



## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

# **ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE SEVILLA Y REVISIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE SUS ZONAS DE BAJAS EMISIONES**

Realizado por Daniel Algarrada Gordillo

Dirigido por Jesús Damián de la Rosa Díaz y Ana María Sánchez de la Campa Verdoná

Máster en Tecnología Ambiental. Curso 2023/2024

Modalidad: investigación. Convocatoria: septiembre de 2024



**Ana María Sánchez de la Campa**, DNI 75815501A, Profesora Titular de Universidad, y **Jesús Damián de la Rosa Díaz**, DNI 29775115M, Catedrático de Universidad, ambos en el Centro de Investigación en Química Sostenible, Universidad de Huelva.

**INFORMAN:**

Que el trabajo titulado «**Análisis de la calidad del aire de la ciudad de Sevilla y revisión de la efectividad de sus zonas de bajas emisiones**» presentado por **D. Daniel Algarrada Gordillo**, con **DNI 47207639R**, ha sido realizado bajo nuestra dirección, y **AUTORIZAMOS** su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: «Investigación»), para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva.

En Huelva, a 16 de septiembre de 2024

Fdo.: Ana M Sánchez de la Campa y Jesús D de la Rosa



## Resumen

La contaminación del aire en la ciudad se muestra como un problema complejo debido a su alta variabilidad espacial y temporal. En el caso de la contaminación por tráfico, depende tanto de la intensidad y de la tipología del tráfico como de la configuración del entorno urbano que se trate. Es por ello que este estudio emplea diversas técnicas para analizar el comportamiento de la fuente del tráfico en PM10 en la ciudad de Sevilla y, concretamente, en las estaciones de Príncipes y Torneo.

A partir de un estudio de niveles y composición química total de PM10 se ha obtenido la contribución de fuentes, sobre todo la relacionada con el tráfico. Al mismo tiempo se ha realizado un estudio de intensidad de vehículos alrededor de ambas estaciones, obteniéndose una correlación con PM10, las cuales superarán el futuro límite anual de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la Unión Europea a partir del año 2030.

Con objeto de profundizar sobre el comportamiento de PM en alta resolución temporal en la ciudad de Sevilla, se ha realizado distintos muestreos con el nodo AirBeam3, el cual permite obtener niveles de PM10, PM2.5 y PM1 en movimiento. De esta forma, se han realizado distintas mediciones en la recién implantada zona de bajas emisiones (ZBE) en el Parque Tecnológico de La Cartuja, así como otras zonas de tráfico restringido (Casco Antiguo y Triana) y zonas verdes (Parque de los Príncipes y Parque de María Luisa).

Se propone una metodología simplificada que permite evaluar si la actual zona ZBE de Sevilla, vigente desde el 1 de julio de 2024, es efectiva para la reducción de los niveles de PM relativos al tráfico, aparte de otros criterios que no se han tenido en cuenta según la legislación vigente. Esto atiende al criterio de mejora de los niveles de calidad del aire previos a la implantación de la ZBE establecido en el Real Decreto 1052/2022, que toman como base los valores límite anuales de la actual Directiva Europea de calidad del aire, en aras de tomar como referencia los valores límite de la futura Directiva, que serán más restrictivos.

*\* Palabras clave: PM, ZBE, valores límite, contribución del tráfico, calidad del aire, Sevilla.*

## Abstract

Air pollution in the city unfolds an intricate problem owing to its highly spatial and temporal variation. The traffic-related air pollution answers to both the volume and the typology of traffic and the setting of the urban area being considered. It is for this reason that the present study uses several techniques to analyze the performance of the traffic source in PM<sub>10</sub> in Seville, specifically in the stations of Príncipes and Torneo.

The source contribution, primarily the one related to traffic, was obtained from a study of the levels and the total chemical composition of PM<sub>10</sub>. Simultaneously, a study of the volume of vehicles in the vicinity of both stations and with different weather conditions (mainly wind and rain) has been performed, which results in a correlation with PM<sub>10</sub>, that will exceed the future annual limit of 20 µg/m<sup>3</sup> in the European Union from 2030 on.

In order to explore further the performance of PM in high temporal resolution in Seville, the AirBeam3 node has been used to take different samplings as it makes possible to obtain PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> levels while moving. In this manner, several measurements have been completed in the recently introduced Low Emission Zone (LEZ) in the Parque Tecnológico de La Cartuja, just as other limited traffic zones (Casco Antiguo and Triana) and the green zones (Parque de los Príncipes y Parque de María Luisa).

A simplified methodology that allows to determine whether the current LEZ zone in Seville (in force since the 1st of July 2024) is effective or not is proposed in order to reduce the PM levels related to traffic, beyond other criteria that weren't been considered according to the current law. This responds to the improvement standard in the levels of the air quality prior to the introduction of the LEZ established in the Royal Decree-Law 1052/2022. This Royal Decree-Law take the annual limit values from the EU Ambient Air Quality Directive as a starting point with the purpose to use the limit values from the coming Directive as reference, values that will be more restrictive.

\* *Keywords: PM, LEZ, limit values, traffic source, air quality, Seville.*

## **Agradecimientos**

Agradecer al Centro de Gestión de la Movilidad de Sevilla la facilitación de los datos de tráfico, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de este estudio.

También agradecer a mis directores, Ana y Jesús, su dedicación y esfuerzo más allá de su trabajo para ayudarme con este trabajo fin de máster. Y, por supuesto, por la confianza depositada en mí para llevarlo a cabo.

A mi pareja, Lydia, que me ayuda incondicionalmente, en lo personal y en lo profesional, y me ha escuchado durante meses hablar de lo mismo. Todo necesario para la entrega de este trabajo.

Y a mis padres, Alfredo y María, por todo, siempre.



## Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Futura Directiva Europea 2030.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Legislación estatal sobre zona de bajas emisiones (ZBE).....</b>	<b>15</b>
1.2.1 Consideraciones generales .....	15
1.2.2 Objetivos de las ZBE .....	15
1.2.3 Diseño de las ZBE.....	16
1.2.4 Control y seguimiento de las ZBE.....	17
<b>1.3 Situación actual de las ZBE en España.....</b>	<b>17</b>
1.3.1 Normas Euro de referencia para vehículos autorizados al acceso en la ZBE de Sevilla .....	18
<b>2. Objetivos principales y específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Metodología y fuentes de información.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Área de estudio.....</b>	<b>21</b>
3.1.1 Marco geográfico: Sevilla y su aglomeración urbana.....	21
3.1.2 Características climáticas de Sevilla.....	22
3.1.3 Parque automovilístico de la aglomeración urbana de Sevilla e intensidad del tráfico en la ciudad .....	22
3.1.4. Contexto próximo a las estaciones de calidad del aire de Tráfico.....	23
3.1.5 Zonas de Tráfico Restringido en Sevilla .....	27
3.1.6 Zona de Bajas Emisiones de Sevilla.....	29
<b>3.2 Muestreo de PM10 y gravimetría.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Análisis químico de PM10 .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 Evolución histórica de PM10 y gases contaminantes en Príncipes.....</b>	<b>36</b>
<b>3.5 Contribución de fuentes.....</b>	<b>37</b>
<b>3.6 Análisis estadístico de la intensidad del tráfico y de la contribución del tráfico.....</b>	<b>38</b>
<b>3.7 Uso de sensores de bajo coste para la calidad del aire.....</b>	<b>39</b>
<b>3.8 Análisis espacial de resultados .....</b>	<b>42</b>
<b>4.Resultados y discusión.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Evolución histórica de niveles de PM10 y gases contaminantes en la estación de Príncipes .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Niveles de PM y composición química.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Contribución de fuentes.....</b>	<b>50</b>
4.3.1 Estación de Príncipes.....	50
4.3.2 Estación de Torneo .....	52
<b>4.4 Relación de la contribución del tráfico con la intensidad del tráfico .....</b>	<b>55</b>
<b>4.5 Variación espacial de PM en alta resolución en zonas de Sevilla con restricciones de tráfico .....</b>	<b>58</b>

4.5.1 ZTR de Casco Antiguo .....	58
4.5.2 ZTR de Triana .....	59
4.5.3 ZBE Cartuja.....	61
4.5.4 Zonas verdes.....	63
<b>5. Comparativa entre las ZBE de otras ciudades europeas y la de Sevilla .....</b>	<b>66</b>
5.1 Londres .....	66
5.2 Milán .....	69
5.3 A Coruña.....	71
<b>6. Metodología propuesta para la evaluación de ZBE y consideraciones adicionales para su diseño .....</b>	<b>73</b>
6.1 Metodología a seguir con respecto a la calidad del aire .....	73
6.2 Metodología a seguir para determinar la influencia de la morfología urbana sobre los contaminantes derivados del tráfico.....	74
6.3 Consideraciones adicionales para la implantación de ZBE.....	74
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>75</b>
<b>8. Bibliografía y webs de referencia .....</b>	<b>77</b>



## 1. Introducción

La mala calidad del aire supone un problema de primer orden para la salud a nivel mundial. Tanto es así, que las muertes prematuras se estiman en 4.2 millones en todo el planeta debido a la calidad del aire exterior, según los datos de la [Organización Mundial de la Salud \(OMS, 2022\)](#), situando al tráfico como una de las principales fuentes antropogénicas de contaminación del aire en la ciudad ([Harrison et al., 2021](#)).

Así, una mala calidad del aire tiene efectos sobre la morbilidad, derivada de accidentes cardiovasculares, cardiopatías, cánceres de pulmón y neumopatías graves y agudas ([OMS, 2022](#)). Por tanto, contribuir a mejorar los niveles de calidad del aire mejorará la salud de las personas expuestas a la contaminación atmosférica. Debido a ello, la OMS establece valores recomendados para los contaminantes de interés, como son las partículas inferiores a 10 y 2.5 micras (PM10 y PM2.5, respectivamente) y el dióxido de nitrógeno.

Regular las emisiones de PM, en especial de partículas finas, es necesario, ya que el PM2.5 está relacionado con las emisiones del tráfico, concretamente con los vehículos con motores diésel en las grandes ciudades. Los efectos en la salud de estas partículas son más perjudiciales que los que producen las partículas de mayor tamaño (PM10), ya que son totalmente respirables, llegando incluso al torrente sanguíneo. Además, estas partículas pueden contener compuestos más tóxicos que las de mayor tamaño, como metales pesados y compuestos orgánicos ([Linares y Díaz, 2008](#)).

En este sentido, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) estima 238 000 muertes prematuras en la Unión Europea debido a una contaminación por partículas finas por encima de los niveles de la OMS en 2020, especialmente en zonas urbanas. Sumado a ello, las estimaciones rondan las 49 000 muertes prematuras por contaminación por dióxido de nitrógeno y 24 000 por exposición al ozono ([AEMA, 2023](#)).

Solo 127 de las 323 ciudades europeas que recoge el visor de la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) tienen una calidad del aire clasificada como «buena» para el PM2.5, es decir, por debajo de los límites establecidos por la OMS ([AEMA, 2021](#)) ([Figura 1](#)). Ello supone que la calidad del aire se vea comprometida en la UE, ya que se incumplen estos valores en más del 60 % de las ciudades registradas en el visor. Todas las capitales de provincia españolas que registran datos de PM2.5 incumplen el valor anual recomendado por la OMS, atendiendo a los registros del periodo 2021-2022.

## How clean is the air in my city?

based on the levels of fine particulate matter measured in the air in cities in 2021 and 2022



**Figura 1.** Ciudades españolas y su índice de PM2.5. Fuente: European city air quality viewer (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2024).

En España se estiman más de 20 000 las muertes prematuras al año a causa de la mala calidad del aire atribuibles a los niveles de óxidos de nitrógeno, al ozono y a las partículas en suspensión inferiores a  $2.5 \mu\text{m}$  (RD 1052/2022). Por tanto, regular el tráfico es esencial para reducir las emisiones de PM que afectan a la salud de la población expuesta.

Todo ello ocurre en un contexto en el que el Parlamento Europeo (2024) fija nuevos valores límite a cumplir en 2030 que reducirá los valores límites actuales para las concentraciones de contaminantes relacionados con el tráfico (PM10, PM2.5 y  $\text{NO}_2$ ).

### 1.1 Futura Directiva Europea 2030

Las Directivas Europeas vigentes en materia de calidad del aire son la 2004/107/CE y 2008/50/CE, que deben cumplirse en todos los países de la UE. España, al ser país miembro de la Unión Europea (UE), queda supeditada a las Directivas que sean aprobadas por el Parlamento Europeo (Tabla 1). Los países pertenecientes a la UE tienen un periodo de tres años para trasponer la normativa europea a sus leyes estatales.

El PM posee una especial complejidad debido a su amplia variabilidad tanto física como química (Moreno *et al.*, 2006). Es por ello que la Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, cadmio, mercurio, níquel e hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente, establece valores objetivos anuales para el arsénico ( $6 \text{ ng}/\text{m}^3$ ), el cadmio ( $5 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) y el níquel ( $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ ). Estos componentes químicos están también relacionados con el daño a la salud humana (Li *et al.*, 2013).

**Tabla 1.** Valores límite de los contaminantes relacionados con el tráfico. Datos de la [Comisión Europea \(2008 y 2022\)](#) y la [Organización Mundial de la Salud \(2022\)](#). Negro: Directiva 20080/CE. Rojo: Directiva 2030. Verde: OMS 2021.

Contaminante	Valor límite anual	Otros valores límite
PM10	40 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 50 µg/m <sup>3</sup> que no podrá superarse más de 35 veces al año.
	20 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 45 µg/m <sup>3</sup> que no podrá superarse más de 18 veces al año.
	15 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 45 µg/m <sup>3</sup> que no debe superarse más de 3 - 4 días al año.
PM2.5	25µg/m <sup>3</sup>	No aplican
	10 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 25 µg/m <sup>3</sup> que no podrá superarse más de 18 veces al año.
	5 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 15 µg/m <sup>3</sup> que no debe superarse más de 3 - 4 días al año.
NO <sub>2</sub>	40 µg/m <sup>3</sup>	1 hora. 200 µg/m <sup>3</sup> que no podrá superarse más de 18 veces por año.
	20 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 50 µg/m <sup>3</sup> que no podrá superarse más de 18 veces al año.
	10 µg/m <sup>3</sup>	1 día. 25 µg/m <sup>3</sup> que no debe superarse más de 3 - 4 días al año.

Posteriormente, llega a la UE la 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, establece los valores límite diarios (VLD) y anuales (VLA) para PM10, PM2.5 y NO<sub>2</sub>. Esta Directiva derivó de la Directiva [1999/30/CE](#) del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente.

Sin embargo, como respuesta a las directrices de la [OMS \(2022\)](#), el Parlamento Europeo aprobó en el mes de abril de 2024 la fijación de nuevos límites para la contaminación del aire, aproximándose a los valores fijados en las directrices de la OMS, a partir de los cuales presentan riesgos para la salud pública. Así, la UE pretende modificar los valores límite de PM en su próxima Directiva relativa a la calidad del aire, haciéndolos más restrictivos y con pretensiones de alcanzarlos para 2030 en todos los países miembro.

Para el caso de la contaminación del aire relacionada con el tráfico, este estudio se centra especialmente en el material particulado (PM10), ya que la circulación de vehículos contribuye a las emisiones de partículas provenientes del desgaste los frenos, las cubiertas de los neumáticos y al polvo en resuspensión por las rodaduras del tráfico ([Amato et al., 2014](#)), así como de las emisiones de carbono total resultado de la combustión del combustible empleado en los vehículos. En menor medida, se

considerará el PM2.5 y el NO<sub>2</sub>, ambos vinculados directamente con las emisiones del tráfico e indirectamente con el ozono. Por tanto, este estudio debe considerar los valores límite de estos contaminantes con respecto a la actual y a la futura Directiva Europea de calidad del aire ambiente.

## 1.2 Legislación estatal sobre zona de bajas emisiones (ZBE)

### 1.2.1 Consideraciones generales

La normativa española básica que afecta a este estudio es la [Ley 7/2021](#), de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. Esta ley aporta la siguiente definición para el concepto de zona de bajas emisiones (ZBE):

El ámbito delimitado por una Administración pública, en ejercicio de sus competencias, dentro de su territorio, de carácter continuo, y en el que se aplican restricciones de acceso, circulación y estacionamiento de vehículos para mejorar la calidad del aire y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, conforme a la clasificación de los vehículos por su nivel de emisiones de acuerdo con lo establecido en el Reglamento General de Vehículos vigente ([Ley 7/2021](#)).

Es decir, una ZBE se entiende como un instrumento para que las administraciones públicas puedan conseguir los objetivos de mejorar la calidad del aire y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyan al cambio climático. Además, establece que las ciudades de más de 50 000 habitantes y los territorios insulares deben tener implementadas sus ZBE antes del año 2023.

Sin embargo, el [RD 1052/2022](#), de 27 de diciembre, por el que se regulan las zonas de bajas emisiones concede un plazo máximo de 18 meses, desde su entrada en vigor, para adaptar los proyectos de ZBE a las exigencias de este Real Decreto, por lo que no es hasta el 1 de julio de 2024 cuando se hace efectiva la entrada en vigor de las ZBE en España.

El [RD 1052/2022](#) viene a desarrollar la regulación de zonas de bajas emisiones en aquellas ciudades que estén obligadas a implementarlas y pretende servir de instrumento para homogeneizar la legislación sobre las ZBE en España, en la que se define el contenido básico de los proyectos de ZBE, así como el deber de establecer objetivos concretos y cuantificables que puedan ser monitorizados y evaluados ([RD 1052/2022](#)).

### 1.2.2 Objetivos de las ZBE

En el [RD 1052/2022](#) se establece que las ZBE deben perseguir, como objetivos prioritarios, la mejora de la calidad del aire y la mitigación del cambio climático. También deben perseguir los objetivos de cumplimiento de calidad acústica, el

impulso hacia modos de transporte más sostenibles y la promoción de la eficiencia energética en el uso de los medios de transporte, entre otros.

En este sentido, los objetivos de calidad del aire de las ZBE deben perseguir mejorar la situación de partida, asegurando el cumplimiento de los valores legislados y apuntando, como fin último, al cumplimiento de los valores de recomendados por la OMS en 2021, que establece los niveles de calidad del aire recomendados para la protección de la salud pública. Además, cuando se trate de contaminantes secundarios, las medidas de la ZBE deben incidir en sus precursores. En caso de que se superen los valores límite de calidad del aire tras la implantación de la ZBE, los objetivos y las medidas adoptadas deberán contribuir a alcanzar su cumplimiento en el menor tiempo posible.

### 1.2.3 Diseño de las ZBE

En el [RD 1052/2022](#) se delega la competencia del diseño de las ZBE a las administraciones locales, considerando el origen y el destino de los desplazamientos sobre los que se ha considerado intervenir mediante el cambio modal o fomentando la reducción de los mismos para lograr los objetivos establecidos en el proyecto de ZBE. Además de ello, se debe evitar la concentración de los vehículos en sus áreas adyacentes de manera que no se deteriore la calidad del aire o acústica de la ZBE, la cual debe ocupar una superficie adecuada y suficiente para lograr el cumplimiento de los objetivos establecidos en el proyecto.

En el diseño de las ZBE, también se podrá considerar la inclusión de zonas de especial sensibilidad destinadas a proteger a los sectores más vulnerables de la población de los impactos sobre la salud derivados de la circulación de vehículos motorizados por sus inmediaciones. Las zonas de especial sensibilidad contarán con medidas de reducción de emisiones más exigentes de las que se establezcan en la zona principal y se establecerán prioritariamente en las proximidades de equipamientos escolares, sanitarios, hospitalarios y de residencias de ancianos. Se velará porque estas zonas se integren en el proyecto de ZBE aun cuando tengan carácter discontinuo con respecto a la ZBE principal.

Las restricciones de vehículos al acceso de la ZBE deben tomar como referencia la clasificación ambiental de los vehículos establecida en el Anexo II del [RD 2822/98](#), de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos, y sus futuras actualizaciones, correspondiéndose con los distintivos ambientales «B», «C», «ECO» y «0» de la Dirección General de Tráfico ([DGT, 2024](#)).

Las prohibiciones o restricciones de acceso afectarán prioritariamente a los vehículos con mayor potencial contaminante y serán proporcionales a los objetivos de calidad del aire y de mitigación de gases de efecto invernadero que se hayan dispuesto en el proyecto de la ZBE. Además, las restricciones de acceso se deben realizar priorizando

la movilidad activa y el transporte público durante el diseño de las medidas necesarias para cumplir con los objetivos de las ZBE ([RD 1052/2022](#)).

Cabe destacar que se pueden diseñar ZBE supramunicipales en coordinación con otras entidades locales y que, en las ciudades de mayor tamaño, como es el caso de Sevilla, se considerará la posibilidad de establecer varias ZBE.

#### **1.2.4 Control y seguimiento de las ZBE**

Las entidades locales establecerán un sistema de monitorización y seguimiento continuo con el fin de evaluar la eficacia de las medidas adoptadas, así como el cumplimiento de los objetivos de mejorar la calidad del aire y de mitigar el cambio climático y, en caso de que se produzcan desviaciones con respecto a estos, modificar el proyecto de ZBE. También se debe posibilitar el seguimiento de la evolución de la calidad del aire en las zonas colindantes.

Para ello, se podrán tomar como referencia los valores medidos por las estaciones de calidad del aire del municipio, si estas se encuentran dentro de la zona de influencia de la ZBE y en zonas colindantes, o bien llevar a cabo campañas de medición indicativas o puntos de control definidos en el diseño de la ZBE y zonas colindantes. Las mediciones incluirán, al menos, las concentraciones anuales o, cuando corresponda, el número de superaciones máximas permitidas de los valores límite asociados a las emisiones de tráfico en relación con el dióxido de nitrógeno, PM10 y PM2.5. También se pueden incluir otros indicadores de calidad del aire o salud que consideren las entidades locales en función de la problemática concreta de cada municipio. Deberá considerarse la contribución de fuentes naturales como la influencia de episodios de intrusiones de polvo norteafricano, especialmente en Andalucía que, por su proximidad a África, recibe varios episodios anuales.

### **1.3 Situación actual de las ZBE en España**

La primera ZBE europea fue implementada en Suecia en 1996 y, actualmente, existen más de 200 en los países europeos ([Settey et al., 2019](#)). Sin embargo, no es hasta julio de 2024 cuando se hacen efectivas las ZBE en España, donde las ciudades de más de 50 000 habitantes están obligadas a diseñar e implantar una ZBE ([Ley 7/2021](#)). Según los datos del [MITECO \(2024\)](#), en España, en la actualidad, hay 31 ZBE vigentes frente a las 100 ZBE en trámites de aprobación. Además, por criterios establecidos en el [RD 1052/2022](#), 21 ciudades de España obligadas a implantar una ZBE no presentan trámites iniciados para su implantación.

Dado que el cumplimiento de las directrices de la OMS es el fin último de las ZBE ([RD 1052/2022](#)), los criterios que se han utilizado para diseñar las ZBE vigentes pueden no responder a una mejora de la calidad del aire.

Por un lado, esto es debido al criterio de algunas ciudades de implantar su ZBE en su centro histórico, como es el caso de Córdoba, en el interior de un parque, como el caso de La Línea de la Concepción (Cádiz), o en un parque científico-tecnológico, como es el caso de Sevilla. Por otro lado, también es debido a que, de las 31 ZBE vigentes, 25 responden a la limitación de acceso según el distintivo ambiental de la DGT, y 6 tienen su acceso restringido al tráfico rodado. A todo ello se suma que la mayoría de las ZBE vigentes incorporan a residentes, trabajadores, dueños de plazas de garaje o vehículos municipales entre las principales excepciones para acceder al interior de sus ZBE, según los datos del [MITECO \(2024\)](#).

Considerando todo lo anterior, se hace necesario evaluar la efectividad de las ZBE de Sevilla, así como de sus zonas de tráfico restringido (ZTR), en base al criterio de mejora de la calidad del aire y teniendo en cuenta la complejidad de la contaminación del aire urbano, que puede mostrar una variabilidad espaciotemporal significativa ([Apte et al., 2017](#), [Chen et al., 2022](#) y [Kerckhoffs et al., 2022](#)).

### **1.3.1 Normas Euro de referencia para vehículos autorizados al acceso en la ZBE de Sevilla**

Dado que este estudio se centra en la recientemente implantada ZBE de Sevilla, es necesario conocer los requisitos que deben tener los vehículos, en relación a sus emisiones, para acceder al interior de la misma sin ser sancionados. Con carácter general, podrán circular dentro de la ZBE aquellos vehículos que porten los distintivos ambientales «B» y «C» de la Dirección General de Tráfico, que toman como referencia los estándares de las Normas Euro que regulan la fabricación de vehículos dentro de la UE en cuanto a emisiones se refiere.

La normativa municipal de Sevilla impide, con carácter general, la entrada a la ZBE a vehículos con motor de gasolina matriculados antes del año 2000 ([Tabla 2](#)) o con motor diésel ([Tabla 3](#)) matriculados antes del año 2006 ([Ayuntamiento de Sevilla, 2024](#)). En este sentido, el distintivo ambiental «B» se corresponde con las Normas Euro 3 para vehículos de gasolina y Euro 4 para vehículos diésel, además de los vehículos de más de 8 plazas y pesados tanto de gasolina como diésel, matriculados desde 2006 ([DGT, 2024](#)).

Además, pueden acceder al interior de la ZBE aquellos vehículos que porten el distintivo ambiental «C» ([Ayuntamiento de Sevilla, 2024](#)), siendo estos, con carácter genérico, los turismos y furgonetas ligeras con motor de gasolina matriculados a partir del 2006 (Euro 4) y con motor diésel matriculado desde el 1 de septiembre de 2015 (Euro 6), además de los vehículos de más de 8 plazas, excluido el conductor, y pesados, tanto de gasolina como diésel, matriculados desde 2014 ([DGT, 2024](#)).

