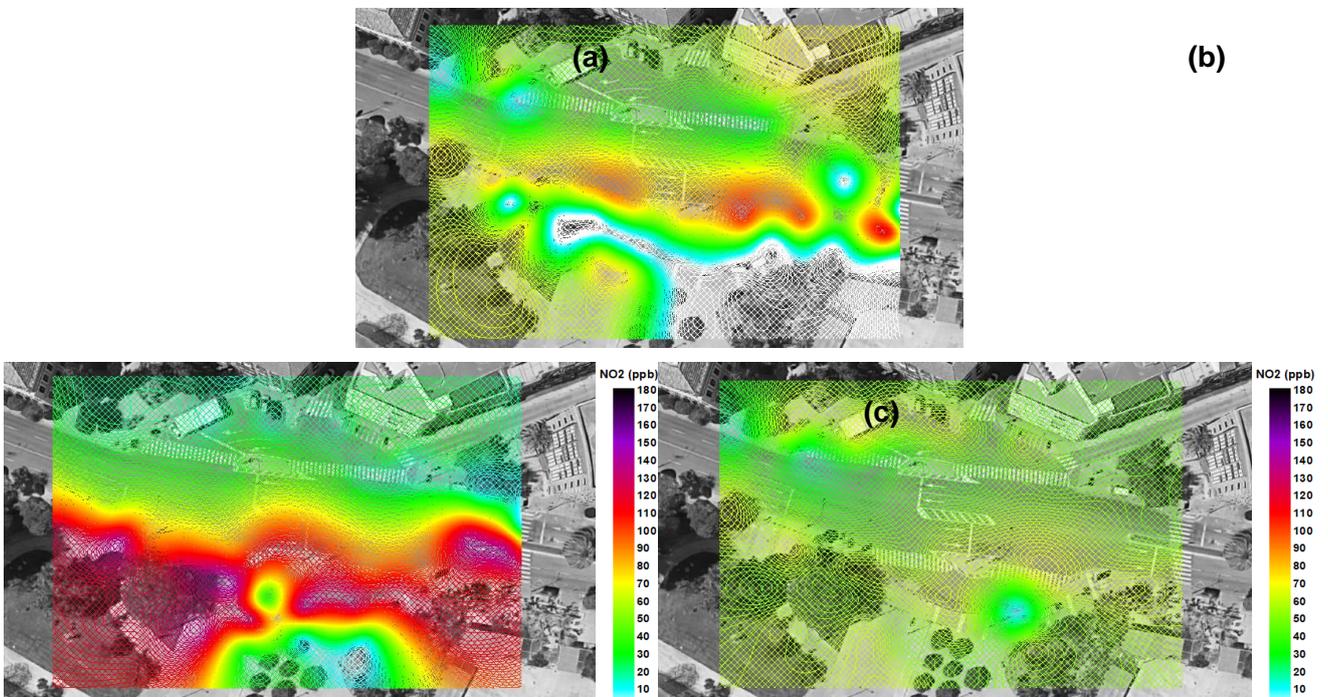
**Figura 4**

Mapa de concentración de NO<sub>2</sub> de la plaza Abenarabi – JCI. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



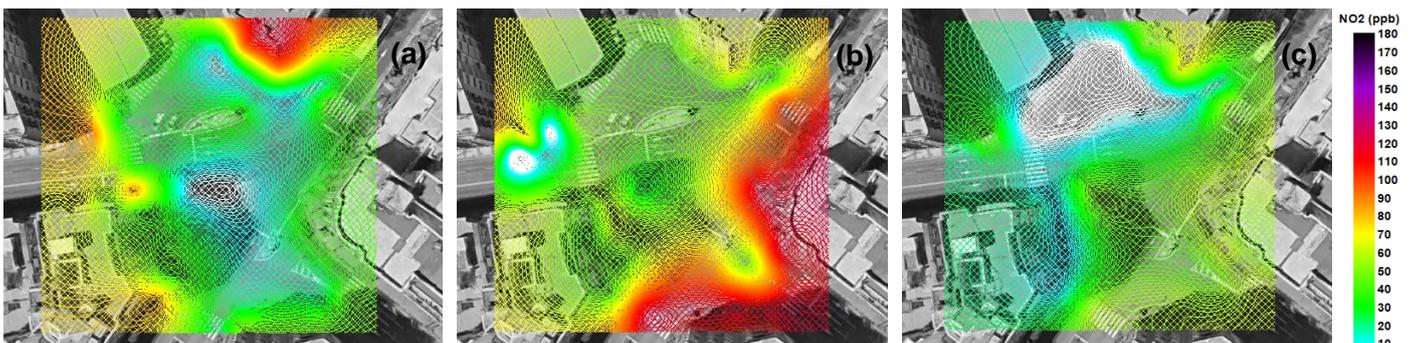
**Figura 5**

Mapa de concentración de NO<sub>2</sub> de la plaza Cruz Roja. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



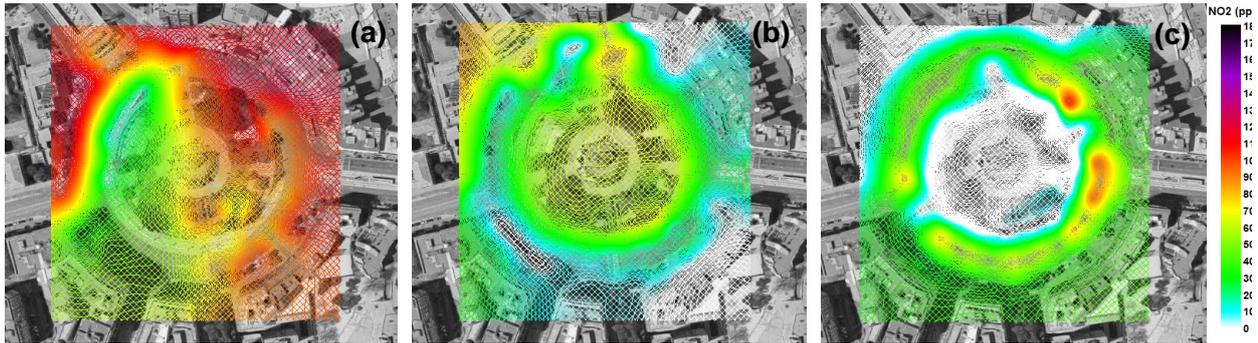
**Figura 6**

Mapa de concentración de NO<sub>2</sub> de la plaza Ingeniero de la Cierva. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



**Figura 7**

Mapa de concentración de NO<sub>2</sub> de la plaza Circular. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



El NO<sub>2</sub>, está favorecido por la radiación solar, por lo que conocer el valor de este parámetro y la estabilidad que presentaba la atmósfera los días de muestreo es de gran importancia y puede ayudar a entender mejor el comportamiento de este contaminante:

**Tabla 6**

Estabilidad y radiación solar durante el periodo de muestreo.

Plaza	Día de medida	Hora	Rad. solar (W/m <sup>2</sup> )	Estabilidad Atm.
Reino de Murcia - JCI	Sem 1: 01/03/2021	9:00	16	D
	Sem 2: 15/03/2021	9:00	69	D
	Sem 3: 12/04/2021	9:00	56	D
Abenarabi - JCI	Sem 1: 02/03/2021	9:00	29	D
	Sem 2: 16/03/2021	9:00	56	D
	Sem 3: 13/04/2021	9:00	19	D
Plaza Cruz Roja	Sem 1: 03/03/2021	14:00	145	D
	Sem 2: 17/03/2021	14:00	814	A
	Sem 3: 14/04/2021	14:00	360	B
Plaza Ing. de la Cierva	Sem 1: 04/03/2021	9:00	59	D
	Sem 2: 18/03/2021	9:00	76	D
	Sem 3: 22/04/2021	9:00	41	D
Plaza Circular	Sem 1: 05/03/2021	14:00	212	B
	Sem 2: 16/04/2021	14:00	858	A
	Sem 3: 30/04/2021	14:00	764	A

Nota. Para Plaza Reino de Murcia – JCI, Plaza Abenarabi – JCI, Plaza Cruz Roja, Plaza Ing. de la Cierva se comprueba que la semana con mayor radiación solar coincide con la semana con mayores

concentraciones, tal y como se esperaba.

### Materia Particulada de 10 micras (PM<sub>10</sub>)

#### *Plaza Reino Murcia-JC1*

En la Figura 8, durante la primera semana se observa unos valores de concentración de PM<sub>10</sub> mucho más elevados, sobrepasando los límites permitidos en la mayoría de la superficie de la plaza. Esto es debido a la presencia de polvo sahariano. No obstante, en los tres mapas se observa una distribución similar del contaminante. Aunque en la Figura 8. b y c, los niveles de contaminación son más bajos, se identifican algunos focos puntuales, como semáforos que provocan un aumento de la concentración en ciertas zonas llegando sobrepasar el valor límite establecido de 80 µg/m<sup>3</sup> (rojo). Por último, teniendo en cuenta que el valor de  $F(\text{per})=1,807$  (Tabla 5) es menor que el valor crítico, se concluye que la diferencia tan evidente que se observa en las concentraciones de la Figura 8.a a priori, no son tan significativas tras la normalización de los datos, e incluso, se puede establecer que existe un patrón de comportamiento.