**Tabla 2.** Valores límite de emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas para los turismos y furgonetas ligeras con motor de gasolina aptos para circular por la ZBE de Sevilla. Datos de la [Comisión Europea, 1998, 2007, 2012 y 2017](#).

Vehículos con motor de gasolina					
Tipo de vehículo	Fecha límite de fabricación	Norma Euro	Distintivo ambiental correspondiente	Valores límite de NO <sub>x</sub>	Masa/Número de partículas
Turismo	2000	Euro 3	B	0,15 g/km	-
Furgonetas ligeras (<1305 kg)	2001	Euro 3	B		-
Turismo	2005	Euro 4	C	0,08 g/km	-
Furgonetas ligeras	2006	Euro 4	C		-
Todos los vehículos	2011	Euro 5	C	0,06 g/km	-
	1 de septiembre de 2015	Euro 6	C	No se aplican nuevos límites	-
Vehículos con motor de gasolina de inyección directa	1 de septiembre de 2018	Euro 6c	C	No se aplican nuevos límites	0,045 g/km 6x10 <sup>11</sup> partículas/km

**Tabla 3.** Valores límite de emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas para los turismos y furgonetas ligeras con motor diésel aptos para circular por la ZBE de Sevilla. Datos de la [Comisión Europea, 1998, 2007 y 2012](#).

Vehículos con motor diésel					
Tipo de vehículo afectado	Fecha límite de fabricación	Norma Euro	Distintivo ambiental correspondiente	Valores límite	
				NO <sub>x</sub>	Masa de partículas
Turismo	2005	Euro 4	B	0,25 g/km	0,025 g/km
Furgonetas ligeras	2006	Euro 4	B		
Todos los vehículos	2011	Euro 5	B	0,18 g/km	No se aplican nuevos límites
	1 de septiembre de 2015	Euro 6	C	0,08 g/km	0,0045 g/km

También pueden circular por la ZBE de Sevilla aquellos vehículos que porten el distintivo ambiental «ECO», siendo estos los vehículos híbridos, de gas o ambos, además de vehículos eléctricos enchufables con autonomía inferior a 40 km, híbridos no enchufables, vehículos propulsados por gas natural y gas (GNC y GNL) o gas licuado del petróleo (GLP) que cumplan previamente con los requisitos de la etiqueta «C», además de los vehículos eléctricos de batería, eléctricos de autonomía extendida, eléctricos híbridos enchufables con una autonomía superior a 40 km o vehículos de pila de combustible, que podrán acceder a la ZBE con el distintivo ambiental «0» ([DGT, 2024](#)).

Así, la Norma Euro más reciente es la 6d. Sin embargo, ya está aprobada la futura Norma Euro 7 por el Parlamento Europeo desde el mes de marzo de 2024. Esta última establecerá límites de emisiones más estrictos para todos los contaminantes con previsión de entrada en vigor a partir del 1 de julio de 2025 para turismos y furgonetas ligeras y a partir del 1 de julio de 2027 para el resto de vehículos (CE, 2022).

Es necesario tener en cuenta los requisitos necesarios para la fabricación de vehículos en cuanto a emisiones con el fin de obtener una aproximación a la efectividad de la ZBE de Sevilla, considerando que la principal medida de restricción de acceso al interior de la ZBE es el año de matriculación del vehículo en base al potencial contaminante del mismo.

## **2. Objetivos principales y específicos**

El presente estudio tiene como objetivo principal elaborar una propuesta metodológica simplificada de tal manera que permita determinar si las ZTR y la ZBE de Sevilla son efectivas para la mejora de la calidad del aire urbano relacionado con el material particulado vinculado al tráfico. Además, se aportará la reducción necesaria de circulación de vehículos en dos zonas de Sevilla con objeto de no superar los niveles de PM10 en 2030, los cuales se han alcanzado en la actualidad en la ciudad.

Para conseguir el objetivo principal se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Se analizarán las concentraciones del material particulado atmosférico (PM10) y su composición química registradas en las estaciones de tráfico de Sevilla.
- Se permitirá la contribución de las emisiones de la fuente del tráfico.
- Se estipulará la reducción de PM10 necesaria para cumplir con los VLA de la futura Directiva Europea de calidad del aire, de tal manera que se determine el número de vehículos a reducir para cumplir con dichos VLA.

Sumado a ello, se analizará el comportamiento hiperlocalizado de PM vinculado al tráfico, de tal manera que permita analizar la variación espacial de PM según la morfología edificatoria y las regulaciones del flujo del tráfico de cada zona.

Por último, y para comprobar la efectividad de las restricciones de acceso y el diseño de la ZBE de Sevilla, se analizará la antigüedad del parque automovilístico del área metropolitana de Sevilla y se establecerá una comparativa con las ZBE de otras ciudades europeas.

### 3. Metodología y fuentes de información

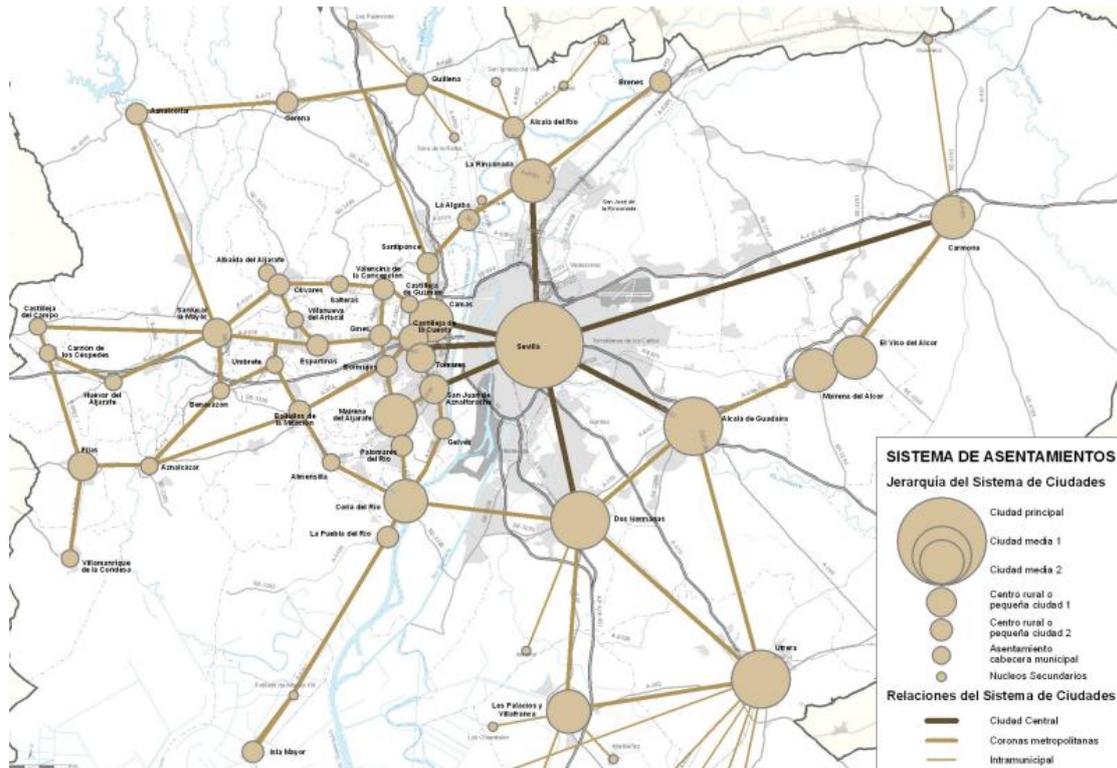
#### 3.1 Área de estudio

##### 3.1.1 Marco geográfico: Sevilla y su aglomeración urbana

La ciudad de Sevilla es la capital de la comunidad autónoma de Andalucía, siendo la cuarta ciudad de España en cuanto a población, con 684 164 habitantes en 2023 según los datos del Instituto Nacional de Estadísticas ([INE, 2024](#)). Por tanto, al ser una ciudad con una población superior a 50 000 habitantes, queda obligada a implementar una ZBE en su núcleo urbano, según lo establecido en la [Ley 7/2021](#).

Si se considera la Aglomeración Urbana de Sevilla (AUS en adelante), que comprende dos coronas de 46 municipios con relaciones y vinculaciones de carácter metropolitano ([Junta de Andalucía, 2009](#)), la población en 2023 asciende a 1 557 023 habitantes ([DGT, 2024](#)), siendo una de las áreas metropolitanas más importantes de España en cuanto a población. En este sentido, se estima que el área metropolitana aporta a la ciudad de Sevilla unos 400 000 desplazamientos diarios ([Ayuntamiento de Sevilla, 2024](#)). De esta manera, el tráfico en la ciudad no se puede entender aislado de su área metropolitana, puesto que la ciudad de Sevilla tiene influencia sobre los otros 45 municipios que conforman la AUS ([Junta de Andalucía, 2009](#)).

Por tanto, aunque el área objeto de estudio se halle en la ciudad de Sevilla, se tomarán como referencia los datos del parque automovilístico de toda la AUS, ya que las estimaciones de los desplazamientos diarios desde el área metropolitana hacia la capital suponen en torno al 45 % de los desplazamientos realizados en Sevilla durante el 2023 ([Figura 2](#)).



**Figura 2.** Mapa de jerarquía de ciudades de la Aglomeración Urbana de Sevilla. Fuente: Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Sevilla (Junta de Andalucía, 2009).

### 3.1.2 Características climáticas de Sevilla

La ciudad de Sevilla está bajo la influencia del clima mediterráneo de interior, con veranos calurosos y secos e inviernos suaves.

La media anual de temperatura es de 19.2 °C, la mayor en Europa, con alrededor de 3000 horas de luz solar y una media de 540 mm de precipitaciones al año, concentradas entre octubre y abril. La tendencia del viento suele tomar dos direcciones, SE-NW, coincidiendo con el eje que describe el Valle del Guadalquivir que permite la entrada de brisas marinas (Castell *et al.*, 2010).

Cabe destacar que la ciudad experimenta frecuentes eventos de contaminación fotoquímica principalmente en la estación cálida (Notario *et al.*, 2012).

### 3.1.3 Parque automovilístico de la aglomeración urbana de Sevilla e intensidad del tráfico en la ciudad

La ciudad de Sevilla alberga un parque automovilístico censado de 484 430 vehículos en 2023. Si se considera todo el territorio de la AUS, el parque automovilístico asciende a 1 130 387 vehículos para la misma fecha según los datos de la DGT (2024). Así pues, Sevilla representa en torno al 43 % del parque automovilístico de la AUS.

El parque automovilístico de la AUS podría ser considerado relativamente antiguo, ya que la edad media está en 13.06 años para los vehículos censados en el año 2023. Si se toman solo los turismos censados en la AUS, estos tienen una antigüedad media de 12.63 años. Ello implica que la media de los turismos circula bajo los estándares de la Norma Euro 4. Por tanto, con respecto a la emisión de partículas y óxidos de nitrógeno, el parque automovilístico de la AUS se encontraría relativamente obsoleto en comparación con los niveles que producen los vehículos más modernos para estos contaminantes (Tabla 4).

**Tabla 4.** Antigüedad de los vehículos de la ciudad de Sevilla y su aglomeración urbana. Datos Municipales Generales de 2023 de la DGT (Dirección General de Tráfico, 2024).

	Sevilla	Total AUS
<b>Parque total de vehículos</b>	484 430	1 130 387
<b>Antigüedad media del parque (&lt;25 años)</b>	12.63 años	13.06 años
<b>Parque total de turismos</b>	323 695	770 007
<b>Antigüedad media del parque de turismos</b>	12.03 años	12.44 años
<b>Parque total de turismos (&lt;4 años)</b>	34 854	77 429

Por otro lado, el parque de turismos de la AUS, que cuenta con una antigüedad inferior a cuatro años y que, por tanto, estarían fabricados bajo los estándares de la Euro 6c en adelante, suma un total de 77 429, suponiendo tan solo en torno al 10 % del parque de turismos total de la AUS (Tabla 4).

Con respecto a la intensidad del tráfico, cabe mencionar que la media diaria en la ciudad de Sevilla para el año 2023 fue de 874 974 vehículos que circulaban por las vías de Sevilla a diario, muy superior a los 723 039 vehículos que circularon a diario en 2022 (Ayuntamiento de Sevilla, 2024). Es necesario señalar que estas cifras no contienen los registros de algunas de las rutas, por lo que cifra de vehículos que circulan a diario por Sevilla sería superior.

### 3.1.4. Contexto próximo a las estaciones de calidad del aire de Tráfico

Para este estudio se analizan los datos de calidad del aire recogidos por las estaciones de tráfico Príncipes, ubicada dentro del Parque de los Príncipes, y Torneo, ubicada en Calle Torneo (Figura 3), ambas con importante influencia de tráfico. Para comprender los datos registrados es importante tener en cuenta el contexto en el que se encuentran, ya que ayudarán a entender las fuentes de emisión locales.

Estas estaciones son estratégicas dentro de la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire de Andalucía, dado que están situadas en puntos representativos con el objetivo de optimizar la información sobre la distribución espacial de la

contaminación y orientadas a la contaminación debida al tráfico de vehículos (Junta de Andalucía, 2024).



**Figura 3.** Estaciones de tráfico en Sevilla. A): Príncipes. B): Torneo.

La estación de calidad del aire de Príncipes ( $37^{\circ}22'31''N$ ,  $6^{\circ}00'19''W$ ), se encuentra en el interior del Parque de los Príncipes, concretamente en el interior del parque canino. El norte y el este de la estación de Príncipes se encuentran enmarcados por la barriada de Los Remedios, con edificios altos destinados a la vivienda y al uso laboral, dispuestos en calles largas y relativamente estrechas en comparación con la altura de los edificios. Al oeste de la estación se encuentra la Carretera Cádiz-Huelva. Al sur se ubica el recinto del Real de la Feria de Sevilla, con una superficie de albero y, un poco más meridional, el Puerto de Sevilla. Al este, a unos 7 km, se encuentra la industria química de Persán S.A. Todo ello puede afectar en mayor o menor medida a la calidad del aire de la zona (Figura 4).



**Figura 4.** Contextos geográficos de las estaciones de tráfico. A): estación de Príncipes. B): estación de Torneo. Triángulo amarillo: estaciones de tráfico.

Por otro lado, en las inmediaciones de la estación de Torneo ( $37^{\circ}23'40''N$ ,  $6^{\circ}00'10''W$ ) se encuentra el Río Guadalquivir al oeste y la zona del Casco Antiguo de la ciudad de Sevilla al este, protegido por la figura municipal de Zona de Tráfico Restringido (ZTR). Inmediatamente al sur se encuentra una zona de aparcamientos y, más alejado, se encuentra el Puerto de Sevilla. A unos 6.5 km al este, se encuentra Persán S.A. Los edificios de la ZTR tienen, con carácter genérico, una altura menor con respecto a los de la barriada de Los Remedios, inferior a los 15.4 m de altura tanto en Calle Torneo como en la en la ZTR Casco Antiguo. La anchura de Calle Torneo carece de relevancia para este estudio debido a la presencia del Río Guadalquivir al oeste.

Por tanto, las dos estaciones de tráfico se encuentran en contextos urbanos diferentes que pueden derivar en un comportamiento distinto debido a la variación espacial de la contribución del tráfico.

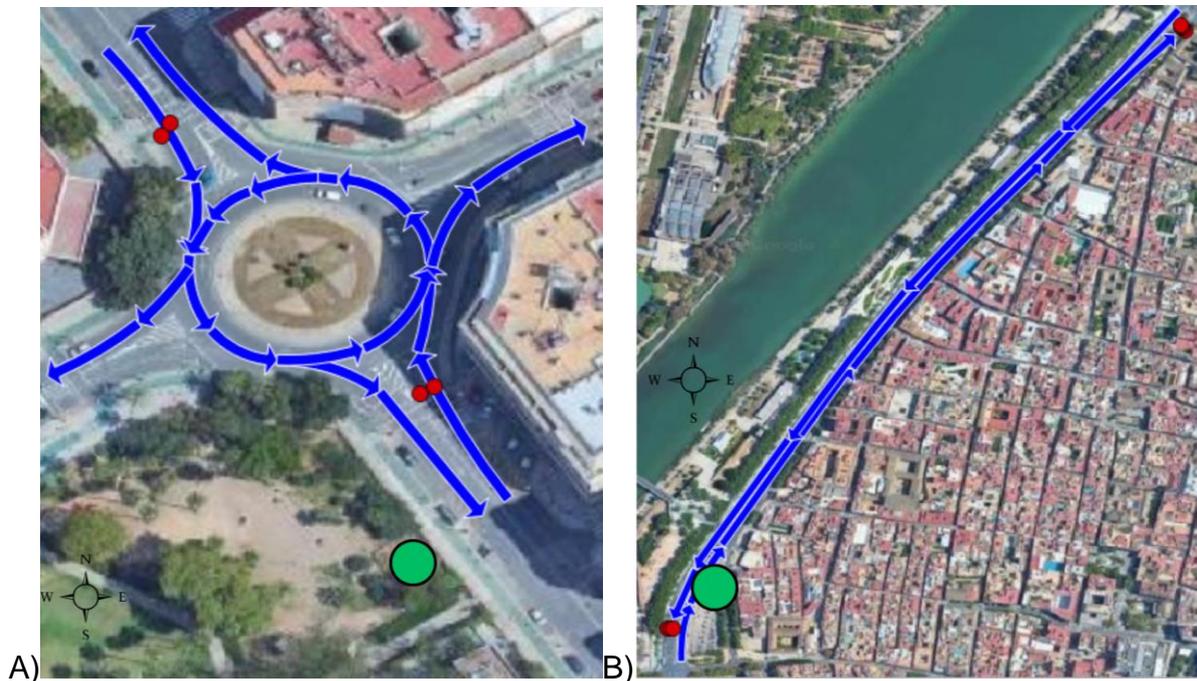
#### 3.1.4.1 Detectores de vehículos próximos a las estaciones de Príncipes y Torneo

El Centro de Gestión de Movilidad del Ayuntamiento de Sevilla (CGM) establece 92 rutas por las que discurre el tráfico de la ciudad y en las que se mide las intensidades medias del mismo. Los detectores de vehículos se insertan en estas rutas y contabilizan los vehículos que detectan en intervalos de cinco minutos sin distinguir entre tipo de vehículo, marca, modelo o tipo de motor.

De esta manera, se seleccionan los detectores que forman la intersección entre las rutas 13 y 14 con las rutas 38 y 39 que se encuentran en la Glorieta República



de la estación de Torneo en ambos sentidos. La intensidad media diaria del tráfico registrada por estos detectores fue de 36 695 vehículos durante el periodo 2021-2023, en aquellas fechas en que hay registros en la estación de Torneo. Se trata de un tráfico intenso, ya que Calle Torneo es una vía de conexión, tanto dentro de la ciudad como con los municipios del área metropolitana de Sevilla (Figura 6).

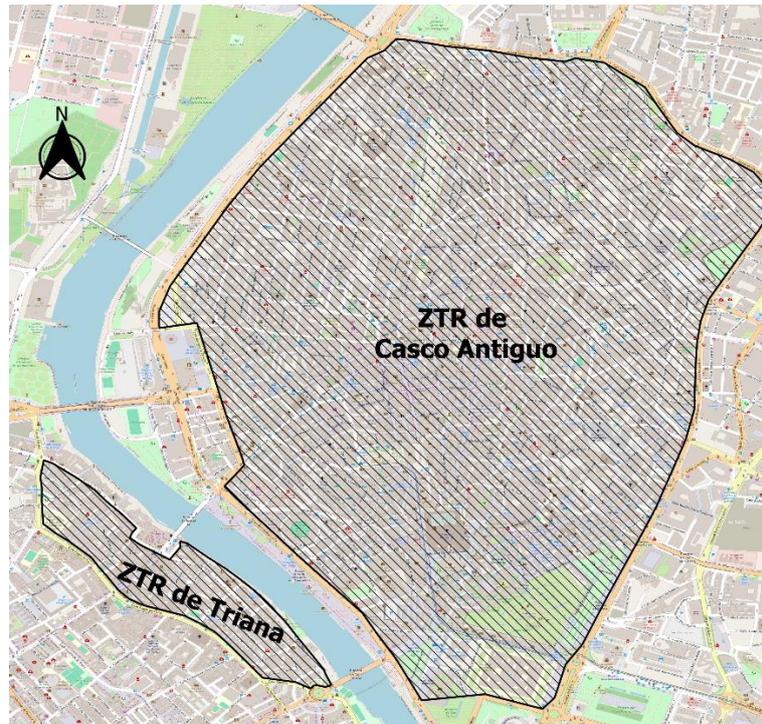


**Figura 6.** Flujo del tráfico en las inmediaciones de las estaciones de tráfico. A): Glorieta República Dominicana, inmediaciones de Príncipes. B): Calle Torneo, inmediaciones de Torneo. Flechas azules: direcciones del tráfico. Puntos rojos: detectores de vehículos. Punto verde: estación de tráfico.

### 3.1.5 Zonas de Tráfico Restringido en Sevilla

Las ZTR de Sevilla no fueron diseñadas como zonas de bajas emisiones, ya que sus restricciones de acceso no se basan en el potencial contaminante de los vehículos (Figura 7).

La ZTR de Casco Antiguo está delimitada por las siguientes calles: Paseo de las Delicias, Paseo de Colón, Reyes Católicos, Julio César, Marqués de Paradas, San Laureano, Torneo, Resolana, Parlamento Andaluz, Muñoz León, Ronda de Capuchinos, María Auxiliadora, Recaredo, Menéndez y Pelayo, Avenida del Cid, Palos de la Frontera y Avenida de Roma. Ninguna de las calles indicadas, que conforman el perímetro exterior, está incluida dentro de la zona de tráfico restringido de Casco Antiguo (BOP de Sevilla, 2022). Dicha ZTR tiene una superficie de, aproximadamente, 330 hectáreas.



**Figura 7.** Delimitación de las ZTR de la Ciudad de Sevilla. Según [BOP de Sevilla \(2022\)](#).

La ZTR de Triana está comprendida en el interior del perímetro delimitado exteriormente por las siguientes calles: Plaza del Altozano, Betis (incluida dentro de la zona de tráfico restringido), Plaza de Cuba, Génova, Pagés del Corro, Clara de Jesús Montero, Alvarado, Castilla, Callao y San Jorge. Ninguna de las calles indicadas, que conforman el perímetro exterior, está incluida dentro de la zona de tráfico restringido de Triana, a excepción de la calle Betis, que sí forma parte de las calles con acceso restringido ([BOP de Sevilla, 2022](#)). Esta ZTR tiene una superficie de, aproximadamente, 19 hectáreas.

Podrán acceder a las ZTR los vehículos que se relacionan a continuación, cuando las condiciones de seguridad de la vía lo permitan y siempre que, tratándose de un servicio, estén debidamente identificados de forma fácilmente reconocible y que se encuentren en el ejercicio de las funciones que les son propias ([BOP de Sevilla, 2022](#)):

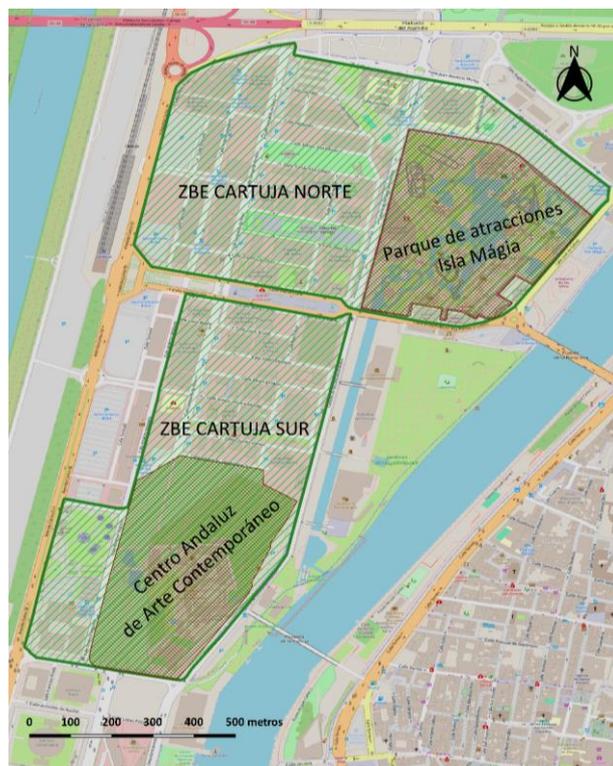
- Los pertenecientes al Servicio de Prevención y Extinción de Incendios y Salvamento.
- Los pertenecientes a los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad.
- Los pertenecientes a la asistencia sanitaria.
- Los pertenecientes al Servicio de Parques y Jardines.
- Los pertenecientes al Servicio de Limpieza Viaria y Recogida de Residuos Sólidos Urbanos.
- Los pertenecientes a los Servicios de Conservación del Alumbrado Público o de Pavimentos de la Gerencia de Urbanismo.
- Los pertenecientes al Servicio de Abastecimiento y Depuración de Aguas.

- Los pertenecientes al transporte público de viajeros.
- Los pertenecientes a empresas de suministro de electricidad, gas, telefonía o similar.
- Los provistos de tarjeta de aparcamiento de vehículos para personas con movilidad reducida.
- Los vehículos de Servicio Público en servicio oficial.
- Los de transporte escolar, previa otorgamiento de la autorización regulada en la presente Ordenanza.
- Los de distribución capilar de mercancías, servicios y suministros exclusivamente durante el tiempo que realicen dichas tareas y en el horario que el Ayuntamiento tenga establecido en cada momento para ellas.
- Los vehículos que recojan o lleven personas con movilidad reducida a un inmueble de la zona. Dicha condición deberá ser susceptible de ser acreditada en todo momento.
- Los vehículos funerarios.
- Los que dispongan de autorización tipo A, B o C reguladas en la Sección siguiente.
- El acceso de cualquier vehículo privado a los aparcamientos de uso público en régimen de rotación.

Podrán acceder a las ZTR los vehículos pertenecientes a subcontratas de servicios públicos, siempre y cuando se presente una comunicación previa al efecto.

### **3.1.6 Zona de Bajas Emisiones de Sevilla**

La ZBE de Sevilla se diseña para implantarla en la zona de la Cartuja, en las inmediaciones de la margen oeste del Guadalquivir. Se trata de un parque científico-tecnológico destinado a centros universitarios, de investigación y oficinas de trabajo de entidades privadas y públicas, así como equipamientos sanitarios culturales y de ocio. En esta zona de Sevilla no existen viviendas. Según las cifras del [Ayuntamiento de Sevilla \(2022\)](#), esta zona atrae 27 887 desplazamientos diarios, de los cuales 15 048 son por motivos laborales ([Figura 8](#)).



**Figura 8.** Delimitación de la ZBE de Sevilla, según el [Ayuntamiento de Sevilla \(2024\)](#), y de los espacios del CAAC e Isla Mágica.

Así pues, la ZBE de Sevilla entra en vigor el 1 de julio de 2024 y se subdivide en Cartuja Norte y Cartuja Sur, separadas por la Calle Marie Curie, una vía con dos carriles para cada sentido ampliamente separados.

De esta manera, la ZBE Cartuja Norte está comprendida por las calles Américo Vespucio desde intersección con Leonardo Da Vinci, Juan Bautista Muñoz, José de Gálvez, Matemáticos Rey Pastor y Castro, Marie Curie y Avenida de Carlos III (excepto aparcamientos de la banda Oeste y su acceso por Hermanos d'Eluyar), ramal de incorporación SE-30 sentido Glorieta Olímpica hasta intersección con Américo Vespucio. Ninguna de las calles indicadas, las cuales conforman el perímetro exterior, está incluida dentro de la ZBE. Por su parte, la ZBE Cartuja Sur está comprendida por las calles Marie Curie, Camino de los Descubrimientos, Francisco de Montesinos y Avenida de Carlos III (excepto aparcamientos de la banda Oeste y sus accesos). Ninguna de las calles indicadas, las cuales conforman el perímetro exterior, está incluida dentro de la ZBE ([Ayuntamiento de Sevilla, 2024](#)).

Con carácter general, podrán acceder al interior de las zonas delimitadas de bajas emisiones Cartuja Norte y Cartuja Sur, por razón de su potencial contaminante y sin necesidad de registro previo, todos los vehículos con distintivo ambiental «B», «C», «Eco» y «Cero Emisiones», de acuerdo con la clasificación recogida en el Reglamento General de Vehículos ([BOP de Sevilla, 2022](#)).

Podrán acceder al interior de ambas ZBE de manera adicional ([Ayuntamiento de Sevilla, 2024](#)):

- Motocicletas y ciclomotores, sin necesidad de trámite alguno.
- Vehículos destinados al transporte de mercancías de M.M.A. mayor a 3500 kg y menor o igual a 12 000 kg, sin necesidad de trámite alguno.
- Vehículos destinados al transporte de mercancías de M.M.A. mayor a 12 000 kg, previa autorización expresa otorgada por la Dirección General de Movilidad del Ayuntamiento de Sevilla.
- Vehículos de categoría M que tengan más de 8 plazas de asiento además del conductor, sin necesidad de trámite alguno.
- Bicicletas, ciclos y ciclos de pedaleo asistido y vehículos de movilidad personal, sin necesidad de trámite alguno.
- Acreditados TIPO A (residentes), previa obtención de la acreditación en el Distrito Municipal de Triana.
- Acreditados TIPO B (usuarios plaza garaje en zona restringida), previa obtención de la acreditación en el Distrito Municipal de Triana.
- Vehículos que transporten o recojan a personas de movilidad reducida, con registro previo de la persona titular de la tarjeta PMR y comunicación o autorización previa al acceso de vehículos, en la que indicará matrícula del mismo en la declaración responsable (Modelo M021).
- Vehículos vinculados a la actividad económica de empresas ubicadas en el interior de las zonas indicadas, previa autorización expresa otorgada por la Dirección General de Movilidad del Ayuntamiento de Sevilla (Modelo M022).
- Vehículos de emergencias y asistencia sanitaria, sin necesidad de trámite alguno siempre y cuando su uso se encuentre debidamente recogido en los dos últimos dígitos del código de clasificación en la ficha técnica del vehículo. En caso contrario se gestionará la declaración responsable con el Modelo M023.
- Vehículos con destino a alguno de los estacionamientos de uso público en régimen de rotación ubicados en el interior de las zonas indicadas, siendo el destino cotejado mediante a través de las matrículas captadas por un sistema de reconocimiento, sin necesidad de trámite alguno.
- Vehículos que transporten pacientes para su atención por motivo de urgencias o alta hospitalaria, mediante justificación de tales circunstancias en las 48 horas siguientes al acceso a la zona afectada (Modelo M024).
- Vehículos destinados a transporte público de viajeros en vehículos de turismo (Taxi y VTC): sin necesidad de trámite alguno.
- Vehículos de servicios municipales, con autorización previa de la Delegación de Movilidad.
- Vehículos blindados de transporte de fondos y gestión de efectivo, sin necesidad de trámite.

- Vehículos de servicios médicos acondicionados para funciones sanitarias, sin necesidad de trámite.
- Vehículos funerarios, sin necesidad de trámite.
- Grúas de asistencia en carretera, sin necesidad de trámite.
- Vehículos taller, sin necesidad de trámite alguno.
- Vehículos de RTV, sin necesidad de trámite.
- Vehículos nupciales, previa autorización otorgada por la Dirección General de Movilidad del Ayuntamiento de Sevilla.
- Vehículos de transporte de personas a centros de estancia diurna, sin necesidad de trámite.
- Los vehículos recogidos en los artículos 9 y 16 de la Ordenanza de Circulación cuyo uso no se encuentre debidamente recogido en los dos últimos dígitos del código de clasificación en la ficha técnica del vehículo deberán rellenar el Modelo M024.

El espacio ocupado por la ZBE tiene una extensión de 1.25 km<sup>2</sup> (MITECO, 2024) (Tabla 5). Sin embargo, dentro de la ZBE existen dos espacios que ocupan una considerable extensión de superficie dentro de la misma. Estas entidades son, por un lado, el Centro Andaluz de Arte Contemporáneo (CAAC), situado en la ZBE Cartuja Sur, y, por otro lado, el parque de atracciones Isla Mágica, situado en la ZBE Cartuja Norte. Estos espacios no pueden ser considerados como útiles dentro de la ZBE, ya que no se permite la circulación de vehículos a motor dentro de ellos, limitando el margen de mejora de la calidad del aire en el interior de la ZBE.

**Tabla 5.** Relación de espacios y superficies dentro de la ZBE de Sevilla.

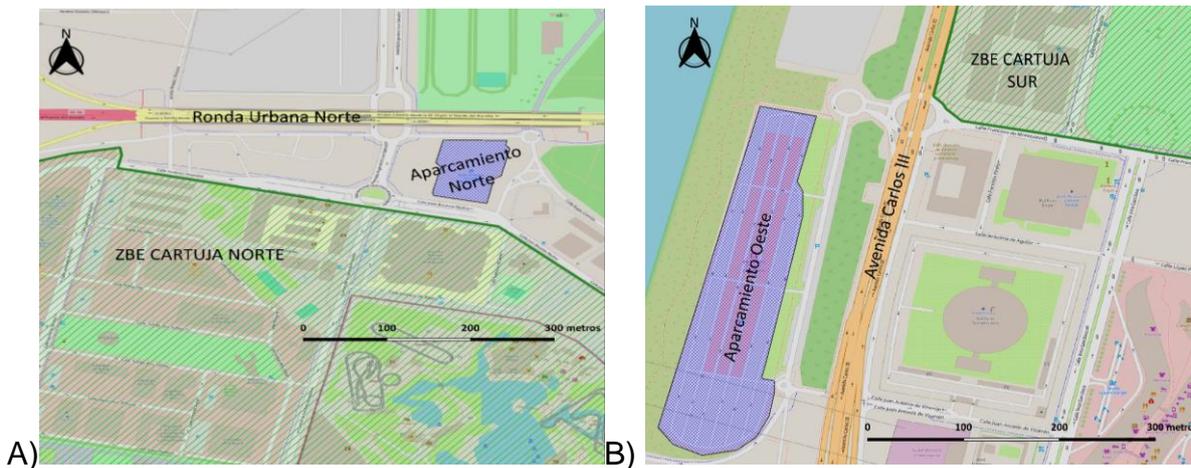
Espacio	Superficie	Porcentaje de ZBE
Isla Mágica	211 759 m <sup>2</sup>	17%
CAAC	214 148 m <sup>2</sup>	17%
Isla Mágica + CAAC	425 907 m <sup>2</sup>	34%
Superficie útil ZBE	824 093 m <sup>2</sup>	66%
Total ZBE	1 250 000 m <sup>2</sup>	100%

En cuanto a las restricciones de acceso de la ZBE, la normativa municipal establece que estas sean de 7:00 a 19:00 horas de lunes a viernes, motivadas por el horario laboral y los días laborables de la semana (Figura 9).



**Figura 9.** Señalización para acceder al interior de la ZBE de Sevilla.

En las inmediaciones de la ZBE también se encuentran la Avenida Carlos III, al oeste de la ZBE, y la Ronda Urbana Norte, al norte de la misma, y cada una cuenta con tres carriles para cada sentido (Figura 10).



**Figura 10.** Situación de los aparcamientos y las circunvalaciones con respecto a la ZBE. A): Aparcamiento norte (ETS). B): Aparcamiento de la banda oeste.

### 3.2 Muestreo de PM10 y gravimetría

En las estaciones de Príncipes y Torneo se muestrea PM10 mediante captadores de bajo volumen DIGITEL. Los filtros empleados en cada muestreo son de fibra de cuarzo y de 47 mm de diámetro, marca Munktell®. La duración del muestreo es 24 horas (desde 00:00 a 24:00h) y la periodicidad es cada cuatro días.

El análisis gravimétrico de los filtros blancos y muestreados se realizaron en el Laboratorio de Acreditación y Referencia de la Calidad del Aire de Andalucía (LARCA) de la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía (AMAyA) en una sala acondicionada con temperatura y humedad relativa constante ( $T=20\pm 1$  °C y  $50\pm 5$  %, respectivamente), siguiendo los criterios de la NORMA UNE-EN 12341:1999. Los filtros blancos fueron precalentados a 200 °C durante 4 horas y estabilizados durante 24 horas antes del inicio de la pesada.

### 3.3 Análisis químico de PM10

Después del análisis gravimétrico, una vez obtenidas las concentraciones de PM10, se efectúa el tratamiento previo al análisis basado en el método desarrollado por [Querol \*et al.\*, \(2002\)](#), que consiste en una digestión ácida total para el análisis de elementos mayoritarios y traza, lixiviación para el análisis de iones y obtención de un *punch* de 1 x 1.5 cm para el análisis de TOT.

Se analizaron un total de 154 filtros en Torneo y 179 en Príncipes durante el periodo de estudio, pero no se alcanzó el objetivo de 180 en el caso de Torneo debido a fallos técnicos en el equipo de muestreo.

En relación a la digestión ácida, una fracción de cada filtro fue digerida en medio ácido para determinar las concentraciones de elementos mayores y traza (Ca, S, Al, Fe, V, K, Ti, Na, Mg, Mn, Pb, Sr, Ba, Zn, Cu, Cr, As, P, Ni, Co). La digestión se realizó con base en el siguiente procedimiento:

1. Se introduce la mitad del filtro de 46 mm de diámetro en una bomba de PFA (Saville®) de 60 ml con 0.5 ml de HNO<sub>3</sub> y 1 ml de HF. Posteriormente, se introducen en una estufa de 90 °C durante un mínimo de 4 horas. Los ácidos utilizados son Merck Suprapur® con una concentración del 65 % el HNO<sub>3</sub> y 40 % el HF.
2. Transcurrido este tiempo, se extrae la bomba de la estufa y se deja enfriar a temperatura ambiente. A la solución existente, se añade 0.5 ml de HClO<sub>4</sub> (Merck Suprapur®, 60 % de concentración) y se deja evaporar en una placa a  $T=180$  °C durante 36 horas. La relación de los ácidos siempre debe ser de 1:2:1 (HNO<sub>3</sub>:HF:HClO<sub>4</sub>) cuando se trabaja con filtros de fibra de cuarzo con material particulado. El HNO<sub>3</sub> tiene la función de disolver la materia orgánica (restos vegetales e insectos) y carbonatos, mientras que el HF disuelve partículas de aluminosilicatos y el propio filtro. Posteriormente se añade el HClO<sub>4</sub> con el fin de digerir la materia orgánica más resistente.
3. Una vez que se evapora la solución ácida queda un residuo sólido seco o «perla» que se disuelve por la adición de 0.5 ml HNO<sub>3</sub> y agua bidestilada (grado Mili-Q) hasta enrasar 10 ml de solución en un matraz, con lo que se obtiene

una solución acidificada al 5 % de HNO<sub>3</sub>. Esta solución puede analizarse tanto por Espectrometría de Emisión Atómica con fuente de Plasma Acoplado por inducción (ICP-OES) como por Espectrometría de Masas con Fuente de Plasma acoplada por Inducción (ICP-MS).

4. Junto con las muestras, se analizan filtros blancos y el material estándar de referencia, en este caso se trata de NIST1663c (cenizas volantes), que se utilizan para asegurar la correcta realización y análisis de las muestras.

Se han empleado cuatro técnicas analíticas multielementales principales en la determinación de la composición química total de PM:

- **ICP-MS:** la espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente es una de las técnicas instrumentales analíticas que supuso a mediados de los años 90, una revolución en el análisis de muestras geológicas y medioambientales. Esta técnica es altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt). Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas).
  - El equipo donde se realizaron los análisis de ICP-MS fue AGILENT 7900® Servicios de Instrumentación Científica de CIQSO (SIC-CIQSO). Se trata de un equipo octopolar y celda de colisión con He, lo que permite minimizar cualquier tipo de interferencia atómica. Se determinaron las concentraciones de Ba, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, Zn, As, Co, Li, Be, Sc, Ga, Ge, Se, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Hf, Ta, Bi, Hg, Tl y W (elementos traza). La sintonía del equipo fue realizada mediante una solución de 10 ppb de <sup>7</sup>Li, <sup>89</sup>Y y <sup>205</sup>Tl. La calibración empleada fue externa con soluciones cóctel de AGILENT de 0.5 ppb, 1 ppb, 10 ppb, 50 ppb, 100 ppb y 250 ppb, además de un blanco al 5 % de HNO<sub>3</sub>.
- **ICP-OES:** el equipo usado fue AGILENT 5110®, de los mismos SIC-CIQSO, instalado en julio de 2018. Se analizaron las concentraciones de los siguientes elementos: Ca, S, Al, Fe, V, K, Ti, Na, Mg, Mn, Pb, Sr, Ba, Zn, Cu, Cr, Ni y P (elementos mayoritarios). Para ello, se empleó una calibración externa y se utilizó una solución patrón de blanco, 0.05 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm y 100 ppm. Los estándares de calibración utilizados son las soluciones monoelementales de Agilent Technologies de 1000 µg/ml (Ca, Cu, Fe, K, Bi, Mg, Mn, Na, Ni, P, Ti y Al) y S (100 ppm). La secuencia de análisis consistió en blanco, 0.05 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm y 100 ppm, blancos de filtros, material de referencia, muestras, blanco, monitor (std 0.5 ppm) etc. Se introdujo Y como patrón interno.

- La precisión y exactitud medida de la mayoría de los elementos analizados en ICP-OES e ICP-MS se encuentra en el rango de 5-10 % y fueron determinadas mediante el análisis repetido del estándar internacional NIST 1633c (cenizas volantes) con el fin de controlar la calidad de los resultados.
- **Cromatografía Iónica:** para la cuantificación de aniones y cationes, se analizaron las soluciones resultantes de la lixiviación de los filtros mediante una alícuota de cada muestra filtrada para conocer la composición química de la fracción soluble (aniones:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , y  $\text{NO}_3^-$ ; y de cationes solubles:  $\text{NH}_4^+$ ). El equipo utilizado es 883 Basic IC plus METHROM.
- **Transmitancia Termo-óptico (TOT):** la concentración de C y especies (orgánico y elemental) se realiza mediante un equipo termo-óptico SUNSET. El equipo utiliza un conjunto de gases para oxidar la muestra y posterior análisis de  $\text{CO}_2$ . Se emplea *punch* de 1 x 1 cm<sup>2</sup> y *standard* de sacarosa de 4.2 mg/cm<sup>2</sup>.

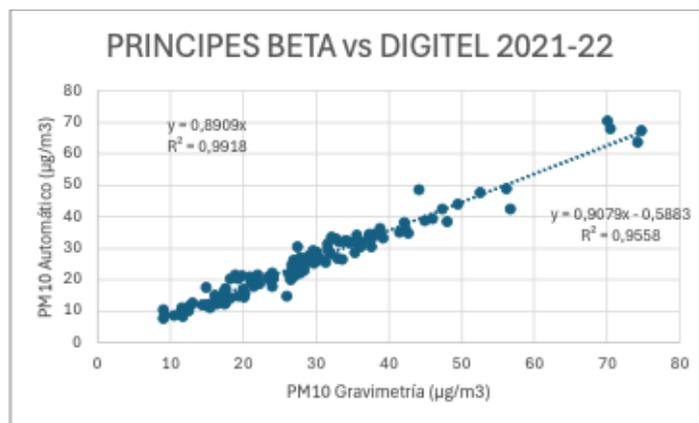
### 3.4 Evolución histórica de PM10 y gases contaminantes en Príncipes

Para entender la situación actual de la calidad del aire en la estación de Príncipes se evalúan los datos de la serie 2021-2023 con respecto a la evolución histórica. Para ello, se analizan los datos diarios de PM10, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> (Tabla 6) y polvo sahariano que ofrece la estación de Príncipes para el periodo comprendido entre junio de 2012 y junio de 2024, lo que completa una serie de 12 años. Esto permitirá tener una visión general del patrón que siguen estos contaminantes.

**Tabla 6.** Métodos de medidas de contaminantes *online* analizados en la estación de Príncipes.

Contaminante	Marca equipo	Principio de medida
NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	TELEDYNE T200	Quimioluminiscencia
O <sub>3</sub>	TELEDYNE 400E	Absorción UF
CO	TELEDYNE model 300E	Comparando la energía IR absorbida por una muestra con la absorbida por un gas de referencia de acuerdo con la ley Beer-Lambert
SO <sub>2</sub>	Thermo Scientific model 43i	Cromatografía de gases
PM10	Thermo Scientific model 5014i	Atenuación radiación beta

Por otro lado, a los valores de PM10 se le aplica un factor de intercomparación obtenido tras la correlación mediante Excel entre la concentración registrada por gravimetría en laboratorio y la concentración registrada por el equipo de atenuación de radiación beta de la estación de Príncipes (Figura 11). Se realiza mediante el análisis de 123 filtros entre los años 2021 y 2022. De esta manera, el factor se calcula mediante la inversa de la pendiente sin el intercepto. Como resultado, se obtiene un factor de intercomparación de 1.12, que se debe aplicar a los resultados de PM10 obtenidos por el equipo de atenuación beta.



**Figura 11.** Comparación de niveles PM10 equipo automático (atenuación beta) frente PM10 gravimetría (Digitel bajo volumen) para la obtención del factor de intercomparación.

### 3.5 Contribución de fuentes

La composición química de PM10 de los filtros analizados y en las estaciones de Príncipes y Torneo se utilizó en la obtención de la contribución de fuentes mediante el método PMF5 (*Positive Matrix Factorization v5.0*), un *software* que utiliza un algoritmo de factorización matricial positiva desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés) que permite identificar y cuantificar las fuentes de contaminación del aire en PM. El algoritmo descompone una matriz de datos de contaminantes en dos matrices: una matriz para perfiles de fuentes que contiene las composiciones químicas de las fuentes de contaminación y otra matriz de contribución de fuentes que contiene la concentración de cada fuente.

PMF5 funciona de tal manera que el usuario ingresa los datos de las concentraciones y de la composición química de las partículas junto con la incertidumbre para que el *software* ajuste los perfiles y las contribuciones de fuente con el objetivo de que, en última instancia, el usuario interprete los resultados identificando las fuentes de contaminación y para que pueda cuantificar sus contribuciones. Después de esto, se determina la contribución de la fuente del tráfico y se procede al cálculo de la reducción necesaria para alcanzar los VLA con respecto a la futura Directiva Europea de calidad del aire ambiente. Así, la reducción necesaria de la contribución del tráfico es de un 33 %.

Así pues, las fuentes de contaminación atmosférica se pueden identificar según la composición química de las partículas ([Millán-Martínez et al., 2021](#)):

- **De origen natural:**

- Mineral: se puede identificar, ya que está caracterizada por componentes típicos de los silicatos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Fe, Ca, Rb, Ti, Mn y Sr).

- Marina: se puede identificar por la presencia de elementos marinos como Cl, Na y Mg.
- **De origen antrópico:**
  - Tráfico: se caracteriza por altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , carbono total asociadas a las emisiones del combustible gastado de los vehículos y a las altas concentraciones de Sn, Sb, Cu, Zn, K, Ca y Ti que se encuentran en las partículas de los frenos, las cubiertas de los neumáticos y las rodaduras de los vehículos en resuspensión ([Amato et al., 2014](#)).
  - Regional: proviene de fuentes de emisión no locales como la industria y el tráfico marítimo caracterizado por la presencia de componentes típicos como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  y altas concentraciones de Ni, V, Co, Sn, Pb, Sb, Cr y Mn.
  - Industrial: aparece caracterizado con un perfil químico determinado por las industrias cercanas a la estación de calidad del aire.

Por tanto, mediante la composición química del material particulado se infiere el perfil que se corresponde con el tráfico y se determina cuál es la contribución de este al PM10 de Sevilla.

### **3.6 Análisis estadístico de la intensidad del tráfico y de la contribución del tráfico**

Se debe obtener los datos del número de vehículos que circulan por las inmediaciones de las estaciones de tráfico a diario. Así, el CGM de Sevilla ofrece los datos para el periodo 2021-2023 registrados por los detectores de la ciudad, que recopilan el sumatorio de vehículos que detectan en intervalos de cinco minutos. El volumen de información total suma más de 150 millones de registros, que son filtrados y analizados mediante lenguaje de programación Python en el *software online* Google Colab, que permite procesar tal volumen de información.

Así pues, se hace un primer filtrado mediante el uso de la librería Vaex de Python, que permite el filtrado de datos masivos, con el fin de obtener solo los datos de los vehículos que circulan por los detectores de vehículos situados en las inmediaciones de Príncipes y Torneo. Tras ello, se analizan los datos con la librería Pandas de Python y se realiza un segundo filtrado en el que se seleccionan aquellos registros en los que los detectores no presentan averías («N», véase [Figura 12](#)), que coincidan con las fechas en las que hay registros en las estaciones de tráfico a la vez que se hace un sumatorio diario del número de vehículos.

```
Averia
-----
# -> Dato sustituido por típico según hora y tipo de día
B -> Detector con avería de obsoleto. Datos INCORRECTOS.
C -> Detector con avería de CONTEO NULO. Datos INCORRECTOS.
N -> Detector SIN AVERIA. DATOS CORRECTOS.
```

**Figura 12.** Posibles de averías que pueden presentar los detectores de vehículos de Sevilla. Fuente: [Centro de Gestión de la Movilidad de Sevilla, Ayuntamiento de Sevilla \(2024\)](#).

Tras este último filtrado, se obtienen un total de 149 registros sin incidencias en los detectores de vehículos de los 179 registros que realiza estación de Príncipes. Por su parte, Torneo no experimenta una reducción del número de registros tras este último filtrado. Con ello, se calcula la proporción de vehículos que hay que reducir con base en la reducción del 33 % de la contribución del tráfico para cumplir con los VLA de la futura Directiva.

Posteriormente, con el *software* estadístico de programación RStudio, que trabaja con lenguaje de programación R, se utiliza la función «TimeVariation» de la librería Openair ([Carslaw y Ropkins, 2012](#)) para crear gráficos que permiten visualizar el comportamiento de la contribución del tráfico y del número de vehículos a nivel anual y a nivel semanal en días laborables, de tal manera que sirva para establecer una aproximación a las primeras hipótesis que expliquen la influencia del total de vehículos diarios sobre la contribución del tráfico en PM10.

### 3.7 Uso de sensores de bajo coste para la calidad del aire

Las estaciones de calidad del aire ayudan a describir la variabilidad diaria y la tendencia de la contaminación del aire a largo plazo. Sin embargo, su capacidad para monitorizar la contaminación local, como, por ejemplo, la fuente del tráfico, es limitada porque la contaminación del aire en la ciudad puede cambiar rápidamente en el tiempo y en el espacio ([Frederickson et al., 2022](#)). Representar esta variabilidad requeriría una extensa red de equipos que monitoricen con rapidez la calidad del aire en toda la ciudad, lo cual no es viable debido a los costes de inversión y de mantenimiento que requieren las estaciones de calidad del aire ([Kumar et al., 2015](#), [Snyder et al., 2013](#)).

En este sentido, algunas investigaciones demuestran que los nodos de sensores de bajo coste (LCS por sus siglas en inglés) pueden proporcionar información valiosa y extender el alcance de las estaciones de calidad del aire tradicionales. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que estos puntos de muestreo no pueden lograr el mismo nivel de precisión que los sistemas tradicionales de las estaciones de calidad del aire, por lo que es crucial caracterizar cuidadosamente el rendimiento de los nodos de los LCS ([Kumar et al., 2015](#), [Nagendra et al., 2019](#)).