#### *Plaza Abenarabi-JC1*

Al igual que en el caso anterior, la primera semana presenta unos valores de contaminación muy superiores a las otras dos a consecuencia de un episodio de polvo sahariano (Figura 9 a), una aportación que hace que el valor límite permitido se supere con creces en esta plaza. Las otras dos medidas tienen un comportamiento similar, tanto en la distribución como en los valores de concentración, presentan algunos focos puntuales de semáforos o por influencia de los cruces. Otro factor que remarcar es la afectación de la vegetación, ya que en las zonas verdes la disipación de los contaminantes es mayor. El valor de  $F(\text{per})=0,908$  justifica que no existen diferencias significativas entre las semanas, y el valor de  $F(\text{máx}/\text{min})=85,482$  pone de manifiesto la importancia que tiene para esta glorieta tanto los semáforos como las zonas de vegetación (Tabla 5).

#### *Plaza Cruz Roja*

Para la Plaza de la Cruz Roja, la medida con mayor diferencia se obtuvo en la primera semana (Figura 10 a) a consecuencia del episodio de polvo sahariano. Se superaron los valores límite establecidos prácticamente en la totalidad de la plaza. Se observan focos por la influencia del acceso a la calle principal y por la presencia de semáforos, que provocan acumulación de tráfico de forma puntual llegando a ser muy intensa (Figura 10 c). Es importante destacar los sumideros en los niveles de contaminación y la buena dispersión gracias a de las zonas de vegetación. En la Tabla 5, se confirma que las diferencias entre las medidas no son solamente visuales o cualitativas, sino que numéricamente son significativas, ya que, el valor de  $F$ , en los dos métodos, supera el valor crítico ( $F(\text{per})=4,506$  y  $F(\text{máx}/\text{min})=61,293$ ).

#### *Plaza Ingeniero de la Cierva*

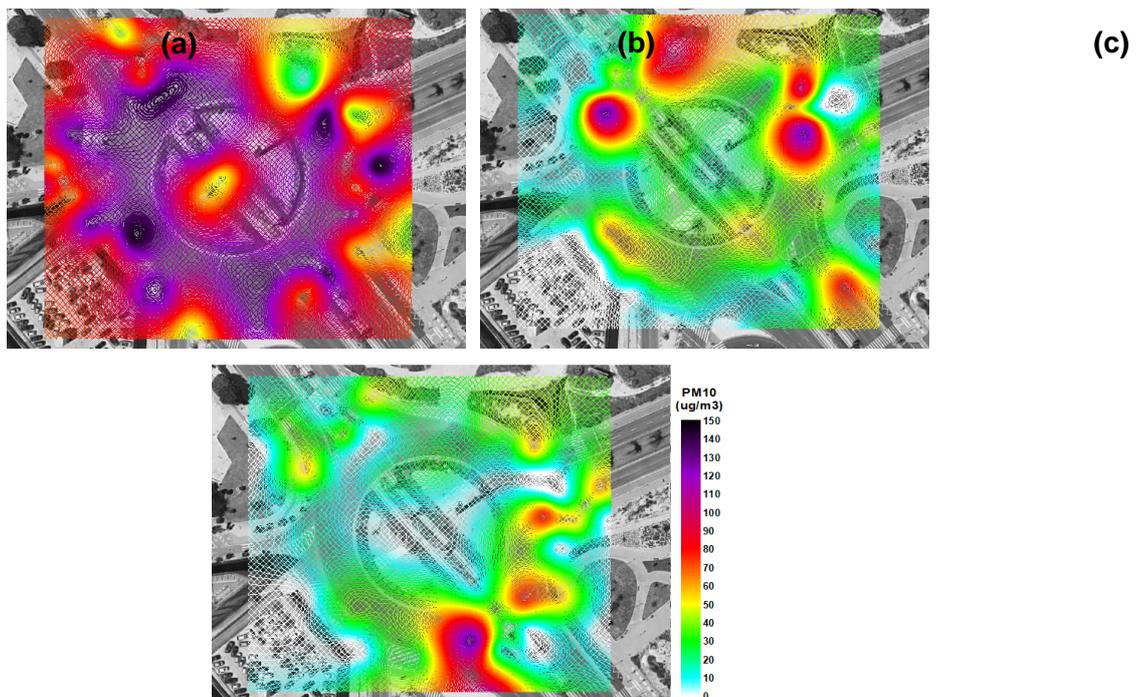
Al igual que ocurría con el contaminante  $\text{NO}_2$  (Figura 6), la geometría totalmente cerrada de esta plaza va a provocar una enorme aleatoriedad en la distribución del contaminante que se verá influido por la dirección del viento y por las calles de alrededor. Cada semana presenta focos de concentración en distintas zonas, dependiendo de la dispersión de los contaminantes generados por la acumulación de tráfico que se produce en los semáforos o los accesos a la plaza (Figura 11). En la Tabla 5, se contempla que el valor  $F$  es menor que el valor crítico ( $F(\text{per})=1,958$  y  $F(\text{máx}/\text{min})=0,671$ ) por lo que se puede establecer la existencia de un patrón entre las medidas a pesar de la irregularidad en el flujo del tráfico de vehículos.

### Plaza Circular

En este caso, la presencia de polvo sahariano en la Figura 12. a, se contempla de forma muy clara alrededor de toda la plaza, haciendo que la concentración de materia particulada sea mucho mayor que para las otras dos semanas. En las tres medidas se puede contemplar una dispersión radial, siendo las distancias de seguridad de 8 m para Figura 12. a, de 4.6 m para la Figura 12b y de 3 m en la Figura 12. c, de 3 m. Los focos observados se deben a la presencia de semáforos y a las paradas de autobuses ubicados en la periferia de la rotonda. Además, durante los días de muestreo, se advirtió que los vehículos realizaban paradas en doble fila con mucha frecuencia a lo largo de toda la plaza, lo que contribuye al patrón de concentraciones observado. Atendiendo a la Tabla 5 se puede confirmar que las diferencias entre las semanas no son significativas, ya que el valor de  $F(\text{per})=1,355$  es menor al valor crítico.

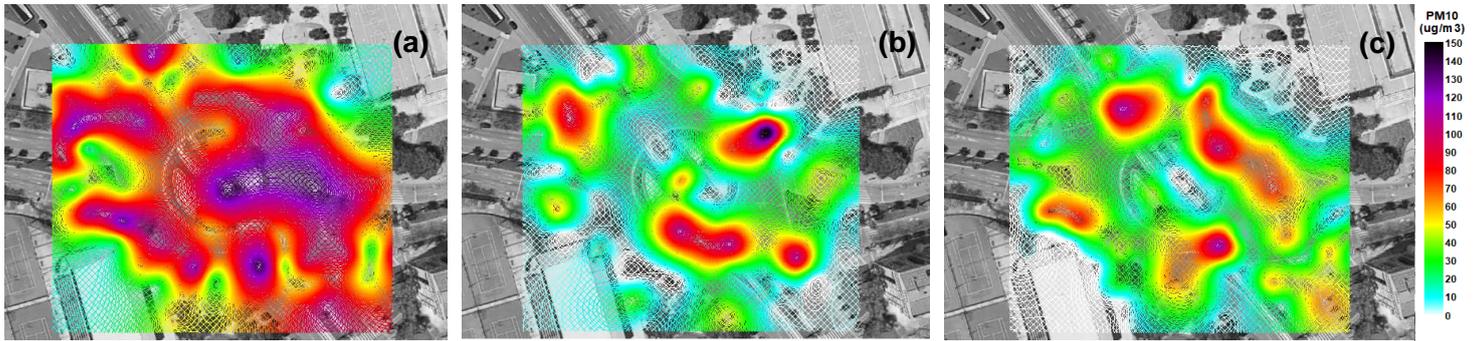
### Figura 8

Mapa de concentración de  $\text{PM}_{10}$  de la plaza Reino de Murcia – JCI. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