La adquisición de datos se realizó mediante el uso del AirBeam3, un LCS de código abierto diseñado por Michael Heimbinder ([Habitatmap, 2023](#)), una empresa

tecnológica sin ánimo de lucro que crea soluciones de visualización de datos y monitorización ambiental. A través de Bluetooth, el LCS se puede conectar a un *smartphone* (con sistema operativo Android o iOS) mediante la aplicación AirCasting. Al final de cada sesión móvil, los datos recopilados se envían a una plataforma de código abierto y gratuita llamada Crowdmap, donde se combina con coordenadas geográficas obtenidas mediante GPS para generar mapas de calor que indican las concentraciones de PM (Zafra-Perez *et al.*, 2024). Un resumen de las especificaciones del sensor Airbeam3 se muestra en la [Tabla 7](#).

**Tabla 7.** Especificaciones técnicas del AirBeam3. Fuente: [Zafra-Pérez et al., 2024](#).

<b>Especificaciones</b>	<b>AirBeam3</b>
Dimensiones	9.5 x 11 x 2.7 cm
Peso	170 g
Batería	PKCell, ICR18650 3350mAh 3.7V
Autonomía de la batería	hasta 17 horas
Microcontrolador de comunicación	Espressif, ESP32-WROOM-32D
Sistemas de comunicación	Bluetooth, WiFi, 4G, GPS y microSD
T (°C) de trabajo	-10 a 60
<b>Sensores</b>	
PM (PM10; PM2.5; PM1)	Plantower PMS7003 0.3 a 10 µm
Temperatura	Texas Instruments, HDC1080DMBR
Humedad relativa	Texas Instruments, HDC1080DMBR
<b>Características</b>	
Selección de unidad	Métrico (°C) e imperial (°F)
Idioma	Inglés/Castellano
Accesorios	Cable tipo C

Se trata de un dispositivo que permite conocer la concentración en el aire de PM10, PM2.5 y PM1 *online*, transmitidos a un teléfono móvil mediante Bluetooth. El LCS toma una muestra de la concentración de partículas en el aire ambiente cada segundo asignándole la fecha, hora, coordenadas (SRC: WGS84), temperatura y humedad correspondientes en el momento de muestreo y permite descargar los datos registrados en formato CSV (*comma-separated values*), de tal manera que se pueden visualizar en un sistema de información geográfica (SIG).

Así pues, el recorrido se realiza con el LCS anclado en la ventana del piloto del coche, alejado de las emisiones del escape del coche para una menor interferencia en el muestreo. Se recorre el perímetro de las ZTR, la ZBE y las zonas verdes y el interior de la ZBE. El interior de la ZBE se recorre trazando dos ejes perpendiculares en Cartuja Norte y en Cartuja Sur. Sin embargo, el interior de las ZTR y de los parques se recorren con el sensor anclado en bicicleta debido a las restricciones para los vehículos motorizados. Se recorre el interior de las ZTR trazando un eje vertical (de norte a sur) y un eje horizontal (de oeste a este), de tal forma que dividan las ZTR en cuartos lo más simétricos posible. Por otro lado, el interior de los parques se recorre de la manera en que los obstáculos físicos lo permiten.

Para reducir la variabilidad debido a la franja horaria del tráfico, el interior de cada zona se recorre inmediatamente después de su perímetro. Con ello se pretende analizar el contraste exterior-interior en los niveles de PM de cada zona. El orden de las zonas muestreadas es el siguiente:

1. ZTR Casco Antiguo (incluye estación de Torneo).
2. ZBE Cartuja.
3. ZTR Triana, Parque de los Príncipes (incluye estación de Príncipes) y Parque de María Luisa.

El muestreo con el LCS se realiza el lunes 17 de junio de 2024, comenzando a las 7:50 horas en las inmediaciones de los detectores situados al norte de la estación de Torneo y finalizando a las 14:30 horas en el interior del Parque de los Príncipes. Las condiciones meteorológicas del día son recabadas de la estación meteorológica de Tablada ([AEMET, 2024](#)) ([Tabla 8](#)).

**Tabla 8.** Datos meteorológicos de la estación de Tablada (Sevilla) para el día de muestreo con el LCS. Datos de la [Agencia Estatal de Meteorología \(2024\)](#).

Fecha de muestreo	Lunes, 17 de junio de 2024
Temperatura media	25.2 °C
Precipitación	0.0 mm
Temperatura mínima	17 °C
Hora temperatura mínima	5:03 horas
Dirección del viento	23 °
Velocidad media del viento	2.2 m/s
Temperatura máxima	33.5 °C
Hora temperatura máxima	14:44 horas
Racha de viento máxima	8.9 m/s
Hora de racha máxima de viento	16:20 horas
Humedad relativa media	47 %
Humedad relativa máxima	85 %
Hora humedad relativa máxima	23:59 horas
Humedad relativa mínima	30 %
Humedad relativa mínima	17:20 horas

El AirBeam3 contiene un sensor de PM que es calibrado originalmente por el fabricante. Dichas calibraciones se basan en un aerosol estándar del desierto de Arizona (EEUU) ([ISO, 2016](#)), cuyas propiedades físicas y condiciones climáticas son diferentes a las de la ciudad de Sevilla. Por tanto, es necesario validar los datos obtenidos con el sensor mediante la aplicación de un factor de intercomparación.

Así pues, se toman como referencia el factor de intercomparación propuesto por [Zafra-Pérez et al. \(2024\)](#) obtenido a partir de la ratio entre el LCS AirBeam2 y la gravimetría analizada en los filtros de la estación de calidad del aire de Campus El Carmen (Huelva, 37°16'17,4"N, 5°55'29,1"W) con las medias en 24 horas durante 64 días de muestreo. El Airbeam2 tiene el mismo sensor de PM que el AirBeam3 (*Plantower PMS7003 0.3 a 10 µm*), por lo que los factores de intercomparación son válidos para

este estudio. De esta manera, se utiliza un factor de intercomparación de 2.75 para PM10 y de 2.43 para PM2.5.

### 3.8 Análisis espacial de resultados

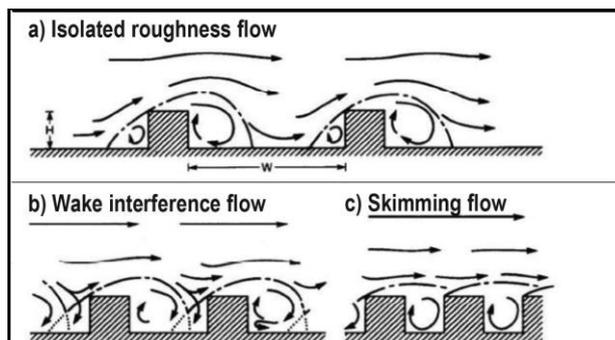
Los puntos muestreados por el LCS son proyectados en el SIG de código libre QGIS v3.38 Grenoble. Con la «calculadora de campos» del SIG se multiplican los valores de PM10 y PM2.5 por el factor de intercomparación correspondiente y se representan los puntos muestreados en cartografía con una simbología clasificada en base a los VLA de la actual y futura Directiva Europea de calidad del aire, siguiendo las indicaciones para las mediciones en las ZBE establecidas en el [RD 1052/2022](#) (Tabla 9).

**Tabla 9.** Simbología propuesta para la representación de los valores de PM registrados por el LCS basada en los VLA de la actual y futura Directiva Europea de calidad del aire.

Simbología	Valores límite		Descripción
	PM10	PM2.5	
	0 - 20 µg/m <sup>3</sup>	0 - 10 µg/m <sup>3</sup>	No contribuye a superar el valor límite anual de la futura Directiva Europea de calidad del aire
	20 - 40 µg/m <sup>3</sup>	10 - 25 µg/m <sup>3</sup>	Contribuye a superar el valor límite anual de la futura Directiva Europea de calidad del aire, pero no contribuye a superar el de la actual
	> 40 µg/m <sup>3</sup>	> 25 µg/m <sup>3</sup>	Contribuye a superar el valor límite anual de la actual Directiva Europea de calidad del aire

Para una mejor comprensión de los valores muestreados con el LCS, el CGM de Sevilla ofrece las coordenadas de los cruces semafórico, que son proyectadas en el SIG a fin de analizar cómo se relacionan los valores de PM (con la clasificación mostrada en la [Tabla 9](#)) con los arranques y aceleraciones de los vehículos tras haberse detenido en los cruces.

Para analizar el comportamiento del material particulado en función de la morfología urbana, se incluye en el análisis geográfico las imágenes LiDar del área de Sevilla para el año 2021, ofrecidas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2024). Son imágenes *raster* con una precisión de 25 cm/píxel que, tras su tratamiento en el SIG, permite visualizar y clasificar las alturas de los edificios. Esto permite inferir el tipo de flujo de aire que se genera en el interior de las calles y el efecto que puede producir en relación a la concentración o dispersión de partículas. Para determinar el flujo de aire que se produce entre edificios frontales, se aplica la ratio que relaciona la altura de los edificios con la anchura de la calle (H/W, [Oke, 1987](#)) ([Figura 13](#)).



**Figura 13.** Patrones de flujo de aire que se pueden generar según la ratio H/W. Fuente: [Lipp, 2014](#).

Por medio del SIG, se establece una simbología que permite clasificar la altura de los edificios en base a la anchura media de las calles de las zonas analizadas y calculadas mediante el SIG. Esto permite deducir el tipo de flujo de aire que se genera en el interior de cada calle en función de la ratio H/W ([Oke, 1987](#)) ([Tabla 10](#))

**Tabla 10.** Simbología propuesta para la clasificación de las alturas de los edificios en función de la ratio H/W. Según clasificación de [Oke \(1987\)](#).

Simbología	Ratio H/W	Descripción	Tipo de flujo de aire
	$< 0.3$	Edificios frontales ampliamente separados	Los flujos asociados a los edificios separados por la calle no interactúan entre sí
	$0.3 - 0.7$	Calle no tan ancha	La estela originada por el edificio ubicado a sotavento es perturbada por el edificio ubicado a barlovento
	$> 0.7$	Calle estrecha en relación a la altura de los edificios	Se origina un vórtice estable en el interior del cañón urbano que interactúa muy levemente con el flujo de aire exterior

Por último, mediante el SIG, se cartografían y se calculan las áreas de las ZTR y la ZBE de Sevilla. Dentro de la ZBE también se cartografían y se calculan las áreas del CAAC e Isla Mágica, ya que son los espacios de mayor área que pueden comprometer la efectividad de la ZBE.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Evolución histórica de niveles de PM10 y gases contaminantes en la estación de Príncipes

En la [Tabla 11](#) se muestran los niveles promedios de PM10, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y los días con superación del VLD debido a causas antrópicas en la estación de Príncipes entre los años 2012 a junio de 2024.

**Tabla 11.** Variación histórica de PM10 y gases contaminantes y promedio de superaciones de VLD de PM10 por causas antrópicas.

µg/m <sup>3</sup>	PM10	CO	>VLD ANT	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Año 2012	34	422	10	34	6
Año 2013	29	391	10	28	6
Año 2014	29	340	3	24	8
Año 2015	34	468	12	28	9
Año 2016	30	423	4	25	6
Año 2017	33	420	20	28	6
Año 2018	26	430	4	24	5
Año 2019	28	421	1	21	5
Año 2020	25	501	0	18	4
Año 2021	27	554	0	17	5
Año 2022	31	544	0	20	4
Año 2023	26	540	0	19	6
Año 2024	26	526	1	16	6

Con respecto al PM10, todos los años se cumplen con el VLA de la actual Directiva. Sin embargo, ningún año cumpliría con el VLA de la futura Directiva. Los máximos del periodo se dan en los años 2012 y 2015, ambos con un promedio de 34 µg/m<sup>3</sup> en ambos años. El mínimo del periodo se registra en 2020 (25 µg/m<sup>3</sup>), año de la pandemia ocasionada por el SARS-CoV-2. El segundo mínimo de PM10 se da en los años 2018, 2023 y 2024, con un promedio de 26 µg/m<sup>3</sup>. En la evolución de la serie histórica hasta 2024 se observa una tendencia a la reducción de la concentración media de PM10. Sin embargo, esta puede implicar el no cumplimiento con los VLA de la futura Directiva para 2030.

Por su parte, el CO muestra su promedio máximo anual en el año 2021 (554 µg/m<sup>3</sup>) y su mínimo en el año 2014 con un promedio de 340 µg/m<sup>3</sup>. Así, se muestra una tendencia al incremento de la concentración del CO hasta el 2024.

El NO<sub>2</sub> cumpliría con el VLA de la actual Directiva durante todo el periodo. Con respecto al VLA del NO<sub>2</sub> de la futura Directiva, se empiezan a cumplir a partir de 2020. Así, el promedio máximo de la serie se da en el año 2012 con 34 µg/m<sup>3</sup> y el mínimo se da en 2024, con un promedio de 16 µg/m<sup>3</sup>. Por tanto, el NO<sub>2</sub> experimenta una tendencia a la reducción a lo largo de la serie histórica, cumpliendo con el VLA de la futura Directiva ya en 2024 con lo que, siguiendo esta tendencia, es probable que se cumplan con los VLA en 2030.

Las superaciones del VLD de PM10 con origen antropogénico son más numerosas entre los años 2012 y 2018, experimentando su máximo en el año 2017, con un total de 20 días de superaciones del VLD. Es a partir de 2019 cuando se supera el VLD en un día como máximo, sin mostrar ninguna superación durante cuatro años seguidos (2020-2023). Por tanto, los días al año en que se supera el VLD de PM10 por causas antropogénicas experimentan una tendencia a la reducción a lo largo de la serie histórica de Príncipes.

Por su parte, el SO<sub>2</sub> no experimenta superaciones de los valores límite con respecto a la actual Directiva Europea de calidad del aire. Su máximo se registra en 2015 (9 µg/m<sup>3</sup>) y su mínimo en los años 2020 y 2022, con 4 µg/m<sup>3</sup>. Sus niveles muestran una relativa estabilidad a lo largo de la serie.

El promedio anual de la serie histórica es de 29 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>, una concentración superior en 2.3 µg/m<sup>3</sup> al promedio de la serie 2021-2023 en la estación de Príncipes (Tabla 12). Esto que indica que, en los últimos años se ha reducido la concentración de PM<sub>10</sub> en esta zona. Se trata de un promedio inferior al VLA de la actual Directiva Europea de calidad del aire. Sin embargo, en todos los meses de la serie histórica de PM<sub>10</sub> se contribuiría a superar el VLA de la futura Directiva, por lo que sería necesario reducir la media de la concentración en PM<sub>10</sub> en más de un 45 % para alcanzar el VLA de la futura Directiva.

La media de las superaciones anuales del VLD de PM<sub>10</sub> con respecto a la actual Directiva debido a fuentes antropogénicas es de siete días y experimenta su máximo en octubre con una media de dos superaciones al mes. Los meses en que no se dan superaciones del VLD por causas antropogénicas van de febrero a julio.

En cuanto al NO<sub>2</sub>, ningún mes, ni tampoco el promedio mensual, incumpliría con el VLA de la actual Directiva. Sin embargo, solo los meses de abril a agosto no contribuirían a superar los VLA de la futura Directiva. Para alcanzar el VLA del NO<sub>2</sub> con respecto a la futura Directiva, sería necesario reducir el promedio anual en más de un 15 %.

Por su parte, el CO y el SO<sub>2</sub> no presentan superaciones con respecto a sus valores límite.

**Tabla 12.** Variación promedio mensual de la serie histórica de PM<sub>10</sub> y gases contaminantes y promedio de superaciones de VLD de PM<sub>10</sub> por causas antrópicas.

µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>10</sub>	CO	>VLD ANT	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
enero	26	515	1	30	6
febrero	29	491	0	27	6
marzo	27	498	0	22	6
abril	23	445	0	20	6
mayo	26	406	0	19	6
junio	29	433	0	16	6
julio	34	482	0	15	6
agosto	36	412	1	17	6
septiembre	32	435	1	24	6
octubre	34	421	2	28	6
noviembre	26	440	1	29	6
diciembre	27	544	1	31	5
Promedio	29	460	7	23	6

La variación anual del NO<sub>2</sub> muestra un descenso de sus niveles en los meses más cálidos (Figura 14). El CO muestra un comportamiento similar, en forma de vaguada, solo que aparece un repunte en el mes de julio. Ambos gases muestran su máximo en diciembre. Esto puede ser debido tanto por el descenso de la intensidad del tráfico

en los meses de verano en comparación con el invierno como por la estabilidad de estos gases en invierno en comparación al verano.

Sin embargo, este patrón no es igual para PM10. Este experimenta su mínimo en abril y su máximo en agosto, probablemente influenciado por los vientos procedentes del norte de África, que son más frecuentes entre los meses de marzo y septiembre (Fernández-Camacho et al., 2016) y pueden traer consigo polvo en suspensión. Durante los eventos de polvo africano, la PBL desciende, por lo que incrementa la concentración de los contaminantes antropogénicos (Pandolfi et al., 2014).

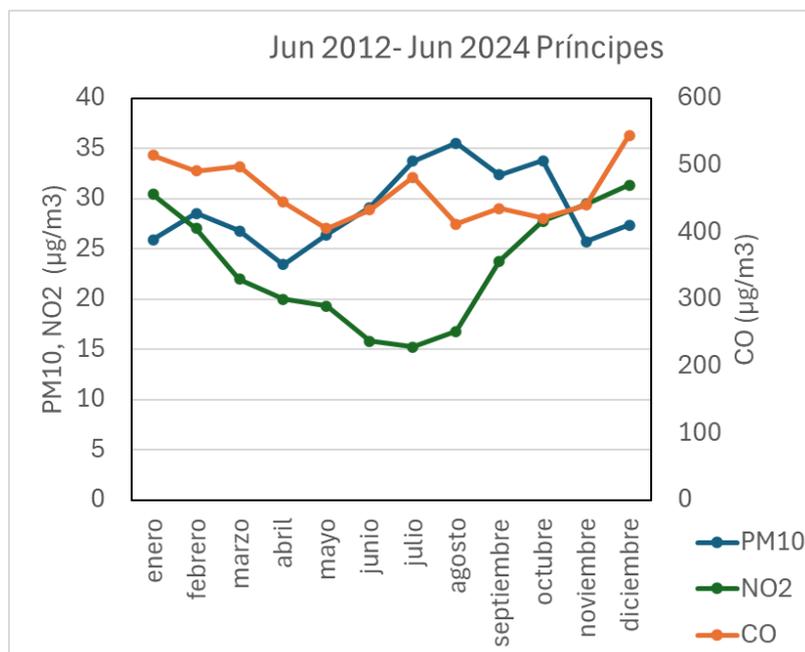


Figura 14. Variación mensual de contaminantes relacionados con el tráfico en la estación de Príncipes.

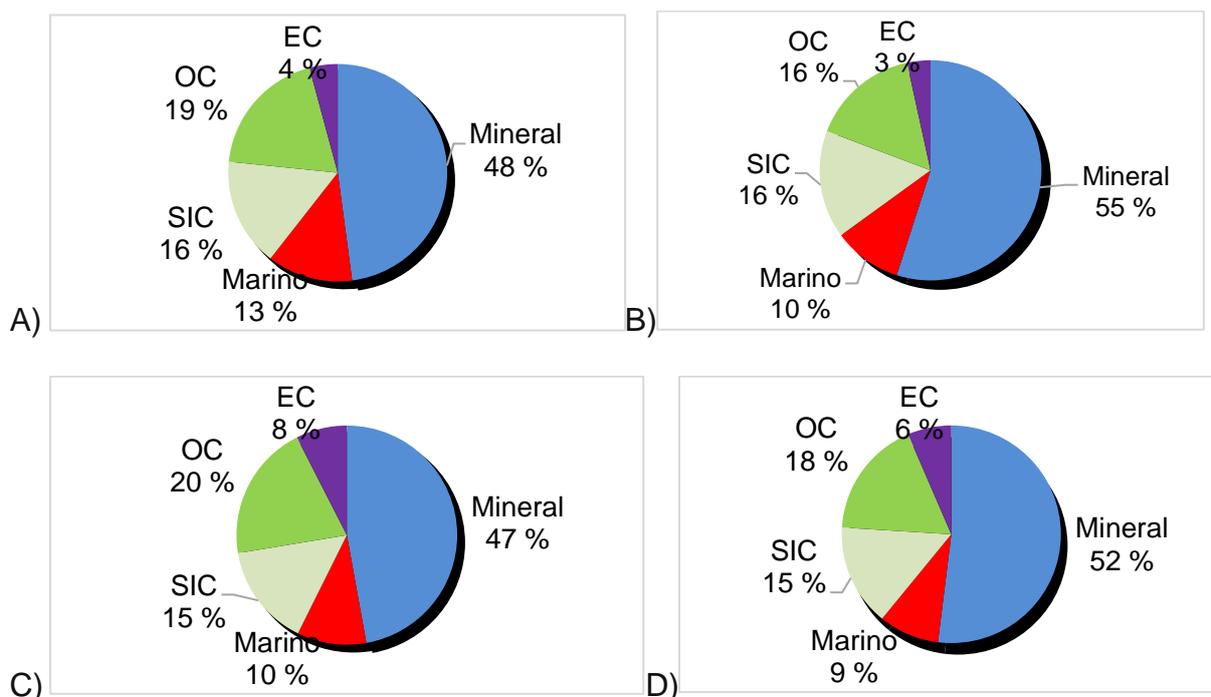
#### 4.2 Niveles de PM y composición química

Durante el periodo 2021-2023, las dos estaciones muestran porcentajes de componentes principales en química similares (Figura 15). Así, el componente principal en Príncipes es la materia mineral, representando el 55 %, seguido de los compuestos secundarios inorgánicos (SIC, 16 %), el carbono orgánico (OC, 16 %), el marino (10 %), y el carbono elemental (EC, 3 %). En Torneo, el componente principal sigue siendo la materia mineral, que representa el 52 %, seguido del OC (18 %), los SIC (15 %), el aerosol marino (9 %) y el EC (6 %).

Las diferencias más significativas entre Príncipes y Torneo se presentan en el componente mineral, que es mayor en Príncipes, probablemente derivado de la presencia de superficies como el Real de la Feria de Sevilla y del parque canino donde se inserta la estación de tráfico; y en el OC y EC, que muestran mayores porcentajes en Torneo, posiblemente derivado de la mayor intensidad del tráfico en las inmediaciones de esta estación.

Si se atiende a los componentes principales en química en 2023, se observan cambios en los porcentajes de ambas estaciones. De esta manera, en la estación de Príncipes, el componente principal es la materia mineral y representa el 48 %, seguido del carbono orgánico (OC, 19 %), los SIC (16 %), el marino (13 %), y el EC (4 %). En Torneo, el componente principal sigue siendo la materia mineral, que representa el 47 %, seguido del OC (20 %), los SIC (15 %), el aerosol marino (10 %) y el EC (8 %).

En ambas estaciones, los SIC no varían su representación en 2023 con respecto a la serie 2021-2023, a la vez que los porcentajes del componente marino, OC y EC son superiores en detrimento del componente mineral.



**Figura 15.** Porcentajes de componentes principales en química. A) y C): año 2023 en las estaciones de Príncipes y Torneo, respectivamente. B) y D): periodo 2021-2023 en las estaciones de Príncipes y Torneo, respectivamente.

En la [Tabla 13](#) se incluyen las concentraciones medias, máximas y mínimas obtenidas del de los filtros de PM<sub>10</sub>. La concentración media diaria de PM<sub>10</sub> es de 27.1 µg/m<sup>3</sup> en Príncipes y de 29.9 µg/m<sup>3</sup> en Torneo durante el periodo de estudio (años de 2021 a 2023) de un total de 179 y 154 filtros analizados en Príncipes y Torneo, respectivamente.

Tabla 13. Composición química promedio de filtros PM10.

PRINCIPES PM10 01-01-2021 al 31-12-2023			
µg/m3	Promedio	Máximo	Mínimo
Número de filtros	179		
PM10	27,1	74,8	7,5
TC	4,4	11,6	1,0
OC	3,6	9,3	0,7
EC	0,8	2,7	0,1
CO <sub>3</sub>	3,4	10,4	0,3
SiO <sub>2</sub>	4,6	28,0	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	9,3	<0,1
Ca	1,8	5,3	0,1
K	0,4	1,5	<0,1
Na	1,0	4,5	0,1
Mg	0,3	1,1	<0,1
Fe	0,7	3,2	0,1
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,1	0,3	<0,1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,7	8,0	0,4
F-	<0,1	0,2	<0,1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Antropogénico	1,5	7,9	0,2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Marino	0,2	1,1	<0,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,9	11,8	0,1
Cl	0,7	10,0	0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,2	3,4	<0,1
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> *10	1,0	3,1	<0,1
%			
Mineral	55		
Marino	10		
SIC	16		
OC	16		
EC	3		
ng/m3			
Li	0,6	3,1	<0,1
Be	0,1	0,2	<0,1
Sc	0,2	1,0	<0,1
Ti	92,1	1800,7	<0,1
V	2,6	14,3	0,2
Cr	3,4	12,4	0,1
Mn	12,0	54,2	<0,1
Co	0,3	1,4	<0,1
Ni (20 ng/m3)	2,7	22,7	0,1
Cu	14,2	58,9	0,9
Zn	36,5	138,6	0,1
Ga	0,3	2,1	<0,1
Ge	0,2	1,5	0,1
As (6 ng/m3)	0,7	3,4	0,1
Se	0,1	0,6	<0,1
Rb	1,3	5,4	0,1
Sr	5,1	22,9	0,6
Y	0,5	2,0	<0,1
Zr	1,6	9,0	0,1
Nb	0,2	1,4	<0,1
Mo	2,6	22,8	0,1
Cd (5 ng/m3)	0,1	1,0	<0,1
Sn	2,4	9,0	0,4
Sb	1,4	7,9	0,1
Cs	0,1	0,3	<0,1
Ba	15,4	88,6	0,1
La	0,6	3,7	<0,1
Ce	1,1	6,9	<0,1
Pr	0,1	0,8	<0,1
Nd	0,4	2,9	<0,1
Sm	0,1	0,5	<0,1
Eu	<0,1	0,1	<0,1
Gd	0,1	0,5	<0,1
Tb	<0,1	0,1	<0,1
Dy	0,1	0,4	<0,1
Ho	<0,1	0,1	<0,1
Er	0,1	0,2	<0,1
Tm	<0,1	0,1	<0,1
Yb	0,1	0,2	<0,1
Lu	<0,1	0,1	<0,1
Hf	0,1	0,4	<0,1
Ta	<0,1	0,1	<0,1
W	0,3	3,4	0,1
Tl	<0,1	0,2	<0,1
Pb (500 ng/m3)	6,7	223,2	0,1
Bi	0,5	41,9	<0,1
Th	0,1	0,8	<0,1
U	0,1	0,6	<0,1

TORNEO PM 10 01-04-2021 AL 21-12-2023			
µg/m3	Media	Máximo	Mínimo
Número de filtros	154		
PM10	29,9	380,5	11,6
TC	5,5	53,5	1,7
OC	4,1	39,6	0,1
EC	1,5	13,9	0,2
CO <sub>3</sub>	3,1	9,1	0,7
SiO <sub>2</sub>	4,4	26,7	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	8,9	0,1
Ca	1,5	4,9	0,3
K	0,3	1,2	0,0
Na	0,9	3,0	0,1
Mg	0,3	0,9	0,1
Fe	1,0	4,3	0,2
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,1	0,3	0,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,7	6,9	0,1
F-	<0,1	0,1	<0,1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Antropogénico	1,4	6,8	0,1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Marino	0,2	0,8	<0,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,8	7,0	0,1
Cl	0,6	4,8	<0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,2	3,1	<0,1
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> *10	1,1	3,2	<0,1
%			
Mineral	52		
Marino	9		
SIC	15		
OC	18		
EC	6		
ng/m3			
Li	0,5	2,7	0,1
Be	0,1	0,2	<0,1
Sc	0,1	0,9	<0,1
Ti	61,6	969,1	0,1
V	2,7	16,0	0,4
Cr	6,4	45,3	0,1
Mn	14,1	50,8	3,6
Co	0,3	1,1	<0,1
Ni (20 ng/m3)	3,3	20,5	0,1
Cu	22,9	67,2	0,1
Zn	35,1	140,6	0,1
Ga	0,3	1,9	<0,1
Ge	0,2	1,6	0,1
As (6 ng/m3)	0,8	2,9	0,1
Se	0,1	0,6	<0,1
Rb	1,2	4,8	0,1
Sr	4,6	18,4	1,1
Y	0,4	2,2	<0,1
Zr	2,4	11,7	<0,1
Nb	0,2	1,2	<0,1
Mo	3,4	27,2	0,1
Cd (5 ng/m3)	0,2	1,8	<0,1
Sn	4,6	15,0	0,1
Sb	2,1	7,2	0,4
Cs	0,1	0,2	<0,1
Ba	26,0	313,3	0,1
La	0,6	3,4	0,1
Ce	1,1	6,5	0,1
Pr	0,1	0,7	<0,1
Nd	0,4	2,6	<0,1
Sm	0,1	0,5	<0,1
Eu	<0,1	0,1	<0,1
Gd	0,1	0,5	<0,1
Tb	<0,1	0,1	<0,1
Dy	0,1	0,5	<0,1
Ho	<0,1	0,1	<0,1
Er	0,1	0,2	<0,1
Tm	<0,1	0,1	<0,1
Yb	0,1	0,1	<0,1
Lu	<0,1	0,1	<0,1
Hf	0,1	0,4	<0,1
Ta	<0,1	0,1	<0,1
W	0,4	3,8	0,1
Tl	<0,1	0,1	<0,1
Pb (500 ng/m3)	8,5	269,1	0,1
Bi	0,6	35,9	0,1
Th	0,1	0,8	<0,1
U	0,1	0,8	<0,1

Así, la fracción mineral está formada por  $\text{CO}_3$  ( $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{SiO}_2$  ( $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Ca}$  ( $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{K}$  ( $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Fe}$  ( $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en Príncipes; y por  $\text{CO}_3$  ( $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{SiO}_2$  ( $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Ca}$  ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{K}$  ( $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Fe}$  ( $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en Torneo.

En Príncipes, los SIC están compuestos por  $\text{SO}_4^{2-}$  antropogénico ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), el  $\text{NO}_3^-$  ( $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el  $\text{NH}_4^+$  ( $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En Torneo, los SIC están compuestos por el  $\text{SO}_4^{2-}$  antropogénico ( $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), el  $\text{NO}_3^-$  ( $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el  $\text{NH}_4^+$  ( $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

En Príncipes, el carbono total (TC) presenta una concentración de  $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Está compuesto por el carbono orgánico ( $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el carbono elemental ( $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En Torneo, el TC presenta una concentración media de  $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Está compuesto por el carbono orgánico ( $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el carbono elemental ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Son concentraciones superiores a las registradas en la estación de Príncipes derivadas probablemente de un tráfico más intenso en la zona de Torneo.

Por su parte, en Príncipes, el componente marino presenta  $\text{Cl}$  ( $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Na}$  ( $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Mg}$  ( $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y sulfato marino ( $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La relación  $\text{Cl}/\text{Na}$  es de 0.7, siendo menor a la ratio existente en el agua de mar (1.81). En Torneo, presenta  $\text{Cl}$  ( $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Na}$  ( $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{Mg}$  ( $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y sulfato marino ( $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La relación  $\text{Cl}/\text{Na}$  es de 0.66, similar a la de Príncipes, siendo menor a la ratio existente en el agua de mar (1.81).

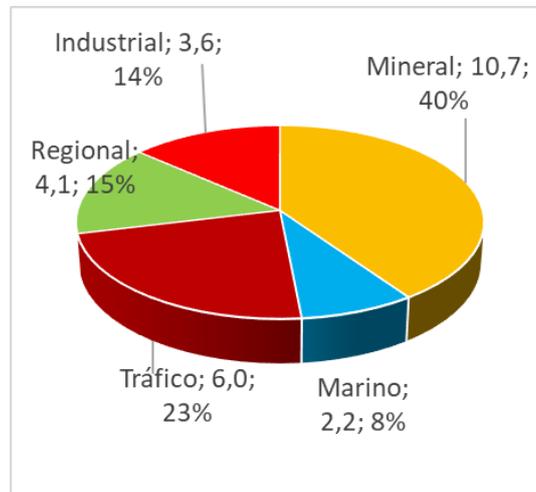
Con respecto a los elementos traza en Príncipes, las mayores concentraciones las presenta el titanio, con una concentración de  $91.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ , y el zinc, con una concentración de  $36.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ . Los elementos considerados en la Directiva [2004/107/CE](#) ( $\text{Ni}$ ,  $\text{As}$  y  $\text{Cd}$ ) presentan bajas concentraciones, inferiores a los límites objetivos establecidos ( $2.7 \text{ ngNi}/\text{m}^3$ ,  $0.7 \text{ ngAs}/\text{m}^3$ ,  $0.1 \text{ ngCd}/\text{m}^3$ ). El plomo, cuyos límites están establecidos en la Directiva [2008/50/CE](#), también presenta una concentración menor a dichos límites ( $6.7 \text{ ngPb}/\text{m}^3$ ).

En cuanto a los elementos traza en Torneo, las mayores concentraciones las presenta el titanio, con una concentración de  $61.6 \text{ ng}/\text{m}^3$ , seguido del zinc, con una concentración de  $35.1 \text{ ng}/\text{m}^3$ , el bario ( $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el cobre ( $22.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Los elementos considerados en la Directiva [2004/107/CE](#) presentan bajas concentraciones, inferiores a los límites objetivos establecidos ( $3.3 \text{ ngNi}/\text{m}^3$ ,  $0.8 \text{ ngAs}/\text{m}^3$ ,  $0.2 \text{ ngCd}/\text{m}^3$ ). El plomo ( $8.5 \text{ ngPb}/\text{m}^3$ ), también presenta una concentración menor los límites establecidos en la Directiva [2008/50/CE](#).

## 4.3 Contribución de fuentes

### 4.3.1 Estación de Príncipes

La principal fuente de contaminación atmosférica por PM10 es de origen mineral, con una concentración media de 10,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , representando el 40 % de la contribución (Figura 16).



**Figura 16.** Contribución de fuentes en PM10 en la estación de Príncipes.

Esta contribución podría estar influenciada por tres fuentes principales de origen natural o fugitivas:

- La primera fuente se podría atribuir a los eventos de intrusiones saharianas, ya que, en el periodo 2021-2023, se dan un total de 37 episodios de polvo sahariano que afectan al suroeste peninsular (MITECO, 2024) durante las fechas en que hay registros en la estación de Príncipes. Según Pandolfi *et al.* (2014) en Barcelona, Fernández Camacho *et al.* (2016) (Sevilla) y Millán Martínez *et al.* (2021) (Andalucía), durante estos episodios la PBL se reduce, favoreciendo la acumulación de contaminantes de origen antropogénicos. Durante los episodios saharianos aumenta la concentración de componentes naturales, pero también antropogénicos. Con el polvo sahariano, suele bajar la PBL.
- Una segunda fuente sería el Real de la Feria de Sevilla, un recinto formado por una superficie de albero de en torno a 27 ha que, sumado al aparcamiento de feriantes con una superficie de albero de en torno a 6 ha, hacen una superficie mineral de 33 ha situada entre los 400 m y 500 m de distancia a la estación de Príncipes, lo que le confiere cercanía para contribuir a la concentración de PM10.
- La última fuente podría radicar en la propia superficie sobre la que se sitúa la estación Príncipes dado que, además de ser un parque de extensión

considerable, la estación se encuentra dentro del parque canino, el cual contribuye al PM10 *in situ*, siendo registrado por la estación.

La segunda fuente de contribución en Príncipes es el tráfico, con una contribución media diaria de  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , representando el 23 % de la contaminación por partículas inferiores a 10 micras en esta zona. Esto viene derivado del tráfico diario, de más de 12 000 vehículos que circulan por la Glorieta República Dominicana. Se trata de una de las entradas y salidas de la ciudad de Sevilla hacia el oeste, además de ser una de las vías de conexión con el Puerto de Sevilla, lo que facilita la entrada de vehículos pesados como camiones. Además de ello, el aparcamiento de la estación de metro Blas Infante se sitúa a menos de 400 m de distancia de Príncipes, siendo un aparcamiento de alta capacidad que puede influir en la contribución del tráfico.

La tercera fuente de contribución sería la fuente regional, que se refiere a aquellas fuentes de contribución de largo recorrido, como la de las industrias petroquímicas o las emisiones del transporte marítimo (Millán-Martínez *et al.*, 2021). Esta supone el 15 % de la contribución a PM10 en la estación de Príncipes, con una media de concentración diaria de  $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

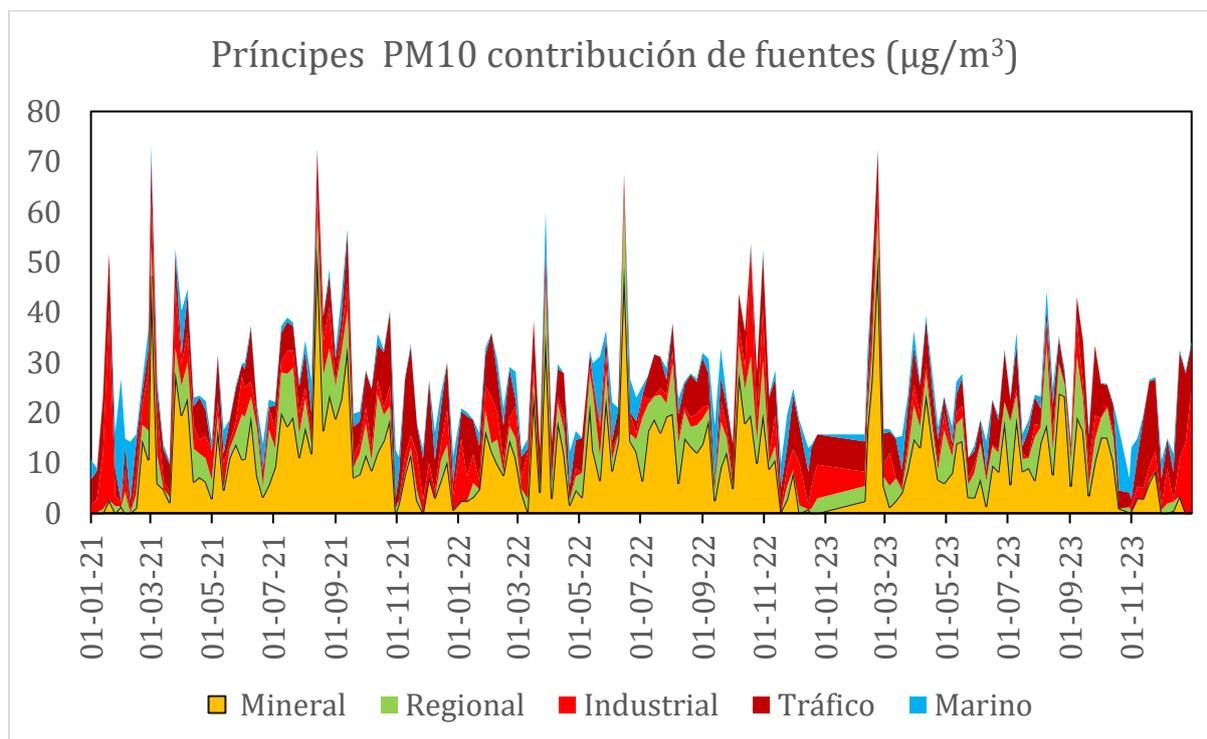
Tras ella se encuentra la fuente industrial, que representa el 14 % de la concentración de PM10 en Príncipes, suponiendo una media diaria de  $3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esta podría proceder tanto de la actividad portuaria, que se sitúa en torno a los 1,6 km y 5 km de distancia de la estación de Príncipes, como de la actividad industrial de Persán S.A., situada a unos 7 km al este.

Por último, se encuentra el factor aerosol marino que puede proceder del efecto corredor que ejerce el Valle del Guadalquivir sobre las brisas marinas, facilitando su transporte hacia la ciudad de Sevilla. La concentración media de esta fuente es de  $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , representando el 8 % de la contribución en Príncipes.

Queda mencionar que el PM10 supera la concentración media diaria de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en diez días durante la serie 2021-2023 analizada, por lo que no incumpliría la actual Directiva [2008/50/CE](#), que establece la superación en 35 días al año. Sin embargo, atendiendo a los valores límite de la futura Directiva, la concentración media diaria no debe superar los  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en más de 18 días al año, por lo que Príncipes cumpliría con estos valores al superar el límite en 12 días durante toda la serie.

Con respecto a la variación temporal de la contribución de fuentes (Figura 17), se observa que la contribución del mineral muestra un patrón estacional, en el que entre los meses de abril y noviembre esta muestra sus mayores concentraciones. Es en estas fechas cuando las fuentes antropogénicas (tráfico, industrial y regional) muestran concentraciones superiores a la contribución mineral, probablemente derivado del descenso de la PBL cuando entra polvo sahariano, que incrementa la concentración de fuentes naturales y antrópicas. En los meses entre noviembre y

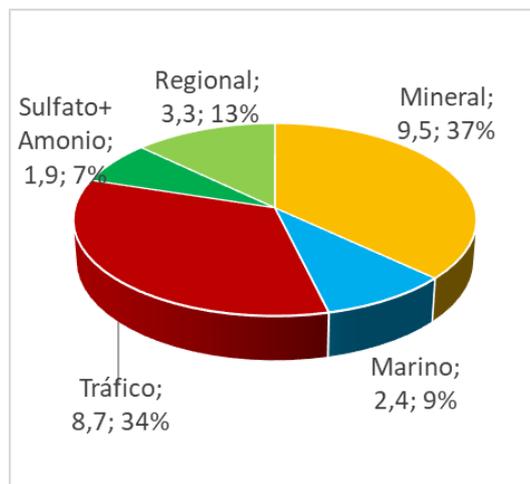
febrero, la contribución industrial y del tráfico son las que predominan sobre el resto de las fuentes. Así, la contribución del tráfico se muestra superior a la industrial en la mayoría de la serie. No obstante, las fuentes antropogénicas muestran una leve tendencia a su reducción a lo largo de la serie. Por su parte, la contribución marina es la que menos predomina a lo largo del periodo 2021-2023.



**Figura 17.** Variación temporal de la contribución de fuentes en PM10 en la estación de Príncipes durante el periodo 2021-2023.

#### 4.3.2 Estación de Torneo

La principal fuente en Torneo es la mineral, con una concentración media diaria de  $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 18), representando el 37 % del total de las emisiones de PM10 de la zona, que podría estar producido mayormente por episodios de polvo africano ya que, según los datos del MITECO (2024), se producen en 37 episodios sahariano que afectan al suroeste peninsular durante las fechas en que hay registros en Torneo entre los años 2021 y 2023.



**Figura 18.** Contribución de fuentes en PM10 en la estación de Torneo.

El porcentaje de la fuente mineral es menor a la registrada en Príncipes, probablemente derivada de la ausencia de espacios que puedan contribuir al factor mineral en sus inmediaciones. Sin embargo, durante el periodo analizado, ha podido contribuir a la fracción mineral las obras de reurbanización al norte del tramo de Torneo, con una duración de 18 meses a contar desde agosto de 2021 ([Ayuntamiento de Sevilla, 2024](#)).

Otra de las fuentes de origen mineral en esta zona podría ser el *road dust*, ya que la intensidad del tráfico en el tramo en que se encuentra la estación de Torneo es elevada, con más de 36 000 vehículos diarios, capaz de influir la concentración del mineral de PM10.

La segunda fuente de PM10 es el tráfico, debido la cantidad de vehículos diarios que circulan por las inmediaciones de Torneo. Así, la concentración media diaria es de  $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y representa el 34 % de la concentración de PM10 en esta estación. La contribución del tráfico presenta un porcentaje más elevado con respecto a Príncipes debido a que, en la zona de Torneo, circulan a diario alrededor de 24 000 vehículos más que por las inmediaciones de Príncipes.

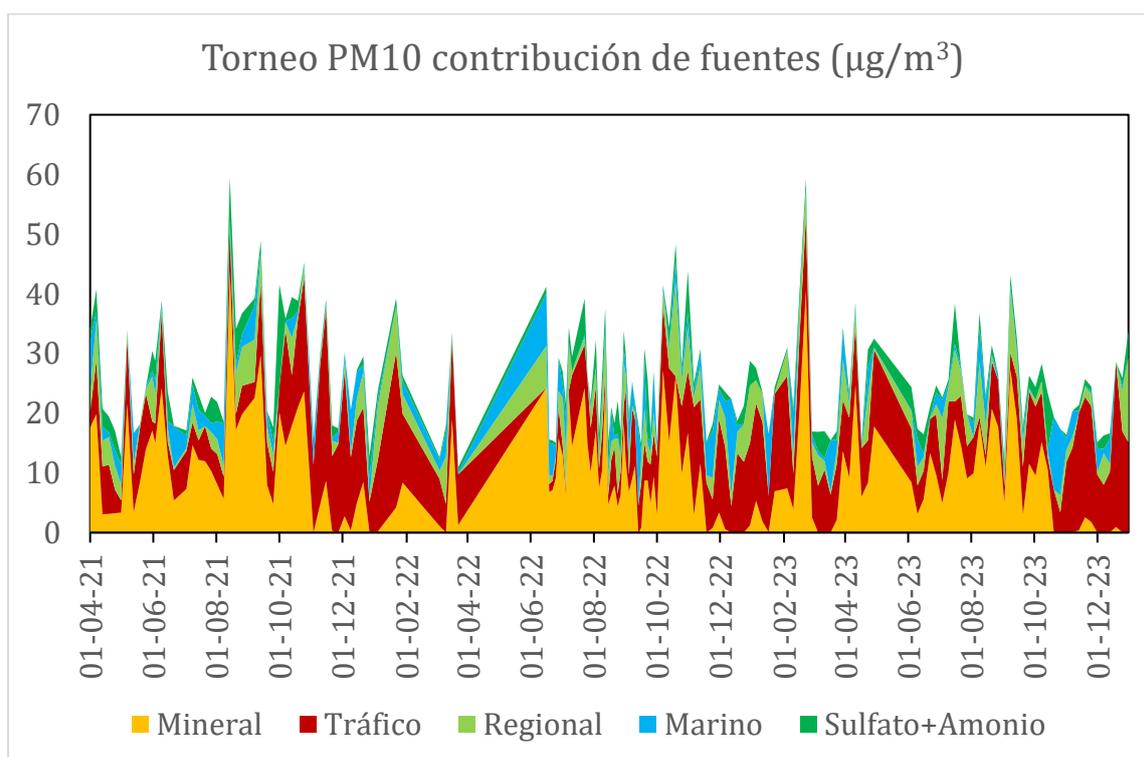
La siguiente fuente se trata del factor regional, de largo recorrido y vinculada principalmente a la industria petroquímica y al transporte marítimo ([Millán-Martínez et al., 2024](#)), con una concentración media de  $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , representando el 13 % del PM10 registrado en Torneo.

Debido a que la estación de Torneo se encuentra en las inmediaciones de la margen este del Río Guadalquivir, este hace de corredor para las brisas marinas. Por tanto, la contribución al PM10 de la fracción marina es también superior a la registrada en Príncipes, con una concentración de  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , representando el 9 % de la concentración.

En último lugar se encuentra el sulfato y el amonio con  $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que representa el 7 % de la muestra. Esta fuente podría proceder del  $\text{SO}_2$  industrial (regional) y de las emisiones de los barcos que llegan al puerto de Sevilla, ya que el  $\text{SO}_2$ , se convierte en  $\text{SO}_4^{2-}$  en la atmósfera, pudiendo ser captado en la estación de Torneo desde el corredor del Guadalquivir. Por su parte, el amonio estaría relacionado con las emisiones del elevado volumen de tráfico presente en calle Torneo.

Queda mencionar que el  $\text{PM}_{10}$  supera la concentración media diaria de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en dos días durante la serie 2021-2023 analizada, por lo que no incumpliría la actual Directiva [2008/50/CE](#), que establece la superación en 35 días al año. Sin embargo, atendiendo a los valores límite de la futura Directiva, la concentración media diaria no debe superar los  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en más de 18 días al año, por lo que Torneo cumpliría con estos valores al superar el límite en cinco días durante toda la serie.

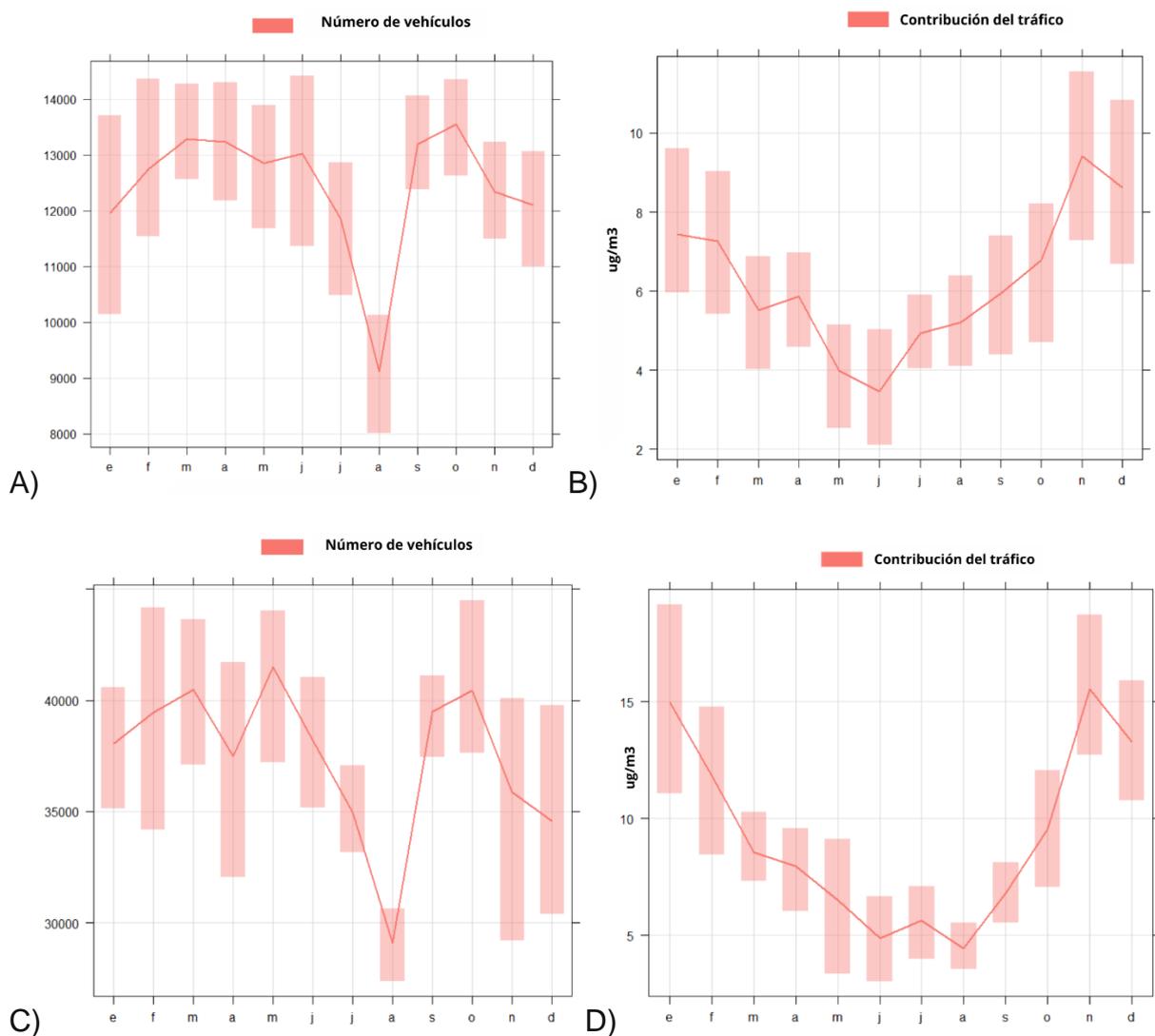
Con respecto a la variación temporal de la contribución de fuentes del periodo 2021-2023 ([Figura 19](#)), la contribución mineral se muestra estacional e incrementa sus concentraciones entre los meses de abril y noviembre. En este periodo, las fuentes antropogénicas también aumentan su concentración al igual que ocurre en Príncipes. Entre los meses de noviembre y marzo, las fuentes antropogénicas se muestran superior a la mineral. Aun así, las fuentes antropogénicas muestran una leve tendencia a la reducción de su concentración, al igual que en Príncipes. Por su parte, la contribución marina muestra mayor predominancia en Torneo con respecto a Príncipes.