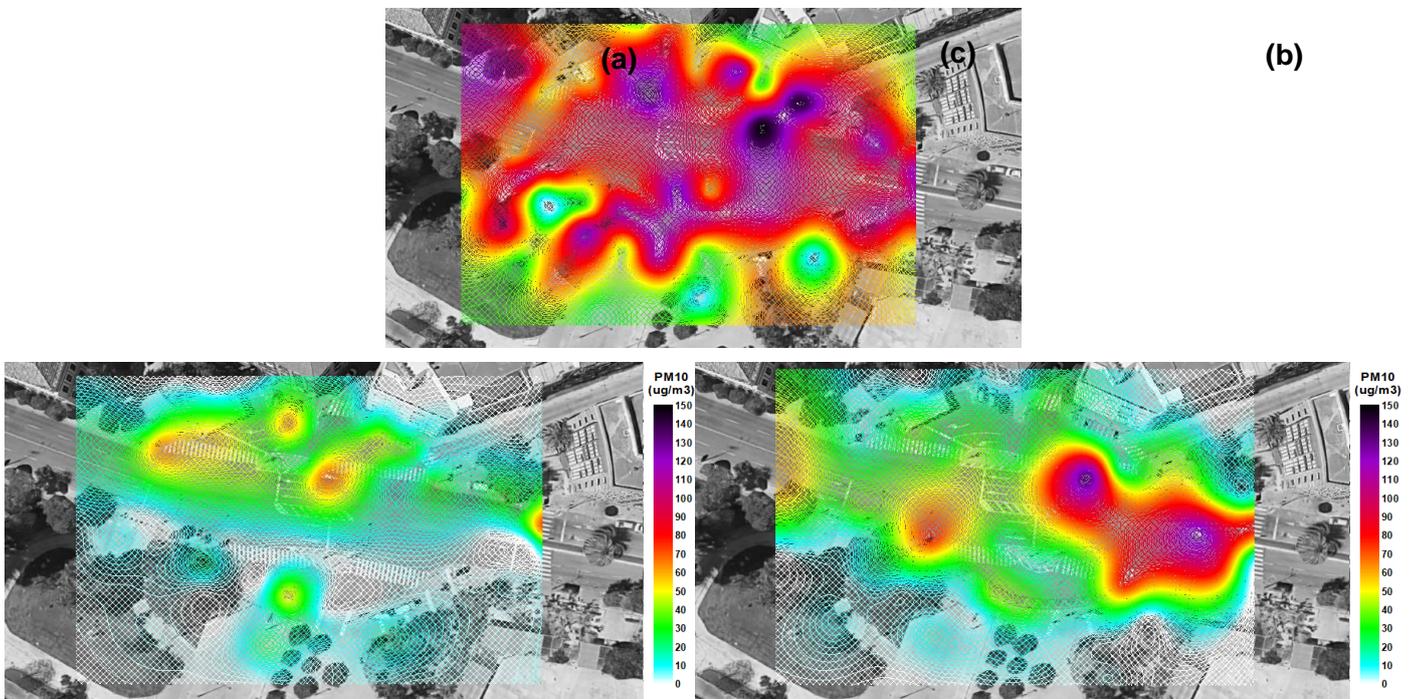
**Figura 9**

Mapa de concentración de PM<sub>10</sub> de la plaza Abenarabi – JCI. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



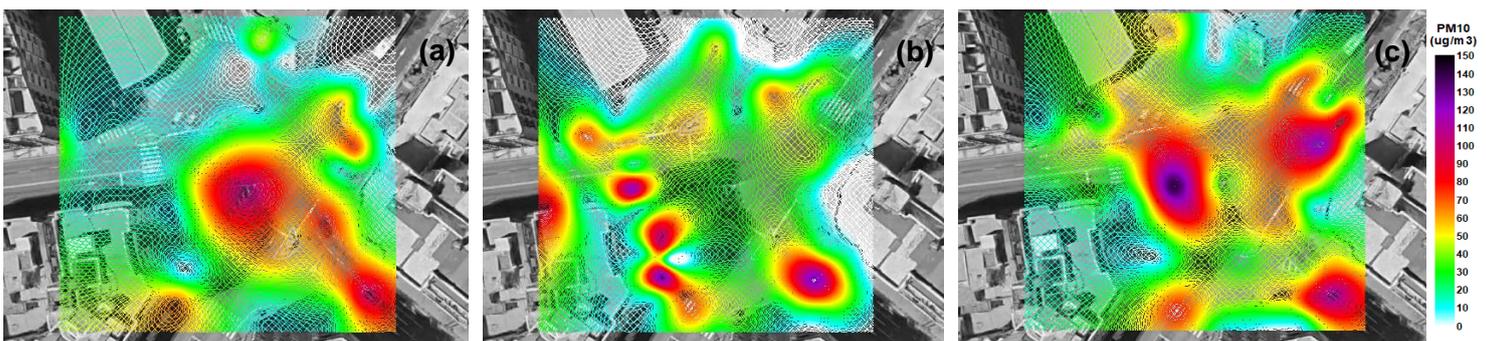
**Figura 10**

Mapa de concentración de PM<sub>10</sub> de la plaza Cruz Roja. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



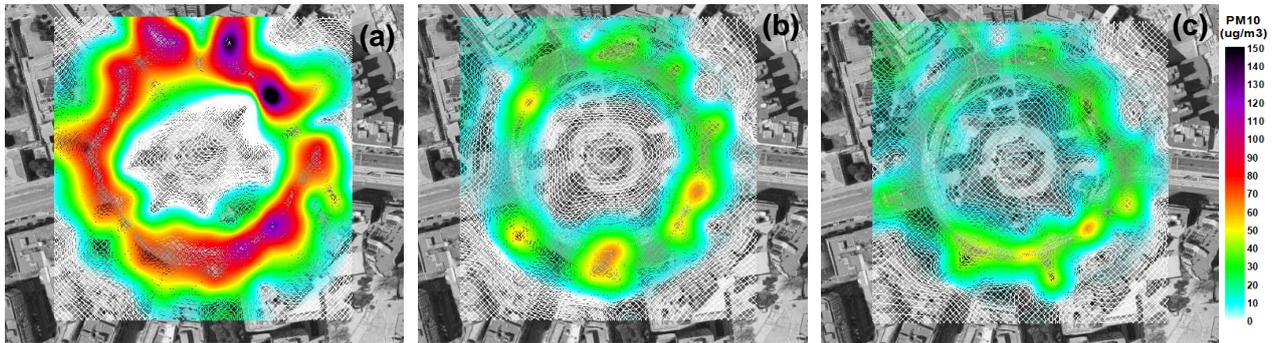
**Figura 11**

Mapa de concentración de PM<sub>10</sub> de la plaza Ingeniero de la Cierva. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



**Figura 12**

Mapa de concentración de PM<sub>10</sub> de la plaza Circular. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



### Materia Particulada de 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>)

#### *Plaza Reino Murcia-JC1*

En las tres semanas se observa una distribución similar del contaminante, este se mantiene en un valor bastante bajo por lo que se confirma una distribución óptima (Figura 13). Se pueden encontrar algunos focos puntuales debidos a la presencia de semáforos, pero estos no suponen una gran influencia ni conducen a la existencia de riesgo por altos niveles de contaminación y, en ningún momento, se supera el valor límite establecido. Con la Tabla 5 se consolida el análisis realizado, ya que el valor  $F(per)=2,776$  es inferior al crítico, por lo que se puede establecer un patrón de comportamiento en la distribución del contaminante entre las medidas.

#### *Plaza Abenarabi-JC1*

Para los tres mapas la distribución en mayor medida es similar, en la Figura 14. a, se puede observar alguna anomalía, debido a unos focos puntuales más remarcados, estos se encuentran en zonas de cruces y por presencia de semáforos. De la misma forma, ocurre en las otras dos medidas, pero sus focos no tienen un gran aumento de concentración. También, se observa una disminución de la concentración en la zona de vegetación, tanto en la parte superior derecha como en la inferior por la presencia de parques. En estos casos, se puede afirmar que la dispersión es óptima. Con la Tabla 5 se puede confirmar que las diferencias entre las semanas no son significativas, ya que el valor de  $F(per)=1,501$  es menor al valor crítico.

#### *Plaza Cruz Roja*

En las tres medidas se observa una distribución tolerable, en la Figura 15. a, se observa un poco de discrepancia respecto a las otras dos medidas (Figura 15 b y c), ya que la distribución se produce en valores de concentración mayor, pero sin llegar a sobrepasar los valores permitidos, algunos focos puntuales son por presencia de semáforo y por la presencia de parada de autobús, también se ve afectado por la influencia de la vegetación. En las otras dos medidas, la variación de concentración se mantiene estable en la totalidad de la plaza, los pequeños focos puntuales que se

contemplan son por acceso a la calle principal y por presencia de semáforos. En la Tabla 5 se contempla que el valor  $F$  es inferior al valor crítico ( $F(\text{per})=2,784$ , por tanto, se confirma que no existen diferencias significativas entre las semanas medidas.