**Figura 19.** Variación temporal de la contribución de fuentes en  $\text{PM}_{10}$  en la estación de Torneo durante el periodo 2021-2023.

#### 4.4 Relación de la contribución del tráfico con la intensidad del tráfico

La contribución del tráfico al PM10 en la estación de Príncipes refleja un comportamiento estacional en el que se observa una gráfica en forma de vaguada (ver Figura 20), llegando a su mínimo de contribución del tráfico en mayo-junio ( $< 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y a su máximo en noviembre ( $> 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mostrando una diferencia de en torno a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto no se correspondería con la intensidad del tráfico, que muestra su máximo en el mes de octubre con un promedio de más de 13 000 vehículos diarios. Por su parte, el mínimo de tráfico se da en agosto, con una intensidad media de en torno a 9000 vehículos diarios. Esto supone una diferencia de unos 4000 vehículos diarios entre los meses de mayor y de menor intensidad del tráfico en las inmediaciones de Príncipes.



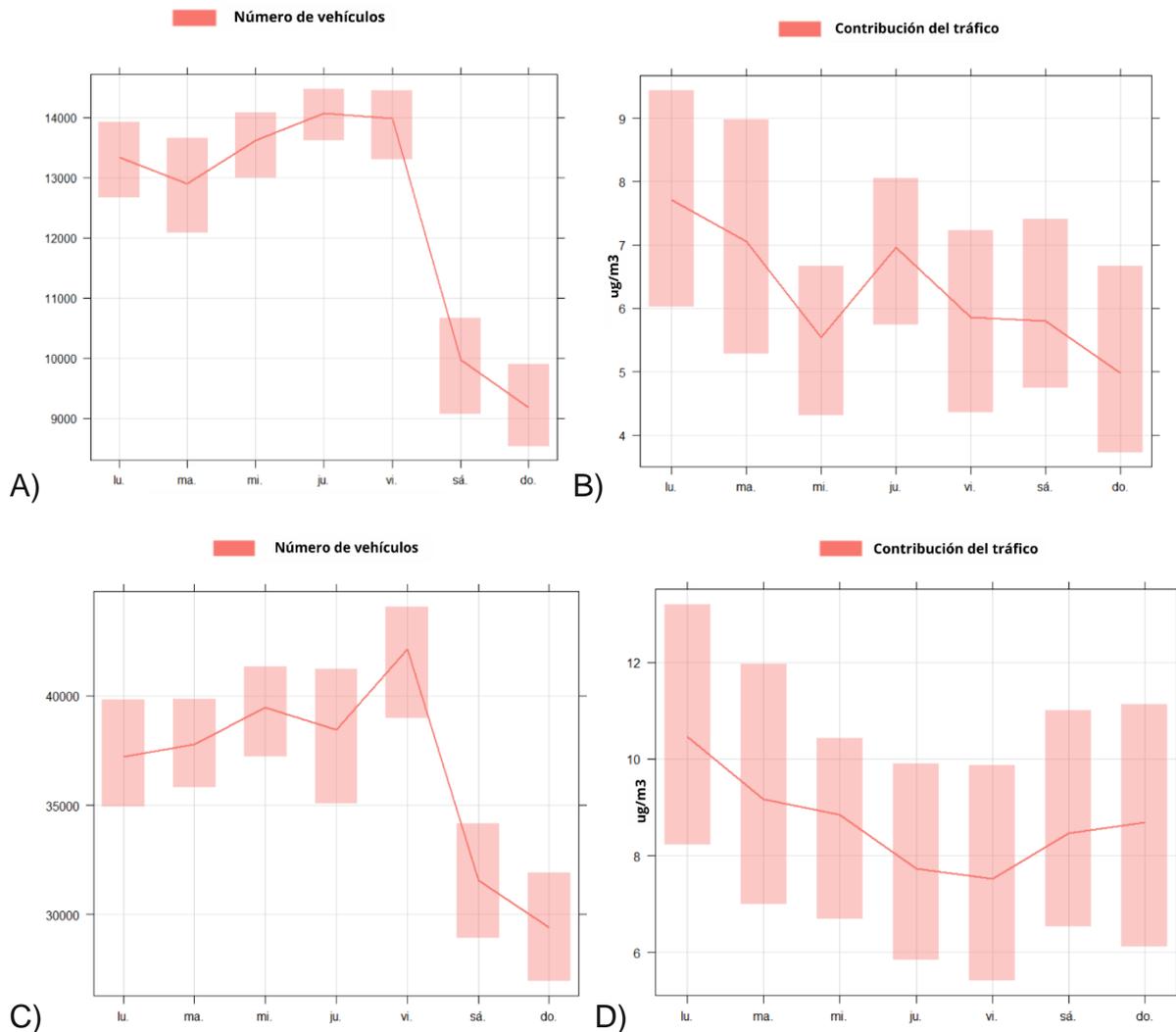
**Figura 20.** Variación anual. A y C: intensidad del tráfico en las inmediaciones de Príncipes y Torneo, respectivamente. B y D: contribución del tráfico registrado en la estación de Príncipes y Torneo, respectivamente.

En Torneo, el gráfico de variación anual de la intensidad del tráfico muestra una tendencia similar a la de Príncipes, a excepción del mes de abril, que refleja un descenso más acusado, motivado probablemente por el periodo vacacional de Semana Santa en 2022 y 2023, así como la feria de Sevilla de 2023 que tuvieron lugar en durante dicho mes. Así, existe una diferencia de en torno a 12 000 vehículos entre el mes de mayor intensidad del tráfico (mayo) y el de menor intensidad (agosto). En cuanto a la variación anual de la contribución del tráfico, Torneo muestra un patrón estacional, similar al de Príncipes. Así, la contribución del tráfico llega a su máximo en el mes de noviembre y su mínimo en agosto, mostrando una diferencia de en torno a los 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Atendiendo a la variación semanal en Príncipes ([Figura 21](#)), la contribución del tráfico presenta una tendencia descendente, al igual que el número de vehículos. El mínimo de contribución (en torno a 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y de vehículos (en torno a 9000) se registra el domingo. Por su parte, el máximo de contribución del tráfico se da el lunes (en torno a 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras que el máximo de vehículos se da entre el jueves-viernes, con alrededor de 14 000 vehículos diarios. Es decir, a lo largo de la semana, la contribución del tráfico muestra una variación de en torno a los 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y, la intensidad del tráfico, de en torno a 5000 vehículos.

La variación semanal en Torneo ([Figura 21](#)), muestra también un patrón similar al de Príncipes con respecto al número de vehículos. La diferencia del número de vehículos que circulan por esta zona entre el máximo (viernes) y el mínimo (domingo) es de unos 13 000 vehículos. Por su parte, la variación semanal de la contribución del tráfico en Torneo difiere de la de Príncipes, ya que muestra una tendencia descendente en forma de vaguada en la que el máximo se da el lunes y el mínimo en viernes, reflejando una diferencia de en torno a los 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Cabe destacar que ambas estaciones muestran unas tendencias similares de lunes a viernes, en la que la intensidad del tráfico tiende a incrementar mientras que la contribución del tráfico tiende a disminuir. Ello podría derivarse de las congestiones del tráfico ya que, a mayor número de vehículos en el mismo espacio/tiempo, menor probabilidad de producir aceleraciones bruscas y prolongadas en los cruces semafóricos que desemboquen en mayores emisiones de partículas gruesas. También, la meteorología, influenciada por la morfología urbana de la zona, podría explicar el patrón de la contribución del tráfico en los días laborables.



**Figura 21.** Variación semanal. A y C: intensidad del tráfico en las inmediaciones de Príncipes y Torneo, respectivamente. B y D: contribución del tráfico registrado en la estación de Príncipes y Torneo, respectivamente.

La zona de Príncipes presenta una contribución del tráfico media de  $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un promedio de 12 390 vehículos diarios. Por tanto, se ha realizado una proporción que equivaldría a suponer  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de contribución del tráfico por cada 1982 vehículos en las inmediaciones Príncipes. Así, para alcanzar el VLA de la futura Directiva Europea de calidad del aire en PM<sub>10</sub>, se debe reducir la contribución del tráfico en un 33 % ( $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En base a ello, se calcula una reducción necesaria de 4089 vehículos para cumplir con el VLA en la estación de Príncipes. Es decir, tendría que circular una media de 8301 vehículos diarios por las inmediaciones de Príncipes. Esto supondría una circulación diaria de vehículos inferior, incluso, a la del fin de semana, cuando circulan 9654 vehículos diarios de media.

Por su parte, Torneo presenta una contribución del tráfico media de  $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para 36 695 vehículos de promedio diario. Por tanto, se ha realizado una proporción que equivaldría a suponer  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de contribución del tráfico por cada 4217 vehículos en las inmediaciones de Torneo. Así, para alcanzar el VLA de PM<sub>10</sub> con respecto a la

futura Directiva, se debe reducir la contribución del tráfico en un 33 % ( $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), por lo que se calcula una reducción necesaria de 12 110 vehículos para cumplir con el VLA en esta zona de Sevilla. Es decir, de media, tendrían que circular a diario 24 585 vehículos. Esto supondría una circulación diaria de vehículos inferior, incluso, a la que se da en fin de semana, cuando circula una media de 30 864 vehículos por las inmediaciones de Torneo.

#### **4.5 Variación espacial de PM en alta resolución en zonas de Sevilla con restricciones de tráfico**

En este apartado se presentan los resultados del muestreo con el LCS a nivel de calle. Los puntos de muestreo de PM son representados en el SIG basándose en sus VLA de la actual y futura Directiva Europea de calidad del aire. De esta manera, se generan mapas en el que se observan los *hotspots* de PM en relación a la ratio H/W de sus calles, que interfieren en el patrón del flujo de aire, y a los cruces semafóricos.

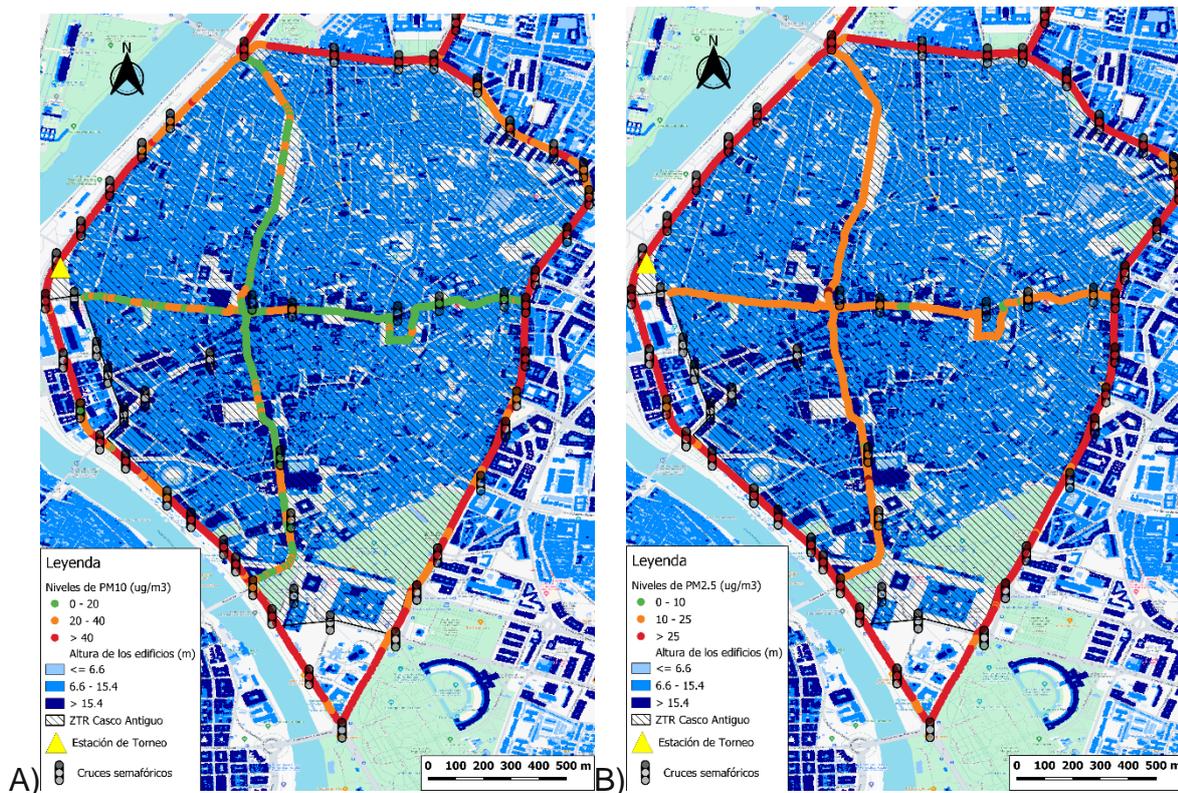
##### **4.5.1 ZTR de Casco Antiguo**

El perímetro y el interior de esta ZTR de Casco Antiguo se muestrea con el LCS a partir de las 8:00 horas del lunes 17 de junio de 2024, en hora punta laboral del tráfico, y termina a las 10:10 horas ([Figura 22](#)). En esta franja horaria se observan diferencias significativas.

El resultado muestreado en el interior de la ZTR de Casco Antiguo refleja, en la mayor parte del recorrido, unos niveles inferiores al VLA de PM10 con respecto a la futura Directiva Europea de calidad del aire. Sin embargo, presenta algunos subtramos con niveles superiores al VLA de PM10 con respecto a la futura Directiva. Aun así, los niveles de PM10 se muestran inferiores al VLA de la actual Directiva en la mayor parte del recorrido. Por su parte, los niveles de PM2.5 muestran, en la práctica totalidad del recorrido, unos niveles inferiores al VLA de la actual Directiva, pero superiores con respecto al VLA de la futura Directiva.

En el perímetro de la ZTR de Casco Antiguo se muestra, en la mayor parte del recorrido, unos niveles de PM10 superiores al VLA de la actual Directiva a la vez que muestra algunos subtramos con niveles inferiores a dicho VLA entre algunos cruces semafóricos. No obstante, la práctica totalidad del perímetro muestra niveles superiores al VLA establecido en la futura Directiva. Por su parte, los valores de PM2.5 superan, en la práctica totalidad del recorrido, el VLA de la actual Directiva.

Esta variabilidad espacial entre el interior y el perímetro de la ZTR de Casco Antiguo, con respecto a los niveles de PM muestreados, puede ser debido a las restricciones de tráfico en el interior de la ZTR, que deja el acceso muy limitado a los vehículos a motor. Tal es la relevancia de las restricciones del tráfico en esta zona que contrasta notablemente con los valores registrados en su perímetro.



**Figura 22.** Niveles de PM muestreados con el LCS y alturas de los edificios en la ZTR de Casco Antiguo. A): valores de PM10. B): valores de PM2.5.

#### 4.5.2 ZTR de Triana

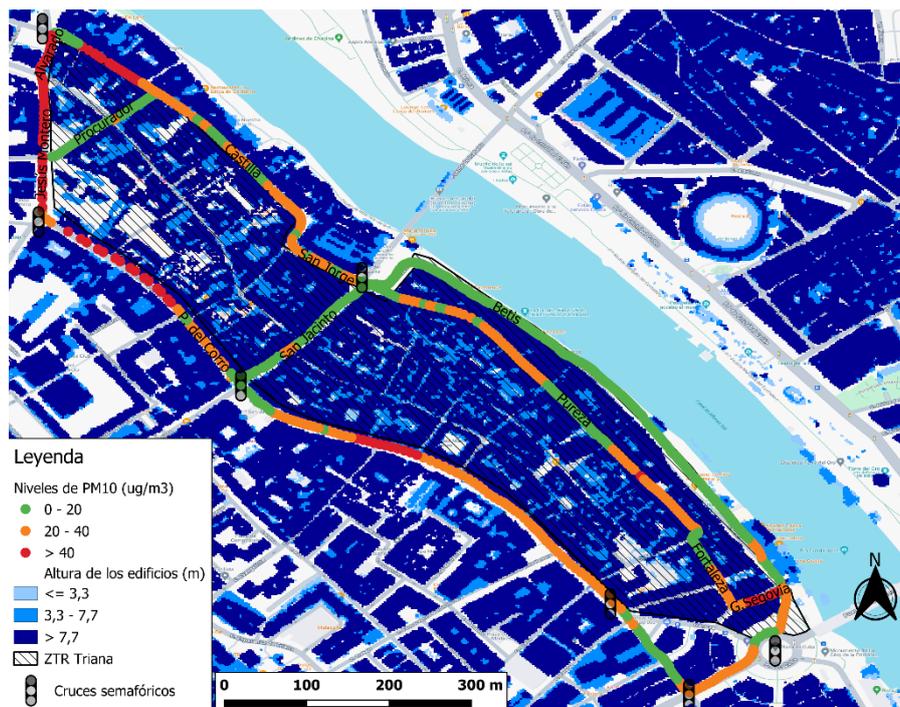
Triana, al tratarse de una de las zonas más antiguas de Sevilla, cuenta con calles estrechas. En este sentido, la media de anchura del recorrido realizado es de 11 metros, por lo que los edificios que midan más de 7.7 m de altura poseen una ratio  $H/W > 0.7$  en relación al flujo de aire, pudiendo generar vórtices estables internos. Como la ZTR de Triana se ubica en una zona de bloques de viviendas mayoritariamente, la práctica totalidad de sus calles presentan una ratio  $H/W > 0.7$ .

Así pues, el recorrido con el sensor se realiza el lunes 17 de julio de 2024 a partir de las 11:42 horas, y termina a las 13:32 horas, fuera de la hora punta para el tráfico laboral.

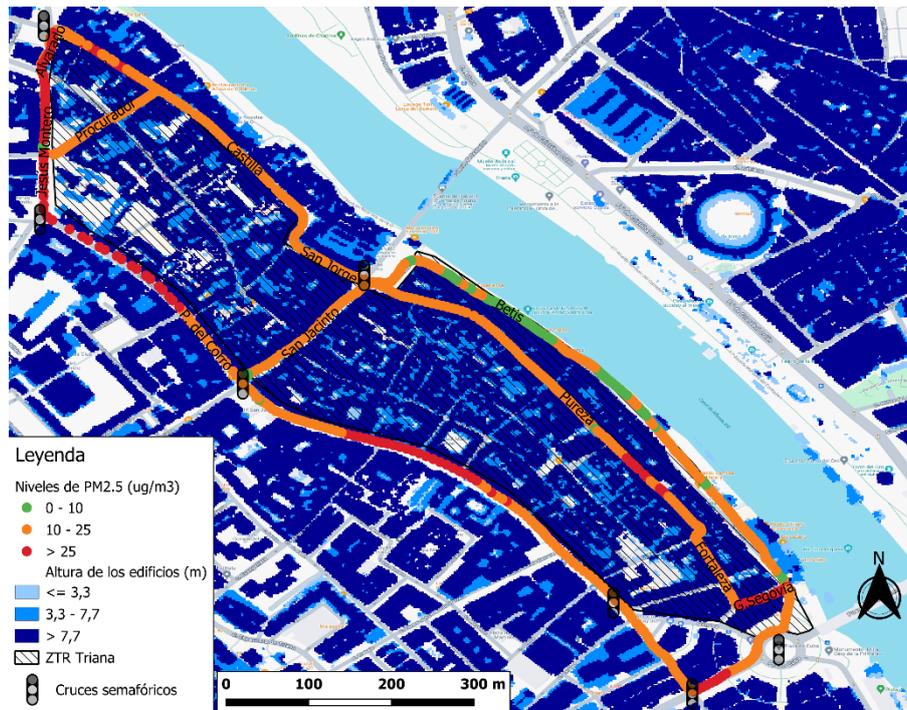
En este caso, los valores de PM10 (Figura 23) muestran superaciones del VLA de la actual Directiva, principalmente en las inmediaciones de los cruces semafóricos en los que intersecan la calle Pagés del Corro con calle Jesús Montero y calle Alvarado con calle Castilla. Prácticamente en el resto del recorrido se muestran niveles inferiores al VLA de la actual Directiva. Cabe destacar que las calles Procurador, San Jacinto y Betis, que se encuentran dentro de la ZTR de Triana, muestran niveles inferiores al VLA establecido en la futura Directiva.

Con respecto a los valores de PM<sub>2.5</sub> (Figura 24), estos se muestran superiores al VLA de la futura Directiva en la práctica totalidad del recorrido. Además, muestran superaciones del VLA de la actual Directiva en los mismos cruces semafóricos señalados anteriormente.

A pesar de realizarse el recorrido fuera de las horas punta laboral del tráfico, estas superaciones de VLA pueden estar producidas por la elevada ratio H/W, que puede generar vórtices estables dentro de las vías que dificulten la dispersión de partículas sumado a la presencia de cruces semafóricos que hacen que se generen mayores emisiones de partículas derivadas de las aceleraciones de los vehículos tras su detención.



**Figura 23.** Niveles de PM<sub>10</sub> muestreados con el LCS y altura de los edificios en la ZTR de Triana.



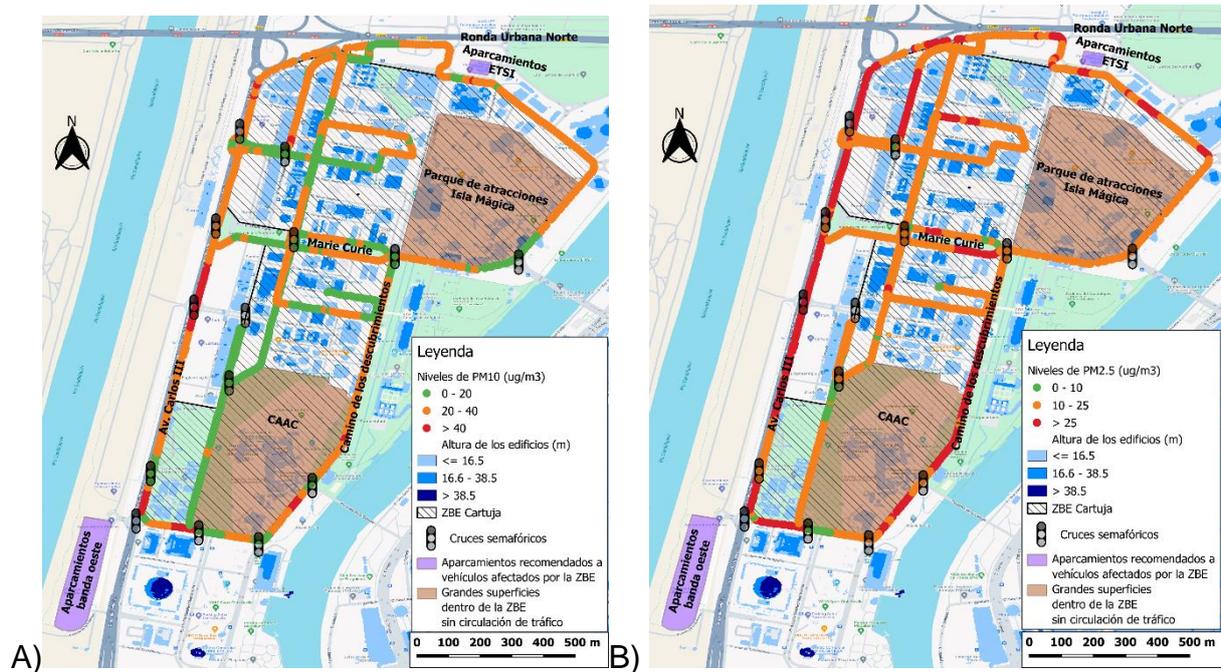
**Figura 24.** Niveles de PM2.5 muestreados con el LCS y alturas de los edificios en la ZTR de Triana.

#### 4.5.3 ZBE Cartuja

El muestreo con el LCS se realiza a partir de las 10:42 horas y termina a las 11:28 horas del lunes 17 de junio de 2024, ya pasada la hora punta laboral del tráfico (Figura 25). En esta fecha aún no está vigente la ZBE, por lo que lo que se ha muestreado con el LCS forma parte de las evidencias de los niveles de PM previos a su entrada en vigor.

Los valores de PM10 muestreados en el perímetro de la ZBE son inferiores al VLA de la actual Directiva en la práctica totalidad del recorrido y muestran superaciones del éste sólo en dos cruces semafóricos de la Avenida Carlos III. En el interior de la ZBE se dan niveles de PM10 tanto inferiores como superiores al VLA de la futura Directiva, pero no hay superaciones significativas del VLA de la actual Directiva.

En cuanto al PM2.5, cabe señalar que la mayor parte del perímetro de la ZBE de Cartuja muestra valores superiores al VLA de la actual Directiva. En el interior de la ZBE, los valores muestreados son, en la mayor parte del recorrido, inferiores al VLA de la actual Directiva, pero a la vez superiores con respecto al VLA de la futura Directiva. Cabe destacar que hay un tramo significativo de superación del VLA de la actual Directiva en las inmediaciones del único cruce semafórico en el interior de la ZBE de Cartuja.



**Figura 25.** Niveles de PM muestreados con el LCS y alturas de los edificios en la ZBE de Sevilla. A): valores de PM10. B): valores de PM2.5.