#### *Plaza Ingeniero de la Cierva*

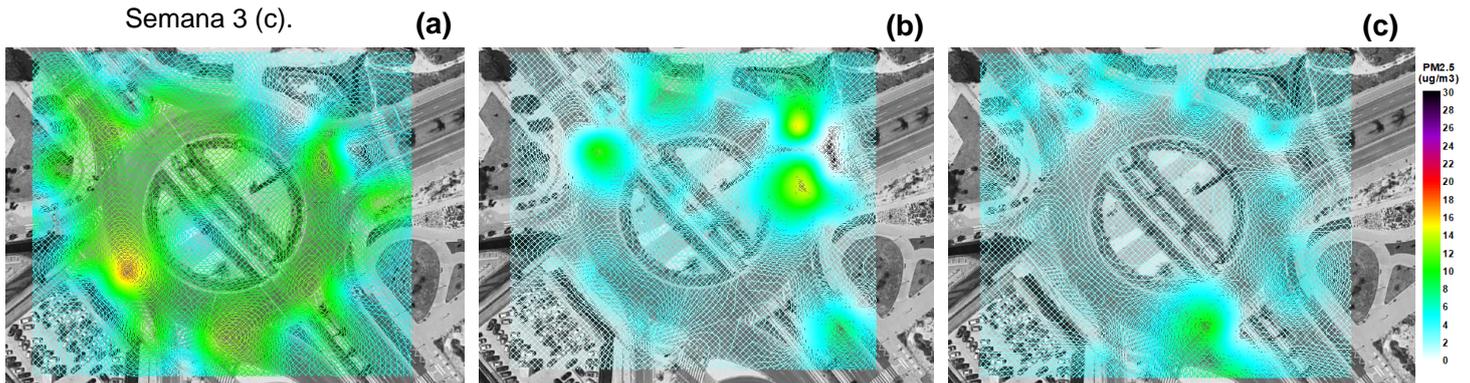
En las tres medidas se observa en su mayoría una distribución aceptable del contaminante. En la Figura 16. a, se puede observar un poco de discrepancia entre las demás, ya que dicha distribución se produce en valores de concentración mayor, incluso se produce un foco puntual significativo en el acceso a la plaza por la parte superior, esta llega a superar el valor límite. En las otras dos medidas, la variación de concentración se mantiene estable en la totalidad de la plaza, los pequeños focos puntuales que se contemplan son debidos a la presencia de semáforos. Se puede confirmar que existe un modelo establecido entre las medidas, ya que en la Tabla 5 se observa que el valor  $F$  es inferior al valor crítico, ( $F(\text{per})= 2,253$ ).

#### *Plaza Circular*

La distribución de concentración es similar en mayor medida, la única diferencia remarcable es la dispersión radial que puede contemplarse en la Figura 17. b, también presentan algunos focos puntuales, pero no muy destacables, estos se deben al tráfico de vehículos acumulado por la presencia de semáforos. Que los focos presentes en la Figura 17 no sean muy notables afirma que la dispersión es óptima. La Tabla 5 confirma que las diferencias entre las semanas no son significativas, ya que el valor de  $F$  es inferior al valor crítico, ( $F(\text{per})= 0,377$ ).

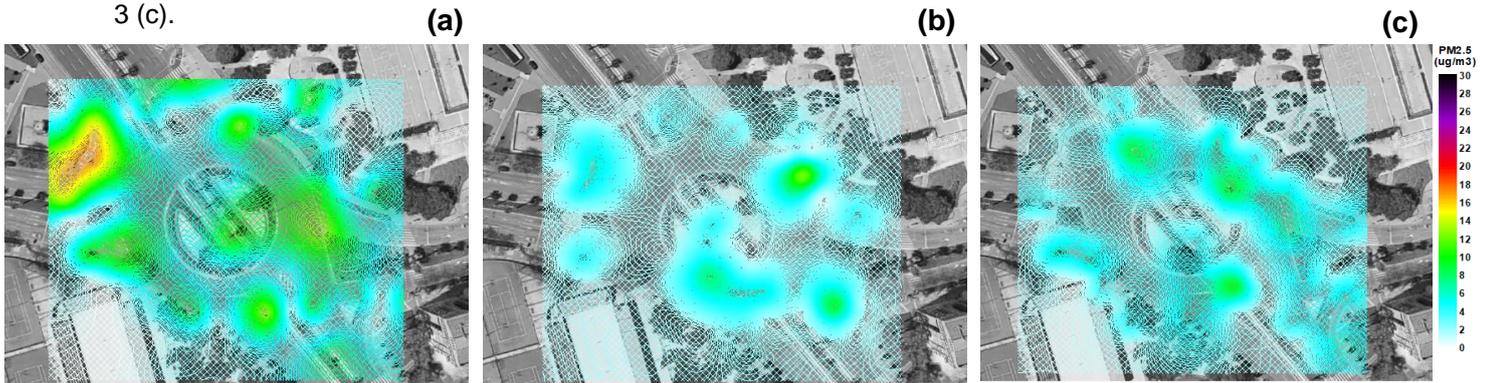
#### **Figura 13**

Mapa de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  de la plaza Reino de Murcia – JCI. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



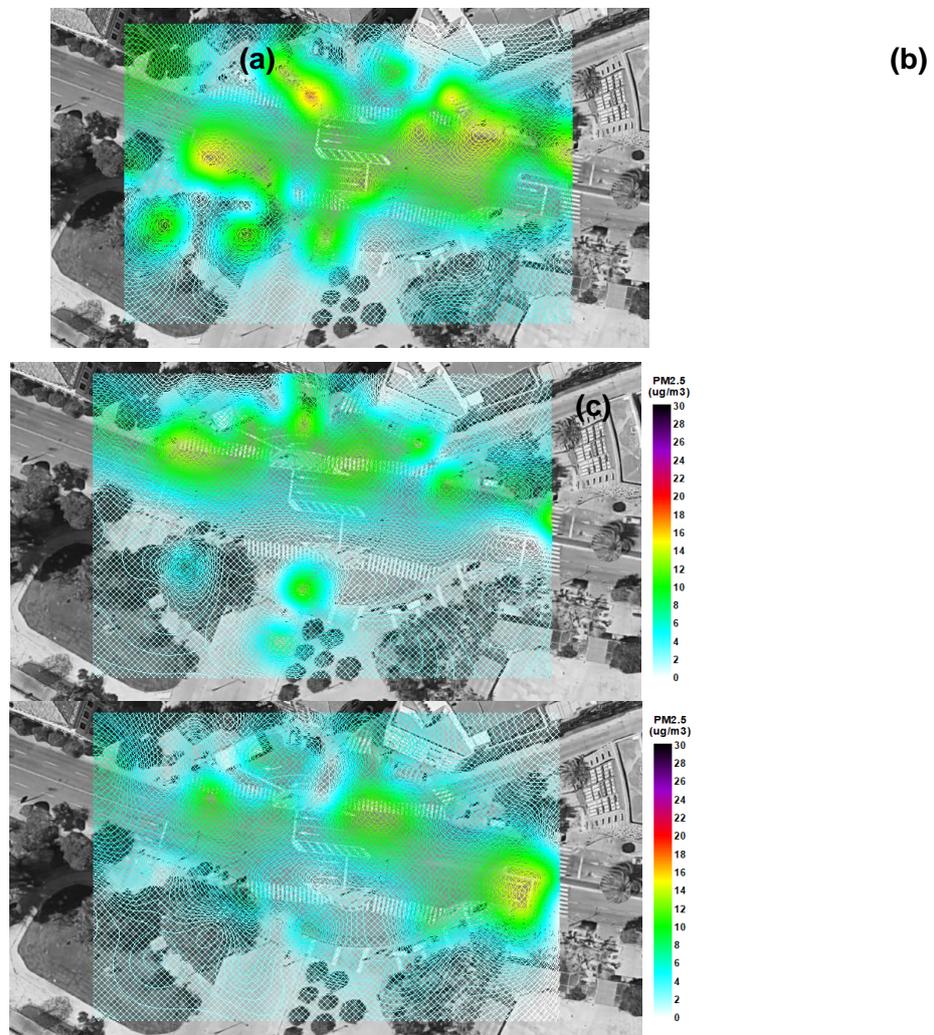
**Figura 14**

Mapa de concentración de  $PM_{2.5}$  de la plaza Abenarabi – JCI. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



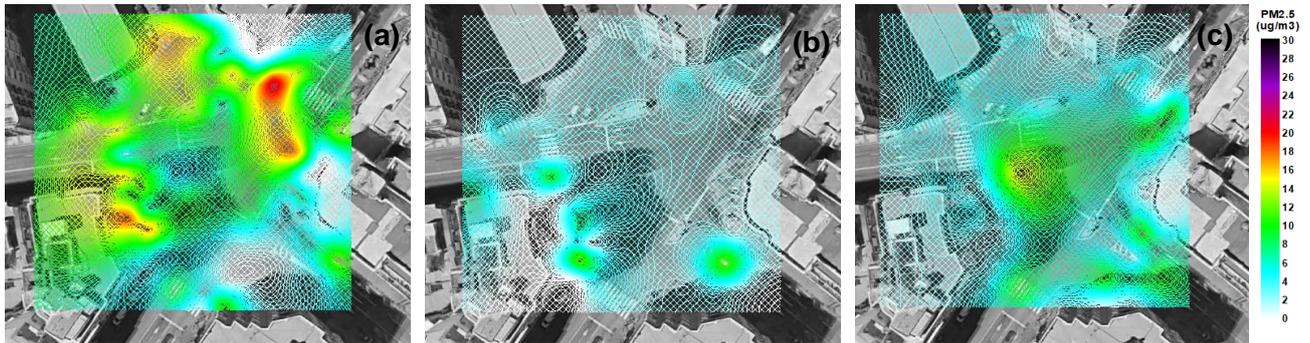
**Figura 15**

Mapa de concentración de  $PM_{2.5}$  de la plaza Cruz Roja. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).

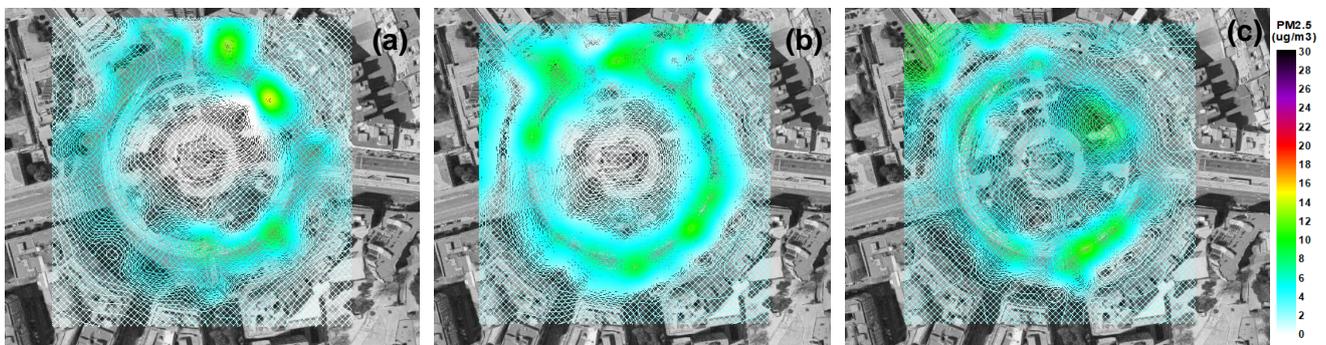


**Figura 16**

Mapa de concentración de  $PM_{2.5}$  de la plaza Ingeniero de la Cierva. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).

**Figura 17**

Mapa de concentración de  $PM_{2.5}$  de la plaza Circular. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



**Determinación de la superficie de riesgo de exposición/Cálculo del porcentaje de superficie superior al valor límite de referencia**

**Tabla 7**

	Plaza	Área sup > Valor lim			Riesgo por valores superiores
		Sem1	Sem2	Sem3	
<b>NO<sub>2</sub></b>	Reino de Murcia - JCI	0,00	20,26	0,00	Si
	Abenarabi - JCI	0,00	17,65	0,00	Si
	Plaza Cruz Roja	0,03	27,26	0,00	Si
	Plaza Ing. De la Cierva	1,15	13,85	0,00	Si
	Plaza Circular	17,08	0,00	0,00	Si
<b>PM<sub>10</sub></b>	Reino de Murcia - JCI	74,23	3,74	2,48	Si
	Abenarabi - JCI	38,41	3,48	2,04	Si
	Plaza Cruz Roja	45,44	0,00	6,26	Si
	Plaza Ing. De la Cierva	3,71	2,69	7,32	Si
	Plaza Circular	10,81	0,00	0,00	Si
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Reino de Murcia - JCI	0,00	0,00	0,00	No
	Abenarabi - JCI	0,00	0,00	0,00	No
	Plaza Cruz Roja	0,00	0,00	0,00	No
	Plaza Ing. De la Cierva	0,11	0,00	0,00	Si
	Plaza Circular	0,00	0,00	0,00	No

Área de riesgo de exposición en cada plaza.

Todas las plazas presentan un riesgo para la salud humana al superar los valores límites establecidos (BOE, 2011) para NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>, por lo que será necesario implantar medidas de control para reducir estos niveles. Por otro lado, para PM<sub>2.5</sub> la única plaza que presenta valores superiores al establecido por la normativa y, por tanto, un nivel de exposición preocupante para la población, es la Plaza Ing. de la Cierva (Tabla 7).

En base a lo anterior, una serie de propuestas de mitigación que permitirían una reducción de los niveles de concentración de los contaminantes analizados podrían ser:

- Reducir los tiempos de permanencia en la parada de los semáforos, para así evitar una acumulación de tráfico y disminuir las paradas y arranques de los vehículos, ya que, durante estas fases se produce la mayor emisión de contaminante. En el análisis de medidas de los contaminantes NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> se han observado focos puntuales por todas las plazas debidos a la presencia de semáforos, por lo que, esta medida sería aplicable a las 5 plazas.
- En el análisis de mapas, se ha observado que la vegetación disipa en mayor medida los contaminantes, esto es claramente evidente en la plaza entre Abenarabi – JCI y Cruz Roja (Figuras 5, 9, 14 y 15). La creación de zonas verdes en los alrededores de las plazas, e incluso, en el centro de las propias glorietas puede ayudar a mitigar una parte importante de las emisiones de contaminantes al actuar como sumideros.
- Otro aspecto a tener en cuenta, es la velocidad de los vehículos. Se deben realizar estudios para comprender cuál es la velocidad más óptima, tanto en normativa de circulación como en emisión para cada plaza, y aumentar los controles de las autoridades para que la población cumpla con la velocidad permitida.
- Como se puede contemplar en la Plaza Ing. de la Cierva (Figura 6, 11 y 16), al ser una plaza totalmente cerrada se ve enormemente influida por la actividad de las calles que la rodean y la dirección del viento. Se recomienda crear normativas de urbanización que establezcan una anchura de calle y altura de edificios óptimas con la intención de mejorar la difusión de los contaminantes y evitar así calles cañón.
- Para evitar la acumulación de tráfico, el impulso de uso de transporte público es fundamental, para ello se pueden realizar mejora en los servicios, ampliación de horarios, implantar promociones y reducir el coste de viaje. La ciudad de Murcia, cuenta con transporte público eléctrico, el Tranvía, y un servicio público de bicicletas, MuyBici, sin embargo, aún no están implantados en gran parte de la ciudad, por lo que una mejora de la infraestructura puede impulsar su uso.
- Ante los episodios de polvo sahariano, no es posible proponer una estrategia de control o mitigación de la concentración al tratarse de un agente de origen natural. No obstante, si se pueden llevar a cabo medidas de actuación sobre la ciudadanía, alertando de la situación a aquellos grupos vulnerables con problemas respiratorios para que tomen precauciones y eviten una exposición prolongada en las zonas de mayor concentración de Materia Particulada durante el periodo que dure este fenómeno.
- La Plaza Circular se trata de una rotonda céntrica y de las más transitadas de Murcia, esto dificulta la implantación de aquellas medidas que afectan directamente al tráfico. Sin embargo, como se comentó anteriormente, se observó que los ciudadanos tienden a estacionar o parar en doble fila

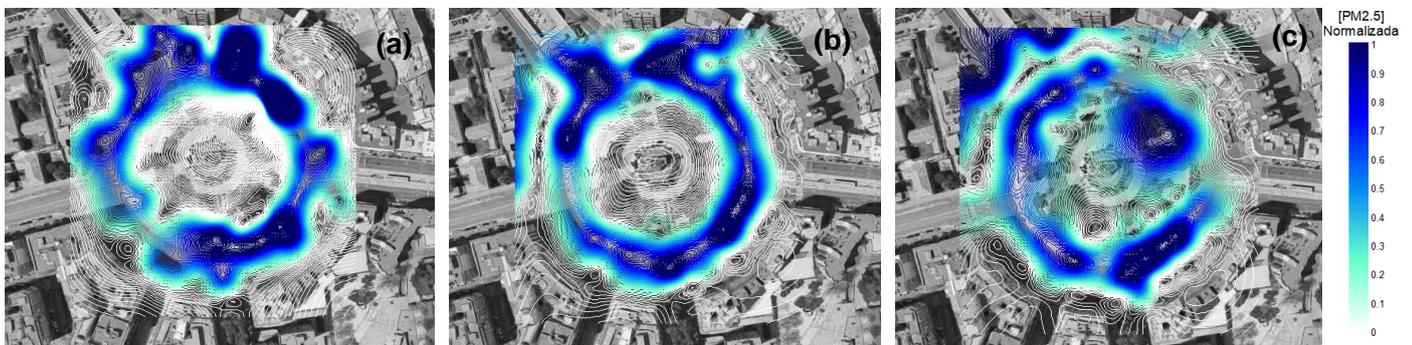
alrededor de la rotonda con el motor en marcha frecuentemente. Esto supone una fuente importante de emisión de contaminante, por lo que se debería prestar mayor atención y aumentar el control por parte de las autoridades locales para evitar este comportamiento mediante, por ejemplo, sanciones económicas.