Es necesario señalar la peculiaridad del espacio donde se inserta la actual ZBE de Sevilla, en la Isla de la Cartuja. Se trata de un parque científico-tecnológico próximo al Río Guadalquivir. Está constituido por calles muy anchas y edificios construidos en diseminado dedicados al uso laboral o estudiantil. La media de amplitud de sus calles ronda los 55 m de ancho. Así, la separación entre edificios frontales no genera flujos de aire que interactúan entre sí, con lo que no dificulta la dispersión de partículas.

Lo más significativo de la zona donde se inserta la ZBE es que se encuentra en una zona destinada al sector servicios, en cuyo su interior no existen residentes ni zonas de especial sensibilidad destacables que puedan beneficiarse de una mejora de la calidad del aire. A ello se suma que, en el interior de la ZBE, se insertan espacios de grandes superficies cerrados al tráfico, como son el CAAC y el parque de atracciones Isla Mágica, que en total suman más de 42 hectáreas dentro de la ZBE en las que no se puede limitar la circulación del tráfico. Son superficies inefectivas para la mejora de la calidad del aire que ocupan más de un tercio de la superficie de la ZBE.

Por su parte, el Ayuntamiento de Sevilla, a través de su página web, insta a los usuarios de los vehículos afectados por la ZBE a que hagan uso de los aparcamientos gratuitos de la banda oeste, que consta de 2900 plazas, y de los situados al norte de la ZBE, que cuentan con 500 plazas, sumando un total 3400 plazas de aparcamiento en las inmediaciones de la ZBE (Ayuntamiento de Sevilla, 2024). La ZBE se encuentra a 20 m de distancia con respecto al aparcamiento norte y en torno a los 100 m de distancia del aparcamiento de la banda oeste. Esto contradice lo establecido en el RD 10527/2022, ya que hay que diseñar la delimitación de las ZBE tratando de evitar una

mayor concentración de los vehículos en las áreas adyacentes a esta, de manera que, en ningún caso, se deteriore la calidad del aire o acústica en su interior.

En este sentido, la ZBE de Sevilla cuenta en sus inmediaciones con la Avenida Carlos III, al oeste, con tres carriles para cada sentido dado que es una vía de circunvalación. Al norte de la ZBE se encuentra la Ronda Urbana Norte, que cuenta con tres carriles para cada sentido y que se sitúa a unos 60 m de la ZBE. El flujo del tráfico en estas vías tampoco evitaría que se deteriore la calidad del aire dentro del perímetro de la ZBE.

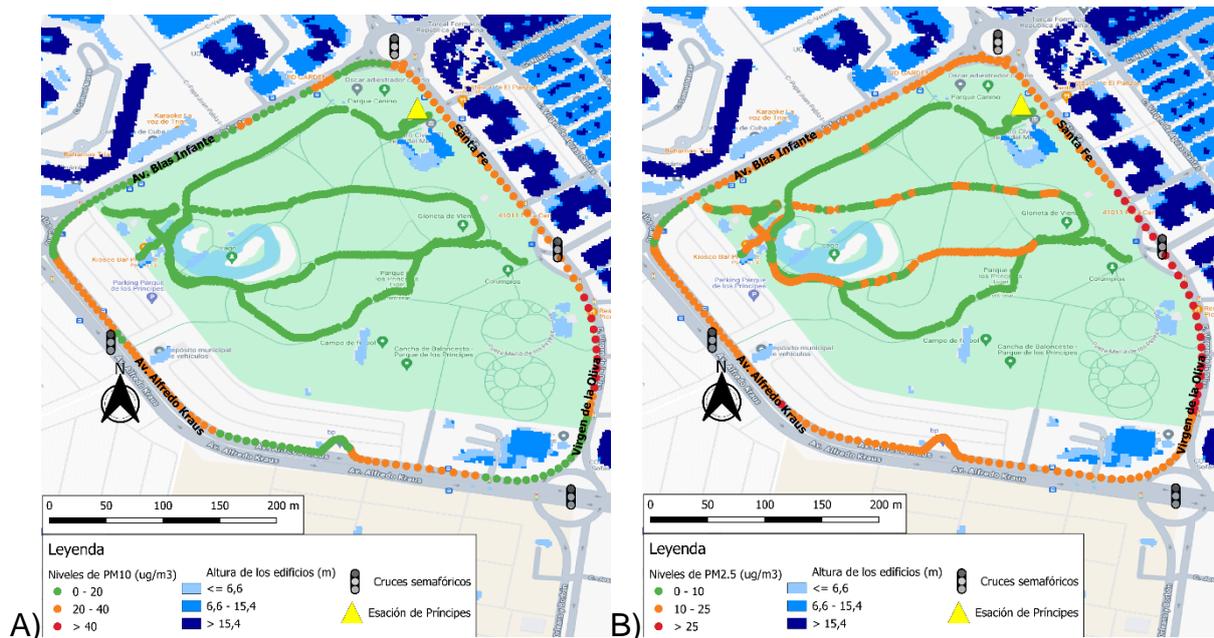
La Isla de la Cartuja recibe en torno a los 27 887 desplazamientos diarios, de los cuales 15 048 son por motivos laborables ([Ayuntamiento de Sevilla, 2022](#)). No obstante, los vehículos vinculados a la actividad económica de empresas ubicadas en el interior de las zonas de tráfico restringido, podrían acceder al interior de la ZBE ([BOP de Sevilla, 2022](#)). Es decir, potencialmente esta ZBE solo podría afectar al 46 % de los vehículos que recibe a diario. Sumado a ello, la media de antigüedad del parque automovilístico de la AUS supera los 13 años, lo que les permite portar el distintivo ambiental «B», con lo que la reducción de vehículos en el interior de la ZBE podría no ser efectiva para cumplir con los VLA de la futura Directiva Europea de calidad del aire.

Siguiendo la ratio entre la contribución del tráfico y el número de vehículos que se da en espacios abiertos como en Torneo, la contribución del tráfico diario en la ZBE de Cartuja rondaría los  $6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Una reducción del 33 % en la contribución del tráfico implica una reducción de alrededor de  $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , conllevando una reducción de en torno a los 9203 vehículos en el interior de la ZBE de Sevilla. No obstante, para obtener la reducción exacta, se debe muestrear la calidad del aire *in situ* para obtener la contribución del tráfico en esta ZBE.

#### **4.5.4 Zonas verdes**

El recorrido con el LCS en la zona de Parque de los Príncipes comienza en su perímetro a las 11:50 horas y acaba en su interior a las 14:30 horas ([Figura 26](#)).

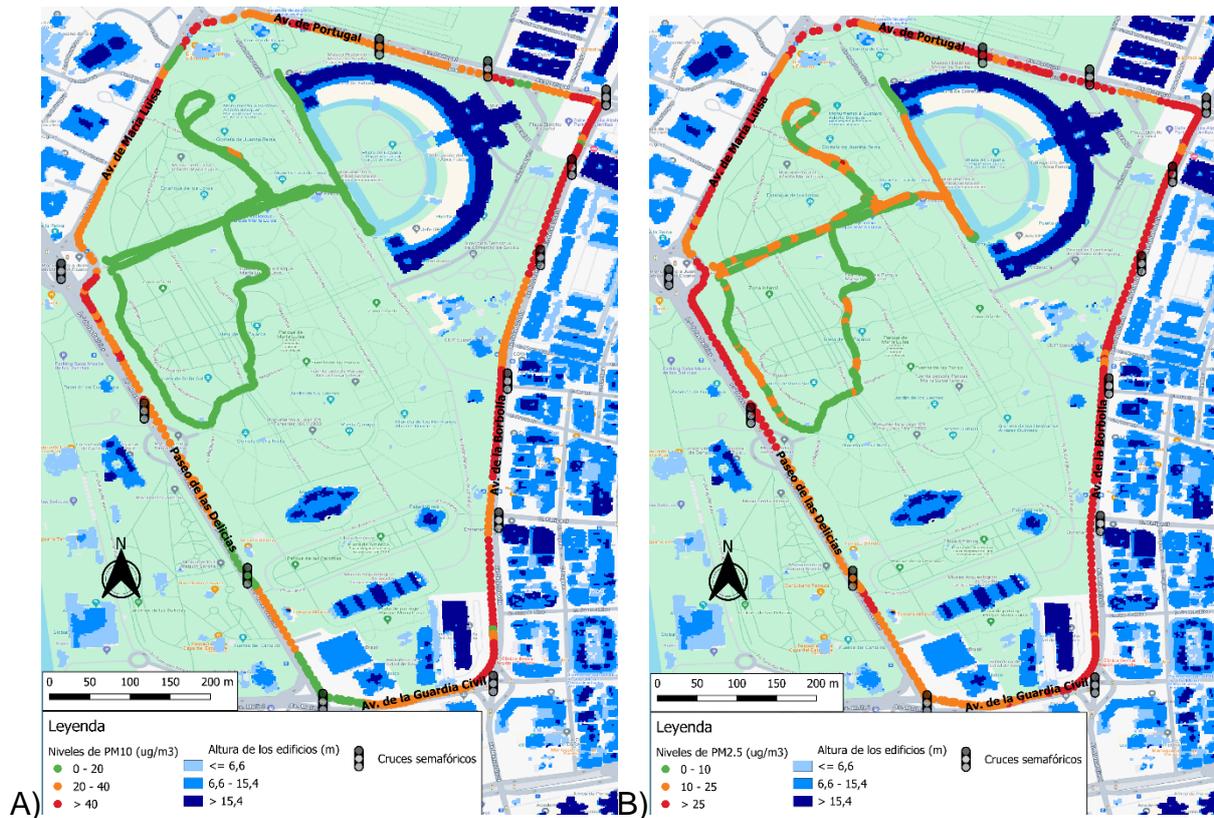
Así, en el perímetro de Parque de los Príncipes, se observa un tramo de superación de PM con respecto a los VLA de la actual Directiva en las inmediaciones del cruce semafórico de calle Virgen de la Oliva. En este sentido, la mayoría del perímetro muestra valores de PM inferiores a los VLA de la actual Directiva. Con respecto al PM<sub>10</sub>, se observan subtramos con niveles inferiores a su VLA de la futura Directiva. En cambio, los niveles de PM<sub>2.5</sub> superan su VLA de la futura Directiva en la práctica totalidad del perímetro del Parque de los Príncipes.



**Figura 26.** Niveles de PM muestreados con el LCS en el perímetro y en el interior del Parque de los Príncipes y altura de los edificios colindantes. A): valores de PM10. B): valores de PM2.5.

Por su parte, el recorrido por el Parque de María Luisa comienza por su perímetro a las 12:16 horas y acaba a las 14:08 horas en su interior ([Figura 27](#)).

Los niveles de PM10 muestreados en el perímetro son inferiores al VLA de la actual Directiva en la mayor parte del recorrido. Sin embargo, muestra niveles superiores con respecto al VLA de la actual Directiva en las inmediaciones de los cruces semafóricos de Avenida de la Borbolla. En cuanto al PM2.5, los niveles muestreados son superiores al VLA de la actual Directiva en la mayoría del recorrido perimetral. La totalidad del perímetro muestra niveles de PM2.5 superiores al VLA de la futura Directiva. Cabe señalar que las superaciones más significativas del VLA de la actual Directiva con respecto al PM se dan en Avenida de la Borbolla, donde hay presencia de edificios.



**Figura 27.** Niveles de PM muestreados con el LCS en el perímetro y en el interior del Parque de María Luisa y altura de los edificios colindantes. A): valores de PM10. B): valores de PM2.5.

En el interior de ambas zonas verdes se observa un patrón similar con respecto al PM muestreado. Con respecto al perímetro, se observa una reducción de los niveles con respecto al PM10 y los sitúa por debajo del VLA de la futura Directiva en la totalidad del recorrido, a la vez que muestran unos niveles de PM2.5 inferiores al VLA de la futura Directiva en la mayor parte del recorrido. No se observan superaciones de PM con respecto al VLA de la actual Directiva en el interior de las zonas verdes muestreadas.

Este muestreo constituye una evidencia del efecto sumidero que podrían tener las zonas verdes para la reducción de las emisiones de partículas derivadas del tráfico. Se tratan de zonas ajardinadas con cubierta arbórea que podrían reducir la contaminación urbana, hecho que está siendo estudiado en la actualidad por el Proyecto BIOCITREES, liderado por la Universidad de Granada (UGR, 2024). Por tanto, podría ser beneficioso incluir zonas verdes dentro de las ZBE con el fin de mejorar la calidad del aire ambiente.

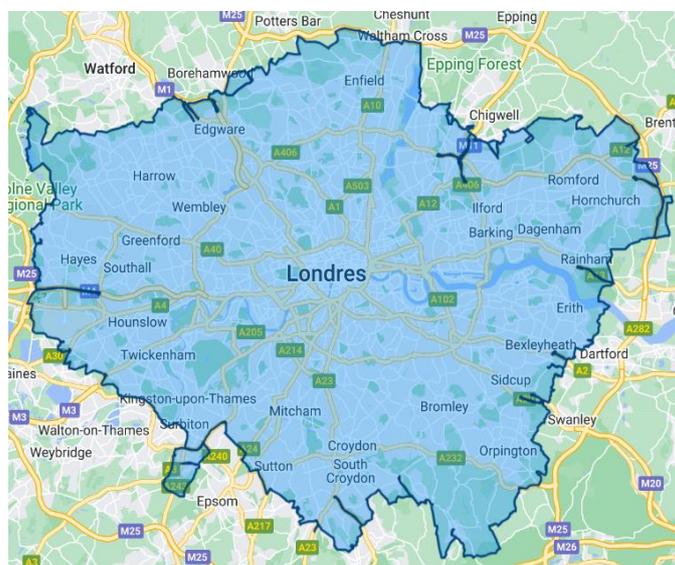


Por otro lado, se encuentra la ULEZ (*Ultra Low Emission Zone*) (Figura 29). Se trata de una zona de ultra bajas emisiones que comprende la misma área que la LEZ, solo que las limitaciones de acceso son más restrictivas para el resto de vehículos.

De esta manera, solo pueden acceder al interior de la ULEZ los turismos, furgonetas y minibuses con motor de gasolina que cumplan con la Norma Euro 4 (en lo referente a los NO<sub>x</sub>), fabricados del año 2006 en adelante, generalmente, y aquellos con motor diésel que cumplan con la Norma Euro 6 (en lo referente a los NO<sub>x</sub> y PM), fabricados a partir del 1 de septiembre de 2015. También pueden acceder al interior de la ULEZ las motocicletas que cumplan con los estándares de la Norma Euro 3 (en relación a los NO<sub>x</sub>).

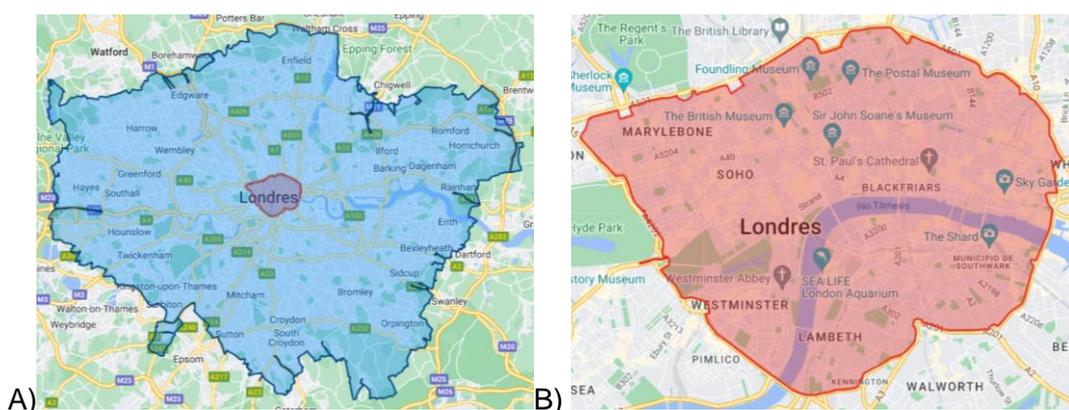
Es decir, pueden acceder al interior de la ULEZ el equivalente a turismos y furgonetas que puedan portar el distintivo ambiental «C» de la DGT, que también permite el acceso a la ZBE de Sevilla, al igual que pueden acceder a su interior los coches eléctricos sin ser penalizados, los vehículos pesados que cumplan con los estándares de la LEZ y aquellos vehículos que no cumplan los estándares de acceso, pero que abonen las tasas pertinentes.

La ULEZ está activa a todas horas, todos los días del año, excepto el día de Navidad (25 de diciembre). Cualquier usuario que quiera acceder al interior de esta con su vehículo sin cumplir con los estándares de emisiones exigidos, deberá abonar 12.5 £ cada día que quiera acceder. Los residentes de Londres podrán obtener bonificaciones y descuentos para el transporte público (autobús o tranvía) de diferentes formas, de tal manera que se facilite la movilidad dentro de la ULEZ para la ciudadanía (*Transport For London, 2024*), lo cual es necesario debido a las limitaciones en la circulación de vehículos para la ciudadanía.



Por último, la ciudad de Londres incorpora en su ordenamiento la *Congestion Charge* (CC) *zone* que, traducido al español, sería una zona de tarifas por congestión (Figura 30). Abarca el centro histórico de Londres, siendo el equivalente a la ZTR del Casco Antiguo de Sevilla.

Se trata de una zona donde hay que abonar las tasas pertinentes si se quiere acceder al interior de esta, independientemente del vehículo y de los estándares de emisiones que cumplan. Es una zona que está operativa todos los días de lunes a viernes de 7:00 a 18:00 horas y de 12:00 a 18:00 horas los sábados, los domingos y los festivos. El 25 de diciembre (día de Navidad) y el 1 de enero (fiesta de año nuevo) son días exentos de tasas. Aquellos usuarios que quieran acceder al interior de la CC tendrán que abonar 15 £ (*Transport For London, 2024*).



**Figura 30.** Comparativa de la superficie de ocupada ULEZ (A) frente a la CC (B) en Londres. Fuente: *Transport For London, 2024*.

Todas estas zonas de restricciones al tráfico están señalizadas y vigiladas por cámaras que detectan las matrículas de los vehículos. Los usuarios afectados deberán abonar las tasas hasta tres días antes o hasta 90 días después para la LEZ o hasta tres días después para la ULEZ si no quieren ser sancionados. Se pueden abonar las tasas mediante la plataforma Auto Pay. Además, el sitio web oficial de Transport For London incorpora un buscador de calles para conocer si está afectada por alguna limitación de acceso.

En términos territoriales, la LEZ y la ULEZ de Londres se corresponderían con la aglomeración urbana de Sevilla y la CC se correspondería con la ZTR del Casco Antiguo de Sevilla en cuanto a las medidas utilizadas para restringir el tráfico.

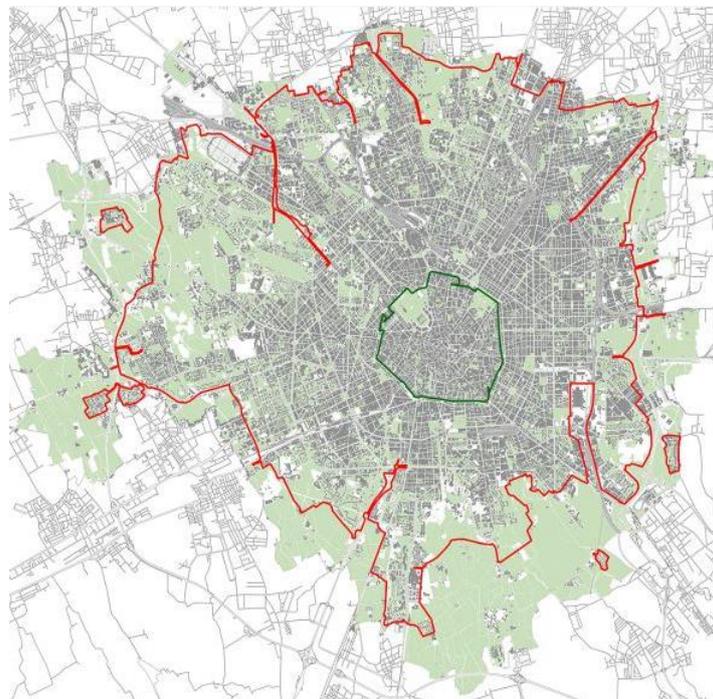
De esta manera, la ULEZ de Londres no es más que una extensa ZBE supramunicipal, cuyo diseño se contempla en el [RD 1052/2022](#), solo que a la ULEZ no pueden acceder aquellos turismos y furgonetas que porten el equivalente a la etiqueta ambiental «B» de la DGT, pero que, sin embargo, permite el acceso al interior de la ZBE de Sevilla. Las medidas de restricción de la ULEZ Londres parecen seguir la premisa de que un vehículo diésel con los estándares de la Norma Euro 4 triplica las emisiones de NO<sub>x</sub>

y quintuplica las emisiones de PM con respecto al mismo fabricado con la Norma Euro 6, y que un vehículo con motor de gasolina con la Euro 3 emite prácticamente el doble de NO<sub>x</sub> que el mismo fabricado con los estándares de la Euro 4.

Todo ello, sumado a las elevadas tasas diarias para acceder a la LEZ o ULEZ, la adecuada red de transporte público y las ayudas a la ciudadanía para poder utilizarlo podrían resultar en una reducción elevada de las emisiones de las emisiones del tráfico con la consiguiente mejora de la calidad del aire.

## 5.2 Milán

Las zonas de emisiones presentan dos tipos de zonas, B y C, insertándose la última dentro de la primera ([Figura 31](#)), y otra zona de acceso limitado al tráfico. En este sentido, la zona B de Milán abarca a la totalidad del núcleo urbano de la ciudad. Con carácter general, esta zona no permite la entrada de vehículos de más de 12 m de largo de 7:30 a 19:30 horas, lo que coincide con el horario laboral. Así, la zona B incorpora una planificación progresiva para la limitación de la circulación de los vehículos más contaminantes ([Tabla 14](#)).



**Figura 31.** Superficie de ocupada por las ZBE de Milán. Línea roja: zona B. Línea verde: zona C. Fuente: [Unión Europea, 2024](#).

Por su parte, la zona C consiste en una combinación entre una zona de peaje urbano junto con una zona de bajas emisiones. Se trata de una zona que abarca el centro histórico de la ciudad en la que los usuarios que quieran acceder a su interior deberán abonar una tasa de 22.5 €. Solo podrán acceder al interior de esta zona aquellos

vehículos menos contaminantes, a excepción de vehículos pesados como camiones. Todos los vehículos que accedan deben de medir menos de 7.5 m de largo.

Las restricciones de acceso siguen un plan de reducción de emisiones similar al establecido en la zona B en cuanto a plazos, vehículos afectados y Normas Euro a cumplir (Tabla 14). Por lo tanto, en el año 2030, se espera que no accedan al interior de la zona C los vehículos diésel, salvo que se permita con la llegada de la futura Euro 7. Para 2030 sí podrán acceder los vehículos de gasolina fabricados con la Euro 5. La zona C está activa de lunes a viernes de 7:30 horas a 19:30 horas y pueden acceder al interior de ella vehículos eléctricos, híbridos que emitan  $\leq 100$  g de CO<sub>2</sub>/km y motocicletas que cumplan con la norma requerida (Unión Europea, 2024).

**Tabla 14.** Programación de las restricciones a vehículos para el acceso a la ZBE (B) de Milán. Según Unión Europea (2024).

Tipo de vehículo	Tipo de motor	Estándares mínimos hasta 30.09.24	Estándares mínimos a partir del 30.09.24	Estándares mínimos a partir del 30.09.25	Estándares mínimos a partir del 30.09.28	Estándares mínimos a partir del 09.30
Turismos	Gasolina	Euro 3	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 5
	Diésel	Euro 6abc adquiridos a partir de 2019	Euro 6abc adquiridos a partir de 2019	Euro 6abc adquiridos a partir de 2019	Euro 6d-temp.	No permitida su circulación
Vehículos ligeros de mercancías	Gasolina	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 5
	Diésel	Euro 5	Euro 6a (a partir de 2019) y Euro 6bc (a partir de 01.10.2019)	Mismos estándares que en el periodo anterior	Euro 6d-temp.	No permitida su circulación
Vehículos pesados de mercancías	Gasolina	Sin restricciones	Sin restricciones	Sin restricciones	Sin restricciones	Euro 5
	Diésel	Euro 5 o filtro de partículas diésel instalado (para cumplir al menos con el estándar de partículas.  Euro 4 si se instala antes del 30.4.2019, para cumplir con Euro 6 si se instala después).	6 (hasta el 20th año a partir de la fecha del primer registro si se registró antes de 2021; hasta el 14th año a partir de la fecha del primer registro, si se registró de 2021 a 2025)  Euro 5 con filtro de partículas diésel instalado (para cumplir al menos con el estándar de partículas Euro 6	Mismos estándares que en el periodo anterior	Mismos estándares que en el periodo anterior	No permitida su circulación
Autobuses, minibuses y autocares	Gasolina	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 5
	Diésel	Euro 5 o filtro de partículas diésel instalado (para cumplir al menos con el estándar de partículas.  Euro 4 si se instaló antes de 2019, Euro VI si se instaló después).	Euro 6 o filtro de partículas diésel instalado (para cumplir al menos con la norma de partículas Euro VI): hasta 20th año a partir de la fecha del primer registro si se registró antes de 2021; hasta el 14th año a partir de la fecha del primer registro, si se registró de 2021 a 2025	Mismos estándares que en el periodo anterior	Mismos estándares que en el periodo anterior	No permitida su circulación
Ciclomotores y motocicletas	Con motor de gasolina de cuatro tiempos	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 4
	Diésel	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 4	No permitida su circulación
	Con motor de dos tiempos	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 4	Euro 5

En Milán también existe una zona de tráfico limitado en la que pueden acceder al interior de ella solo el transporte público que cumpla mínimo con la Norma Euro 3 para

diésel y Norma Euro 1 para gasolina. Además, está limitada por tramos horarios (Unión Europea, 2024).

Todas estas zonas de restricciones al tráfico están señalizadas y vigiladas por cámaras que detectan las matrículas de los vehículos. Los usuarios que quieran acceder a la zona C deben adquirir el acceso a través del sitio web establecido para ello y activarlo mediante SMS o llamada.