### Mapas de niveles de concentración normalizados

Con el fin de apoyar el estudio estadístico y observar con mayor facilidad la distribución de los contaminantes se han representado los mapas de concentración de los valores normalizados de la plaza Circular para el contaminante PM<sub>2.5</sub> (Figura 18) e incluso en 3D (Figura 19).

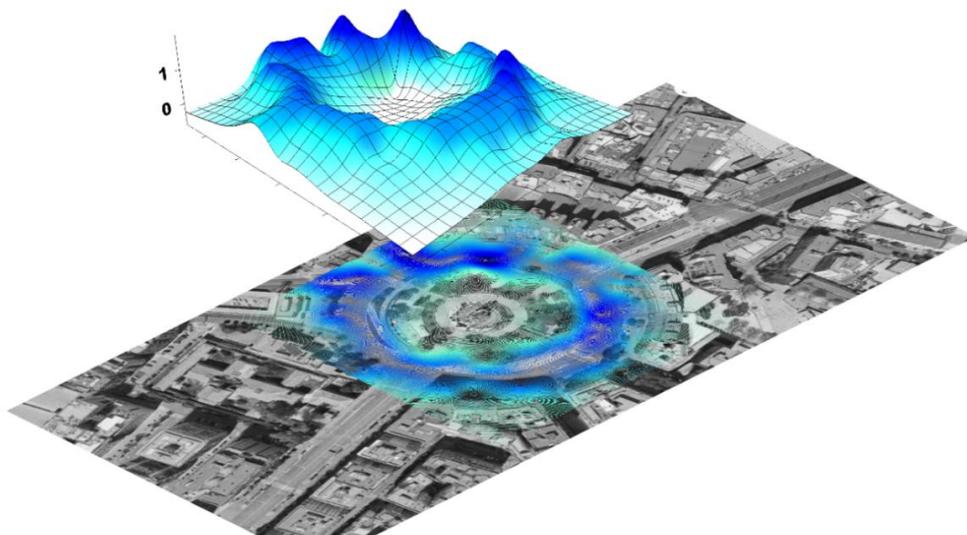
#### Figura 18

Mapa de concentración normalizada de PM<sub>2.5</sub> de la plaza Circular. Semana 1 (a); Semana 2 (b); Semana 3 (c).



#### Figura 19

Mapa tridimensional de concentración normalizada. Plaza Circular, contaminante PM<sub>10</sub>, semana 1.



De este modo, se observan con mayor facilidad la distribución de los contaminantes en la Plaza Circular, ya que en el caso de los mapas de concentraciones absolutas no era tan evidente y se confirma cualitativamente que no existen diferencias significativas entre las semanas. Además, con la representación tridimensional se visualiza de una forma mucho más clara el patrón de

comportamiento parabólico-radial, que en este caso es prácticamente ideal.

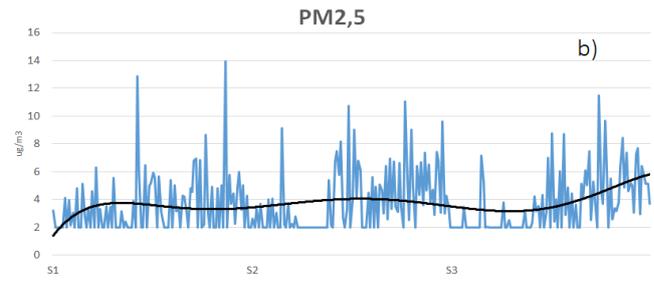
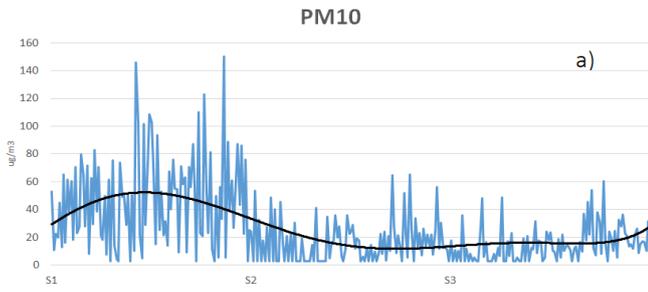
### **Análisis de la materia particulada: cálculo de la contribución de materia biogénica y polvo sahariano**

Como ya se ha comentado, en la primera semana de medidas (S1) se produjo un episodio de polvo sahariano que supuso un gran aumento de la materia particulada en contraposición con las otras dos semanas. Este fenómeno supuso una alteración del muestreo para las plazas Circular, Abenarabi-JC1 y Cruz Roja que se puede contemplar claramente en las Figuras 20, 21 y 22 (a), respectivamente. A partir de la semana 2 (S2), se observa que los valores disminuyen hasta llegar a sus valores habituales. En la Figura 20 c, 21c y 22 c, se comprueba que tanto la materia biogénica como el polvo sahariano tienen una tendencia similar a la obtenida para los valores de  $PM_{10}$ . Tras el cálculo de áreas, se puede conocer cuantitativamente la aportación de polvo sahariano a la Materia Biogénica y al contaminante  $PM_{10}$  en el aire.

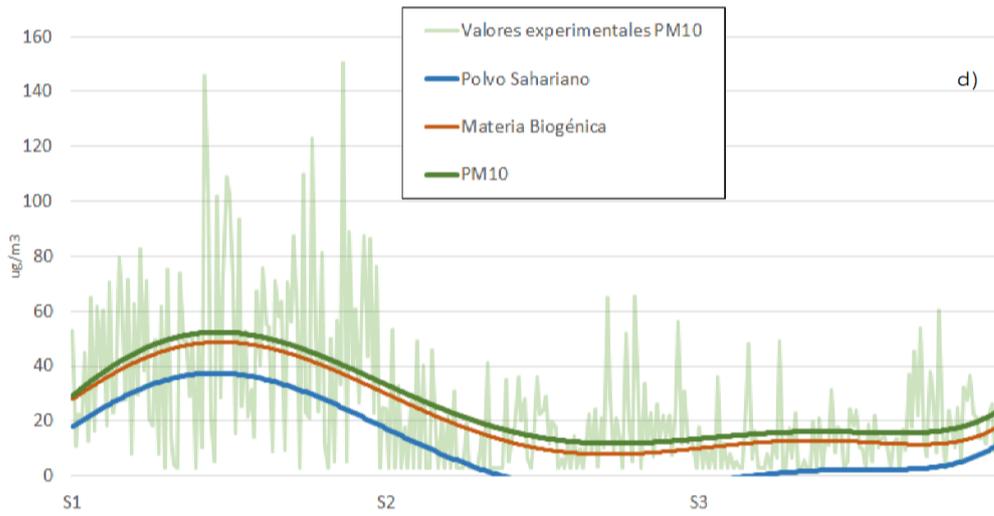
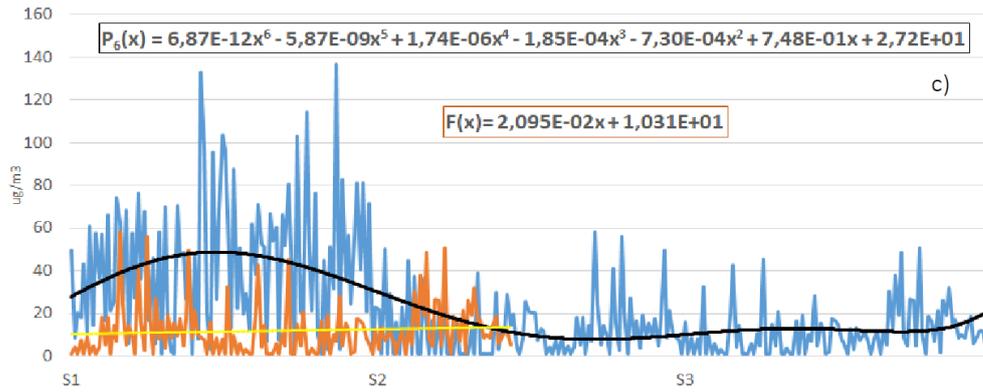
#### **Figura 20**

Estudio de contribución materia biogénica y polvo sahariano a la  $PM_{10}$  en Plaza Circular:

Representación de los valores experimentales de  $PM_{10}$ , (a) y  $PM_{2.5}$  (b) y de los valores calculados de concentración de Materia biogénica con sus ecuaciones (c), Comparativa de las tendencias del polvo sahariano, materia biogénica y  $PM_{10}$ .

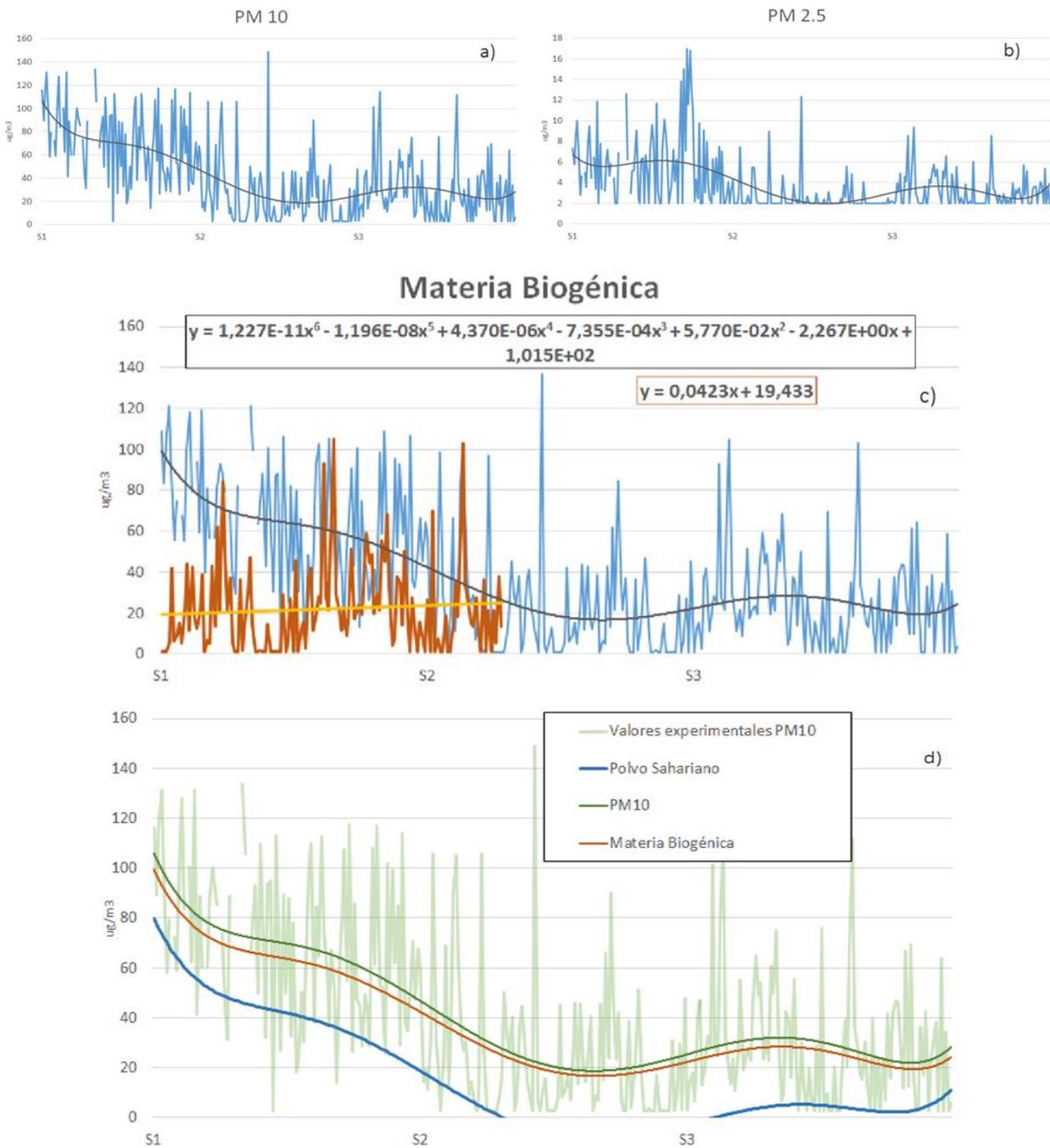


**Materia Biogénica**



**Figura 21**

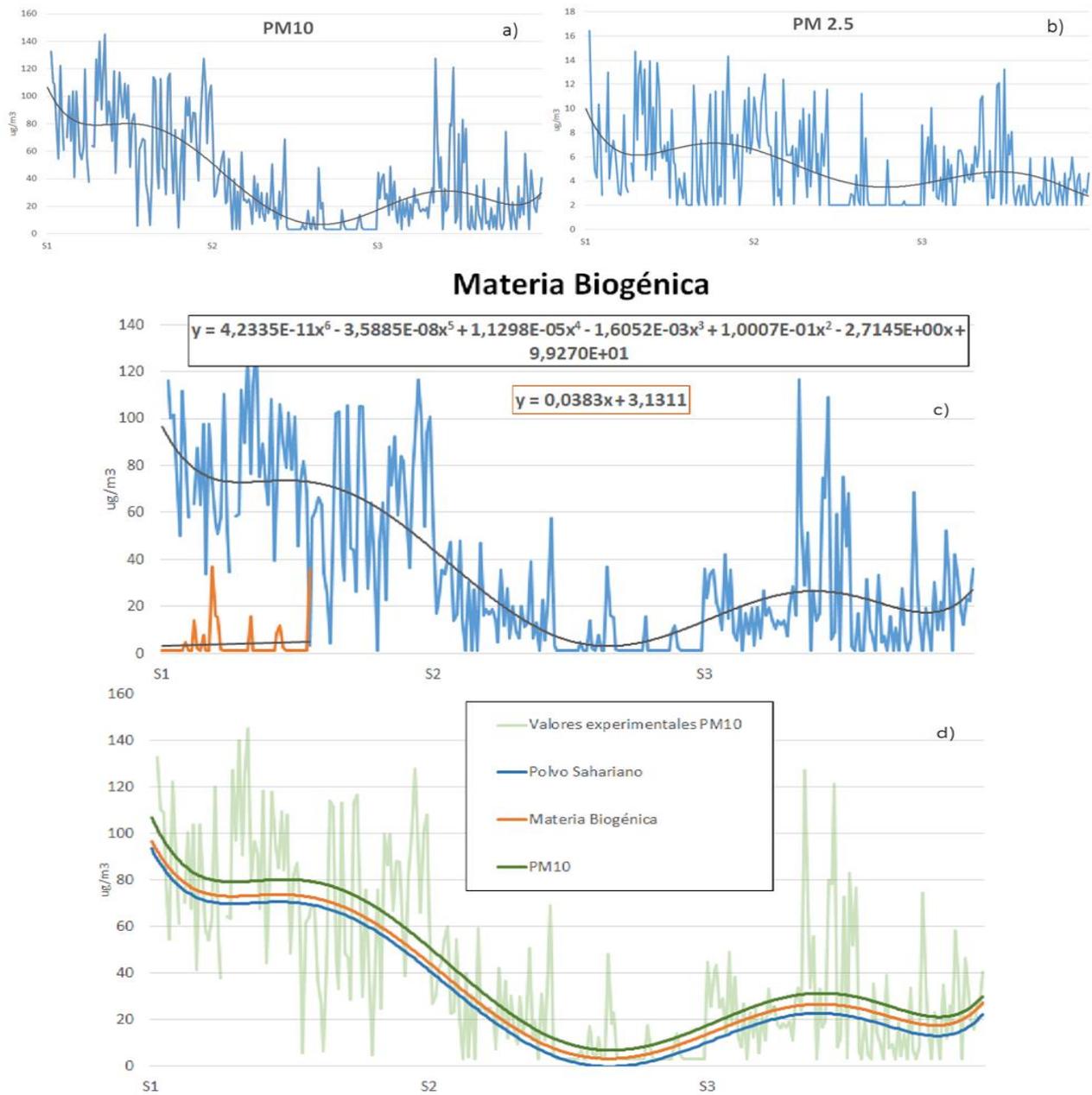
Estudio de contribución materia biogénica y polvo sahariano a la PM10 en Plaza entre Abenarabi y JC1: Representación de los valores experimentales de PM<sub>10</sub>, (a) y PM<sub>2.5</sub> (b) y de los valores calculados de concentración de Materia biogénica con sus ecuaciones (c), Comparativa de las tendencias del polvo sahariano, materia biogénica y PM<sub>10</sub>.



**Figura 22**

Estudio de contribución materia biogénica y polvo sahariano a la PM<sub>10</sub> en Plaza Cruz Roja:

Representación de los valores experimentales de PM<sub>10</sub>, (a) y PM<sub>2.5</sub> (b) y de los valores calculados de concentración de Materia biogénica con sus ecuaciones (c), Comparativa de las tendencias del polvo sahariano, materia biogénica y PM<sub>10</sub>.



**Tabla 8**

Estudio composición materia particulada y contribución polvo sahariano.

	<b>Circular</b>	<b>Abenarabi-JC1</b>	<b>Cruz Roja</b>
Área Materia Biogénica	7859,51	12852,90	9587,40
Área PM <sub>10</sub>	8296,78	16882,73	10743,48
Área Valor de fondo	4125,38	8097,85	2319,8
Área polvo sahariano	3734,13	4755,05	7268,40
% Contribución Polvo Sahariano a Mat.Biogénica	47,51	37,00	75,81
% Contribución Polvo Sahariano a PM <sub>10</sub>	45,00	28,17	67,65

## CONCLUSIONES

Gracias al uso del dispositivo portátil, Flow 2.0, las medidas se han llevado a cabo de forma exitosa en cinco plazas que han cumplido con los criterios iniciales, realizando un muestreo en espiral desde el interior hacia el exterior. Con la elaboración de los mapas de concentración se ha conocido a la perfección el comportamiento que tienen los contaminantes NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Gracias al estudio estadístico (ANOVA), se ha comprobado que para la mayor parte de plazas y contaminantes se establece un patrón en el comportamiento de los contaminantes

También se ha comprobado la influencia de numerosos factores en el comportamiento de los contaminantes como la geometría de la plaza, presencia de semáforos, cruces, atascos e influencia de calles de acceso a la plaza o la vegetación. Destacando otros aspectos particulares como son la radiación solar para el NO<sub>2</sub> y los episodios de polvo sahariano para la Materia Particulada. A través del cálculo del porcentaje de superficie superior al valor límite de referencia, se ha demostrado que para estos tres contaminantes existe riesgo para la población en algunas situaciones. Debido a la presencia de focos puntuales y otros focos diferentes del tráfico de vehículos, se establece la existencia de riesgo para la salud humana, por lo que se han desarrollado diversas propuestas de mejora (ya citadas en evaluación de resultados) para mitigar la contaminación de las plazas.

## REFERENCIAS

- Ardanuy, R., & Martín, Q. (1993). Estadística para ingenieros. Hespérides.
- BOE. (2011). Real Decreto 102/2011, del 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Boletín Oficial del Estado núm 25. (2011). <https://www.boe.es/boe/dias/2011/01/29/pdfs/BOE-A-2011-1645.pdf>
- Chen, R., Yang, J., Chen, D., Liu, W. jing, Zhang, C., Wang, H., Li, B., Xiong, P., Wang, B., Wang, Y., Li, S., & Guo, Y. (2021). Air pollution and hospital outpatient visits for conjunctivitis: a time-series analysis in Tai'an, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 15453–15461. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11762-4>

- Chen, B., Ma, W., Pan, Y., Guo, W., & Chen, Y. (2021). PM2.5 exposure and anxiety in China: evidence from the prefectures. *BMC Public Health*, 21(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-10471-y>
- Dédélé, A., Miškinytė, A., & Gražulevičienė, R. (2019). The impact of particulate matter on allergy risk among adults: integrated exposure assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 10070–10082. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04442-5>
- Donzelli, G., Cioni, L., Cancellieri, M., Llopis-morales, A., & Morales-suárez-varela, M. (2021). Relations between air quality and covid-19 lockdown measures in valencia, spain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052296>
- Durán, M., Baeza, A., González, E., & Lloréns, M. (2020, noviembre). SPATIAL MEANS AND SURFACE DISTRIBUTIONS OF CONCENTRATIONS OF POLLUTANTS IN AIR. OPTIMIZATION OF THE CALCULATION METHOD. 14th Mediterranean Congress of Chemical Engineering, Barcelona, España. <https://doi.org/10.48158/mecce-14.dg.06.10>
- Greenberg, N., Carel, R. S., Derazne, E., Tiktinsky, A., Tzur, D., & Portnov, B. A. (2017). Modeling long-term effects attributed to nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) exposure on asthma morbidity in a nationwide cohort in Israel. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*, 80(6), 326–337. <https://doi.org/10.1080/15287394.2017.1313800>
- Han, K., Ran, Z., Wang, X., Wu, Q., Zhan, N., Yi, Z., & Jin, T. (2020). Traffic-related organic and inorganic air pollution and risk of development of childhood asthma: A meta-analysis. *Environmental Research*, 110493. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110493>
- Harrison, R. M., Vu, T. Van, Jafar, H., & Shi, Z. (2021). More mileage in reducing urban air pollution from road traffic. *Environment International*, 149 (February), 106329. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106329>
- He, C., Hong, S., Zhang, L., Mu, H., Xin, A., Zhou, Y., Liu, J., Liu, N., Su, Y., Tian, Y., Ke, B., Wang, Y., & Yang, L. (2021). Global, continental, and national variation in PM2.5, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> concentrations during the early 2020 COVID-19 lockdown. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.02.002>
- Jung, M., Cho, D., & Shin, K. (2019). The impact of particulate matter on outdoor activity and mental health: A matching approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph16162983>
- Morales Terrés, I. M., Miñarro, M. D., Ferradas, E. G., Caracena, A. B., & Rico, J. B. (2010). Assessing the impact of petrol stations on their immediate surroundings. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2754–2762. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.009>
- Plume Labs (s.f. a). *Flow, by Plume Labs: The first smart air quality tracker*. Recuperado el 21 de septiembre de 2021, de <https://plumelabs.com/en/flow/>
- Plume Labs (s.f. b). *How does Flow work?*. Recuperado el 21 de septiembre de 2021, de <https://plumelabs.zendesk.com/hc/en-us/articles/360009014973-How-does-Flow-work->

- Pyramid Consulting. (2018). *Los radares en el suelo, trampa de Tráfico para los conductores*. Recuperado 21 de septiembre de 2021, de <https://www.pyramidconsulting.es/noticias/los-radares-en-el-suelo-trampa-de-traffic-para-los-conductores/>
- Qibin, L., Yacan, L., Minli, J., Meixi, Z., Chengye, L., Yuping, L., & Chang, C. (2020). The impact of PM2.5 on lung function in adults with asthma. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 24(6), 570–576. <https://doi.org/10.5588/ijtld.19.0394>
- Surfer 8. (2002). Version SURFER 8.0 para Windows. User's Guide. Golden Software Inc. [https://gis.fns.uniba.sk/vyuka/DTM\\_ako\\_sucast\\_GIS/Kriging/2/Surfer\\_8\\_Guide.pdf](https://gis.fns.uniba.sk/vyuka/DTM_ako_sucast_GIS/Kriging/2/Surfer_8_Guide.pdf)
- Szyszkowicz, M., Zemek, R., Colman, I., Gardner, W., Kousha, T., & Smith-Doiron, M. (2020). Air pollution and emergency department visits for mental disorders among youth. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124190>
- Wang, X., Xu, Z., Su, H., Ho, H. C., Song, Y., Zheng, H., Hossain, M. Z., Khan, M. A., Bogale, D., Zhang, H., Wei, J., & Cheng, J. (2021). Ambient particulate matter (PM1, PM2.5, PM10) and childhood pneumonia: The smaller particle, the greater short-term impact? *Science of the Total Environment*, 772, 145509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145509>

## ANEXO I

Datos de tráfico de las diversas calles de Murcia.

CALLES	IMD semanal
Avenida Primero de Mayo (I)	35,627
Avenida Reino de Murcia (I)	31,748
Calle Floridablanca	27,839
Avenida Teniente Flomesta	26,273
Avenida General Primo de Rivera	25,878
Avenida Ciudad de Almería	22,888
Avenida Juan Carlos I (I)	21,889
Avenida Primero de Mayo (III)	18,914
Avenida Infante Juan Manuel	18,414
Avenida Abenarabi (I)	17,725
Avenida Arquitecto Miguel Angel Beloquí	17,236
Avenida Ciclista Mariano Rojas	15,931
Avenida de la Constitución	15,404
Avenida Abenarabi (II)	15,129
Avenida de los Pinos	14,439
Avenida Juan de la Cierva	14,009
Avenida Rector José Loustau (I)	13,886
Calle Doctor José Tapia Sanz	13,761
Avenida Primero de Mayo (II)	13,644
Avenida Príncipe de Asturias (II)	12,050
Avenida Juana Jugan	11,849
Alameda de Colón	10,709
Avenida de Canalejas	10,253
Avenida Príncipe de Asturias (I)	10,206

Calle Gutiérrez Mellado	9,667
Calle Ceballos	9,033
Avenida del Palmar	8,204
Avenida Antonete Gálvez	7,995
Calle Pablo VI	7,473
Avenida Marqués de los Vélez	6,907
Avenida Intendente Jorge Palacios	6,818
Avenida de Zarandona (I)	6,746
Calle Vicente Aleixandre	6,741
Calle Alejandro Séiquer	6,282
Avenida San Juan de la Cruz	6,262
Carretera de Churra	3,403

---