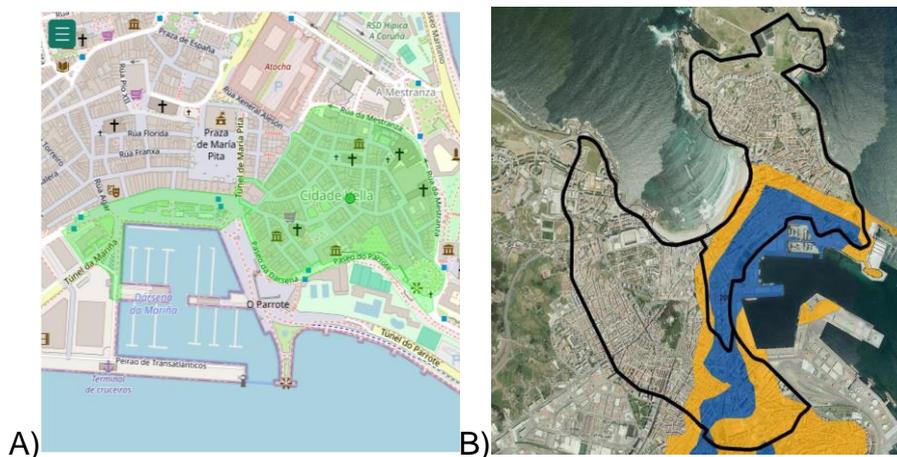
Milán constituye un ejemplo de ciudad que convierte todo el núcleo urbano en una ZBE y que, además, presenta un plan progresivo para la eliminación de la circulación de sus calles a los vehículos más contaminantes y, con ello, para contribuir a la mejora de la calidad del aire. Esto se distancia mucho de lo que la ZBE de Cartuja en Sevilla supone en cuanto a extensión, a limitaciones de acceso y a programación.

La zona C, en cambio, presenta similitudes en cuanto a su delimitación con la ZTR de Casco Antiguo de Sevilla. Sin embargo, en el caso de Milán, las limitaciones de acceso están relacionadas con las emisiones de los vehículos y el abono de las tasas y, en el caso de Sevilla, con los residentes del interior de la ZTR de Casco Antiguo.

### 5.3 A Coruña

La ciudad de A Coruña tiene una ZBE que se divide en dos fases de implantación según las dos áreas delimitadas. Se empezó limitando el acceso al centro histórico de la ciudad (actual ZBE) y se extenderá a una zona de protección (Figura 32), ocupando una superficie total de 6.2 km<sup>2</sup>, lo que supone el 29 % del suelo urbano. Esta zona afecta a 137 244 habitantes que conforman el 55 % de la población de A Coruña (Concello de A Coruña, 2022).

Para el diseño de la futura ZBE de A Coruña, previamente, se ha analizado la calidad del aire y se ha diseñado conforme a un mapa de conflicto de NO<sub>2</sub>, de tal forma que cubre la zona de mayor conflicto del NO<sub>2</sub>.



**Figura 32.** Superficie de ZBE en A Coruña. A): ZBE centro histórico, en vigor. B): ZBE en trámites para ser aprobada. Fuente: MITECO (2024) y Concello de A Coruña (2022).

La futura ZBE de A Coruña incluye en su interior cuatro estaciones de calidad del aire que permiten evaluar la evolución de la calidad del aire dentro de esta zona conforme a lo establecido en el [RD 1052/2022](#). Además, integra puntos de control de emisiones en continuo ([Figura 33](#)), que permite que los modelos determinen la evolución de la pluma de contaminación, así como sonómetros para medir y establecer modelos de contaminación por ruidos asociados al tráfico.



**Figura 33.** Medidores de emisiones en continuo dentro del interior de la ZBE de A Coruña. Fuente: [Concello de A Coruña, 2022](#).

Esta ZBE controla el acceso de los vehículos con cámaras que utilizan un *software* de reconocimiento de matrículas y de tipo de vehículos entrenado con inteligencia artificial.

En la actualidad, puede acceder al interior del centro histórico solo el transporte público y de emergencias, así como servicios de carga y descarga de mercancías de 6:00 a 11:00 horas. Los residentes y los vehículos autorizados pueden circular con un máximo de 15 minutos. Estas restricciones no atienden al criterio de emisiones del tráfico, al igual que ocurren en las ZTR de Sevilla.

No obstante, la futura ZBE de A Coruña se diseña conforme a lo establecido en el [RD 1052/2022](#), cumpliendo desde la evaluación previa de la calidad del aire y su seguimiento, hasta la mejora del transporte público urbano, las zonas peatonales y zonas verdes y de la circulación en bicicleta ([Concello de A Coruña, 2022](#)).

Este tipo de medidas son indispensables y deben acompañar al diseño de las ZBE para realizar una mejora sustancial de la calidad del aire, mitigando las limitaciones de movilidad en las que se puedan incurrir debido a las restricciones de tráfico. En comparación, la ZBE de Sevilla no muestra ninguna forma de evaluar la calidad del aire, ya que no existen estaciones de calidad del aire dentro de la misma ni próximas a la ZBE, lo que limita la evaluación de la calidad del aire a campañas de muestreo. A ello, además, deben acompañarle medidas para la mejora del transporte público y de la movilidad activa. Consecuentemente, será difícil cumplir con los valores límite anuales de la Directiva Europea de calidad del aire.

## 6. Metodología propuesta para la evaluación de ZBE y consideraciones adicionales para su diseño

La contaminación del aire urbano debido al tráfico es un problema complejo y difícil de abordar debido a su alta variabilidad espaciotemporal y la multitud de factores que influyen en la concentración o dispersión de contaminantes en la ciudad. De ahí la necesidad de establecer una metodología simplificada que permita evaluar la efectividad de las ZBE como instrumentos para la mejora de la calidad del aire urbano (Figura 34).

En este sentido, se debe seguir una metodología conjunta. Por un lado, se requiere de una metodología que permita calcular la contribución del tráfico a reducir para cumplir con los VLA de la futura Directiva Europea de calidad del aire (a cumplir en 2030) y, basándose en esto, obtener una aproximación del número de vehículos que se debe reducir en el interior de la ZBE. Por otro lado, se requiere de una metodología que permita determinar, de manera hiperlocalizada, la concentración de PM y la influencia de la morfología urbana sobre el flujo del aire, ya que este factor incide sobre la acumulación o dispersión de las partículas relacionadas con el tráfico.

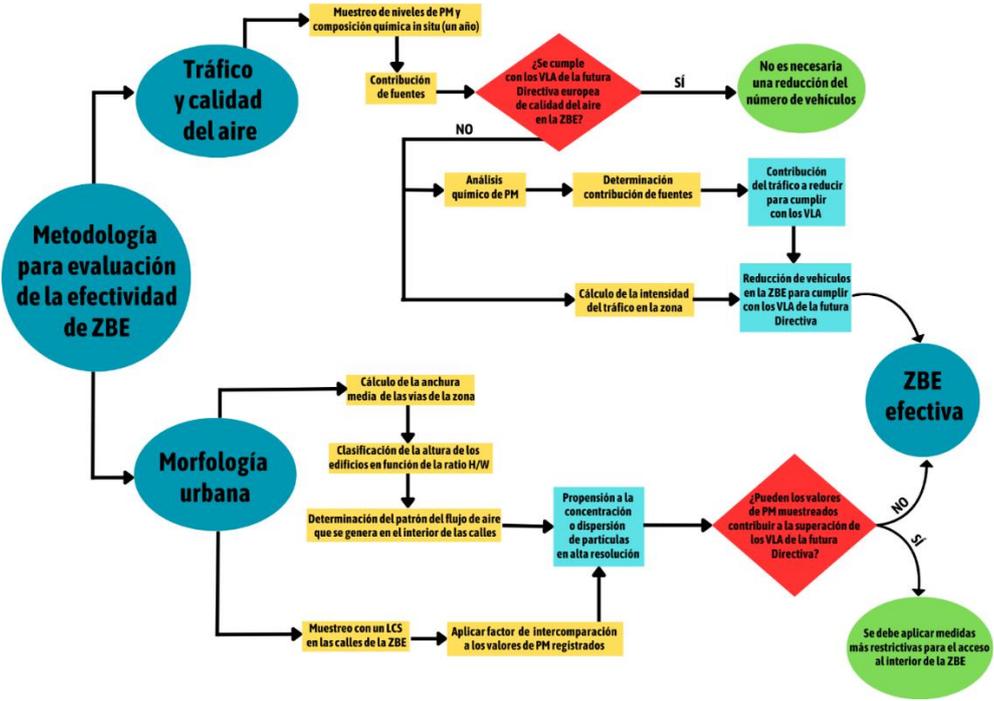


Figura 34. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la evaluación de ZBE.

### 6.1 Metodología a seguir con respecto a la calidad del aire

En primer lugar, se debe muestrear la calidad del aire (niveles de PM y gases contaminantes) *in situ*. Se tendrán en cuenta los VLA, dado que el RD 1052/2022 establece que las mediciones incluirán, al menos, las concentraciones anuales. Por un lado, esto permitirá analizar la variación temporal de los contaminantes asociados

con el tráfico. Por otro lado, la composición química de PM permitirá establecer la contribución de fuentes y, con ello, determinar la contribución del tráfico. Tras ello, se podrá calcular la contribución del tráfico a reducir para alcanzar los VLA de la futura Directiva Europea de calidad del aire.

Posteriormente, se debe calcular la intensidad del tráfico con una escala temporal diaria. Esto permitirá conocer el número de vehículos que circulan a diario por la zona objeto, así como su patrón anual y semanal. Tras ello, se puede calcular la proporción de la cantidad de vehículos que debe reducirse dentro de la ZBE en base a la contribución del tráfico a reducir para cumplir con los VLA.

## **6.2 Metodología a seguir para determinar la influencia de la morfología urbana sobre los contaminantes derivados del tráfico**

En primer lugar, se debe calcular la anchura media de las calles de la ZBE para, con ello, clasificar las alturas de los edificios con respecto a la ratio H/W mencionada en este estudio. Esto permitirá determinar el patrón del flujo de aire que se genera entre edificios frontales y, con ello, su propensión a la acumulación o dispersión de contaminantes derivados del tráfico en el interior de las calles.

Por otro lado, es necesario muestrear con un LCS para extender el alcance de la estación de calidad del aire, de tal manera que permita analizar la concentración y el comportamiento de los contaminantes derivados del tráfico de forma *online* y *offline*, aplicando, posteriormente, el factor de intercomparación correspondiente. Esto permite establecer los *hotspots* para la contaminación relacionada con el tráfico a nivel de calle, en función de la ratio H/W de las vías y de los cruces semafóricos existentes.

## **6.3 Consideraciones adicionales para la implantación de ZBE**

Para el diseño de una ZBE se debe:

- Tomar como prioridad el diseño de las ZBE para la protección de las zonas de especial sensibilidad conforme a lo establecido en el [RD 1052/2022](#), que se deben establecer prioritariamente en las proximidades de equipamientos escolares, sanitarios, hospitalarios y de residencias de ancianos, sin perjuicio de que no tengan un carácter continuo con la ZBE principal.
- Establecer una ZBE principal, en la que puedan acceder a su interior los vehículos con la etiqueta ambiental «C», «ECO» ó «0», y un anillo externo que funcione como perímetro de protección en el que, además, puedan circular los vehículos con la etiqueta ambiental «B», de tal forma que se proteja la calidad del aire en el interior de la ZBE principal.
- Tener en cuenta el área de las grandes superficies donde previamente esté restringido el acceso a vehículos motorizados, ya que limitan la capacidad de

mejora de la calidad del aire. No se tendrán en cuenta las zonas verdes dado que estas pueden tener un efecto de sumidero de la contaminación del aire urbano.

- Considerar la sustitución de cruces semafóricos por cualquier otra señalización que no requiera de una detención obligatoria de los vehículos o, en su defecto, la adopción de medidas de circulación que permitan el flujo del tráfico a una velocidad lo más constante posible.
- Realizar un análisis estadístico que permita establecer la relación entre las variables meteorológicas y la contribución del tráfico. Esto permite, por un lado, determinar si alguna de las variables meteorológicas influye sobre la contribución del tráfico y, por otro lado, si dicha relación presenta estacionalidad. Con ello, se podría establecer una ZBE vigente durante un periodo determinado al año.

## 7. Conclusiones

En este estudio se ha acordado una metodología válida que permite, por un lado, determinar la reducción de vehículos necesaria para alcanzar los valores límites anuales de la futura Directiva Europea (2030) de calidad del aire recientemente aprobada y, por otro lado, determinar si una ZBE es efectiva en cuanto a la mejora de la calidad del aire.

Así se demuestra que, mediante la contribución del tráfico en PM10 y la intensidad del tráfico circulante por las inmediaciones de las estaciones de tráfico, se puede inferir una aproximación al número de vehículos que hay que reducir para cumplir el VLA. De esta manera, si en la zona de Calle Torneo o de Parque de los Príncipes se implantara una ZBE, se tendrían que restringir el acceso a 12 110 y a 4089 vehículos respectivamente. Por tanto, deberían tener una intensidad de tráfico equivalente o incluso inferior a la que se produce en fines de semana y meses de verano.

Por otro lado, se ha demostrado que, mediante el uso de LCS e imágenes LÍDar, se puede inferir la influencia de los edificios sobre la concentración o dispersión del PM derivado del tráfico, así como evaluar los picos de concentración ante las aceleraciones de los vehículos tras su detención en cruces semafóricos.

Por su parte, la ZBE de Cartuja se ha diseñado sin un análisis previo en relación a la calidad del aire (PM y gases contaminantes) desde un punto de vista histórico, lo que la hace inefectiva al no poder definirse objetivos de mejora de calidad del aire evaluables, tal y como se establece en el [RD 1052/2022](#).

Así pues, la ZBE de Sevilla se inserta en un espacio donde no hay zonas de especial sensibilidad, como hospitales o centros educativos, ni población residente que puedan

beneficiarse de una mejora de la calidad del aire. Además, dentro de la ZBE hay recintos que ocupan más de un tercio de su área, en los que previamente no se permitía la circulación de vehículos, lo que le resta efectividad para la mejora la calidad del aire.

Las restricciones de acceso a la ZBE podrían ser inefectivas. Por un lado, estas solo afectarían al 46 % de los desplazamientos diarios. Por otro lado, se permite el acceso a los vehículos que porten el distintivo ambiental «B», que puede portarlo el promedio de vehículos de Sevilla y su área metropolitana.

Por último, se demuestra que las ZTR de Sevilla son instrumentos más efectivos para la mejora de la calidad del aire urbano que su ZBE, ya que en su interior se muestran reducciones significativas de PM con respecto a su perímetro. Esto es debido a las estrictas restricciones de acceso, aun cuando estas no presentan criterios basados en el potencial contaminante de los vehículos.

## 8. Bibliografía y webs de referencia

- Amato, F., Alastuey, A., De La Rosa, J., Gonzalez Castanedo, Y., Sánchez de la Campa, A. M., Pandolfi, M., Lozano, A., Contreras González, J., y Querol, X. (2014). Trends of road dust emissions contributions on ambient air particulate levels at rural, urban and industrial sites in southern Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 3533-3544. <https://doi.org/10.5194/acp-14-3533-2014>
- Anexos de la Propuesta de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa (versión refundida). *Comisión Europea*, 26 de noviembre de 2022. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2ae4a0cc-55f8-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0006.02/DOC\\_2&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2ae4a0cc-55f8-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_2&format=PDF)
- Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., Marshall, J.D., Portier, C.J., Vermeulen, R.C.H., y Hamburg, S. P. (2017). High-resolution air pollution mapping with Google street view cars: exploiting big data. *Environmental science & technology*, 51(12), 6999-7008. <https://doi:10.1021/acs.est.7b00891>
- Boletín Oficial de la Provincia de Sevilla. Número 6. Diputación de Sevilla, 10 de enero de 2022 <https://www.sevilla.org/servicios/movilidad/documentos-pdf-movilidad/extracto-bop-6.pdf>
- Boletín Oficial de la Provincia de Sevilla. Número 245. Diputación de Sevilla, 22 de octubre de 2022 <https://www.sevilla.org/servicios/movilidad/archivos/2024/bop-245-extracto-publicacion-22-10-2022.pdf>
- Carslaw, D. C. y Ropkins, K. (2012). Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27-28, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Castell, N., Mantilla, E., Salvador, R., Stein, A. F., y Millán, M. (2010). Photochemical model evaluation of the surface ozone impact of a power plant in a heavily industrialized area of southwestern Spain. *Journal of environmental management*, 91(3), 662-676. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.030>
- Chen, Y., Gu, P., Schulte, N., Zhou, X., Mara, S., Croes, B. E., Herner, J.D. y Vijayan, A. (2022). A new mobile monitoring approach to characterize community-scale air pollution patterns and identify local high pollution zones. *Atmospheric Environment*, 272, 118936. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118936>

- Concello da Coruña (2022). Proyecto de creación e implantación inicial de la zona de bajas emisiones de A Coruña. [https://www.coruna.gal/descarga/1453804413604/22.04.22\\_Proyecto-ZBECOR.pdf](https://www.coruna.gal/descarga/1453804413604/22.04.22_Proyecto-ZBECOR.pdf)
- Directiva (CE) 98/69 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre, relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L350, 28 de diciembre de 1998. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9ee5d16b-1a4a-4a72-ac90-5e3a0bb1d745.0010.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9ee5d16b-1a4a-4a72-ac90-5e3a0bb1d745.0010.02/DOC_1&format=PDF)
- Directiva (CE) 1999/30 del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L163, de 29 de junio de 1999. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0030>
- Directiva (CE) 2004/107 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L23, de 26 de enero de 2005. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0107>
- Directiva (CE) 2008/50 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*, L152, de 11 de junio de 2008. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050>
- Fernández-Camacho, R., de La Rosa, J. D. y Sánchez de la Campa, A.M. (2016). Trends and sources vs air mass origins in a major city in South-western Europe: Implications for air quality management. *Science of the Total Environment*, 553, 305-315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.079>
- Frederickson, L.B., Sidaraviciute, R., Schmidt, J., Hertel, O. y Johnson, M.S. (2022). Are dense networks of low-cost nodes really useful for monitoring air pollution? A case study in Staffordshire. *European Geosciences Union*, 22, 13949-13965. <https://doi.org/10.5194/acp-22-13949-2022>
- Harrison, R. M., Vu, T.V., Jafar, H. y Shi, Z. (2021). More mileage in reducing urban air pollution from road traffic. *Environment International*, 149, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106329>

- Internacional Organization for Standardization (2016). *Fine test dust. Filtration standards & specifications* (ISO 12103-A1.). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12103:-1:ed-2:v1:en>
- Kerckhoffs, J., Khan, J., Hoek, G., Yuan, Z., Hertel, O., Ketznel, M., Jensen, S.S., Al Hasan, F., Meliefste, K. y Vermeulen, R. (2022). Hyperlocal variation of nitrogen dioxide, black carbon, and ultrafine particles measured with Google Street View cars in Amsterdam and Copenhagen. *Environment International*, 170, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107575>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L. y Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment international*, 75, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. *Boletín Oficial del Estado*, 121, de 21 de mayo de 2021. <https://www.boe.es/boe/dias/2021/05/21/pdfs/BOE-A-2021-8447.pdf>
- Li, H., Qian, X. y Wang, Q. (2013). Heavy metals in atmospheric particulate matter: a comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation. *Environmental Science & Technology*, 47 (23), 13210-13211. <https://doi.org/10.1021/es404751a>
- Lipp, D. (2014). El cañón urbano su incidencia en la contaminación del aire. *Actas Congreso Internacional de Geografía*, 75, 123-128.
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Salvador, P., Sánchez de la Campa, A., Artiñano, B., de la Rosa, J.D. y Gibbons, W. (2006). Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail. *Atmospheric Environment* 40, 6791-6803. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.074>
- Millán-Martínez, M., Sánchez-Rodas, D., Sánchez de la Campa, A. M. y de la Rosa, J. (2021). Contribution of anthropogenic and natural sources in PM10 during North African dust events in Southern Europe. *Environmental Pollution*, 290, 118065. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118065>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico. *Predicción de episodios de intrusiones saharianas. Resumen de episodios 2021*. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/episodios\\_actualizados\\_hasta\\_el29dediciembre\\_de\\_2021\\_tcm30-534722.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/episodios_actualizados_hasta_el29dediciembre_de_2021_tcm30-534722.pdf)

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico. *Predicción de episodios de intrusiones saharianas. Resumen de episodios 2022.* [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/episodios actualizados hasta el31dediciembre de 2022 tcm30-550131.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/episodios_actualizados_hasta_el31dediciembre_de_2022_tcm30-550131.pdf)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico. *Predicción de episodios de intrusiones saharianas. Resumen de episodios 2023.* [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgalsi/atm%c3%b3sfera-y-calidad-del-aire/sgalsi\\_intrusiones/sgalsi\\_intrusiones-2023/Episodios actualizados hasta el%2028%20de%20diciembre de 2023.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgalsi/atm%c3%b3sfera-y-calidad-del-aire/sgalsi_intrusiones/sgalsi_intrusiones-2023/Episodios actualizados hasta el%2028%20de%20diciembre de 2023.pdf)
- Nagendra, S.M.S., Yasa, P. R., Narayana, M. V., Khadirnaikar, S. 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, 520-535. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.006>
- Notario, A., Bravo, I., Adame, J. A., Díaz-de-Mera, Y., Aranda, A., Rodríguez, A. y Rodríguez, D. (2012). Analysis of NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and oxidant (OX= O<sub>3</sub>+ NO<sub>2</sub>) levels measured in a metropolitan area in the southwest of Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 104-105, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.008>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. Routledge.
- Pandolfi, M., Tobias, A., Alastuey, A., Sunyer, J., Schwartz, J., Lorente, J., Pey, J. & Querol, X. (2014). Effect of atmospheric mixing layer depth variations on urban air quality and daily mortality during Saharan dust outbreaks. *Science of the total environment*, 494-495, 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.004>
- Junta de Andalucía (2009). *Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Sevilla.* <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/fomentoarticulaciondelterritorioyvivienda/areas/ordenacion/planes-subregionales/paginas/aglomeracion-sevilla.html>
- Querol, X., Alastuey, A., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Plana, F. y Ruiz, C.R. (2002) Source apportionment analysis of atmospheric particulates in an industrialised urban site in southwestern Spain *Atmospheric Environment* 36, 3113-3125. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00257-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00257-1)

- Real Decreto 1052/2022, de 27 de diciembre, por el que se regulan las zonas de bajas emisiones. *Boletín Oficial del Estado*, 311, de 28 de diciembre de 2022. <https://www.boe.es/boe/dias/2022/12/28/pdfs/BOE-A-2022-22689.pdf>
- Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos. *Boletín Oficial del Estado*, 22, de 26 de enero de 1999. <https://www.boe.es/buscar/pdf/1999/BOE-A-1999-1826-consolidado.pdf>
- Reglamento (CE) 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de junio de 2007, sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L171, 29 de junio de 2007. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715>
- Reglamento (UE) 459/2012 de la Comisión, de 29 de mayo de 2012, por el que se modifican el Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo y el Reglamento (CE) nº 692/2008 de la Comisión en lo que respecta a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 6). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L142, de 1 de junio de 2012. <https://www.boe.es/doue/2012/142/L00016-00024.pdf>
- Reglamento (UE) 2017/1151 de la Comisión, de 1 de junio de 2017, que complementa el Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos, modifica la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y los Reglamentos (CE) nº 692/2008 y (UE) nº 1230/2012 de la Comisión y deroga el Reglamento (CE) nº 692/2008 de la Comisión. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L175, de 7 de julio de 2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1151>
- Settey, T., Gnap, J. y Beňová, D. (2019). Examining the impact of the deployment of low emission zones in Europe on the technological readiness of road freight transport. *Transportation Research Procedia*, 40, 481-488. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.07>
- Snyder, E.G., Watkins, T.H., Solomon, P.A., Thoma, E.D., Williams, R.W., Hagler, G.S.W, Shelow, D., Hindin, D.A., Kilaru, V.J. y Preuss, P. W. (2013).

The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369-11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>

Zafra Pérez, A, Gómez, J.A., Boente y C (2024). *Sensores electrónicos de bajo coste aplicados a la monitorización online del material atmosférico particulado producido por minería a cielo abierto* [Tesis de doctorado, Universidad de Huelva]. Arias Montano, Repositorio Institucional de la Universidad de Huelva.

## Webs de referencia

Agencia Estatal de Meteorología. Recuperado el 10 de agosto de 2024, de [https://www.aemet.es/es/datos\\_abiertos](https://www.aemet.es/es/datos_abiertos)

Agencia Europea del Medio Ambiente (19 de noviembre de 2021). *El nuevo visualizador europeo de la calidad del aire urbano permite comprobar los niveles de contaminación atmosférica a largo plazo de nuestras ciudades.* <https://www.eea.europa.eu/es/highlights/el-nuevo-visualizador-europeo-de>

Agencia Europea del Medio Ambiente (3 de agosto de 2023). *El número de muertes prematuras debido a la contaminación atmosférica sigue disminuyendo en la UE pero hay que redoblar esfuerzos para eliminar las sustancias tóxicas del medio ambiente.* <https://www.eea.europa.eu/es/highlights/el-numero-de-muertes-prematuras>

Ayuntamiento de Sevilla. *Así es el proyecto de reurbanización integral del paseo peatonal de la calle Torneo.* Recuperado el 3 de julio de 2024, de <https://www.sevilla.org/actualidad/blog/respira-sevilla-torneo>

Ayuntamiento de Sevilla (29 de diciembre de 2022). *El Ayuntamiento señala la Zona de Bajas Emisiones de Cartuja para implantarla en su primera fase a partir de enero con dos áreas donde quedarán excluidos los vehículos más contaminantes de 7 a 19 horas en días laborables y un sistema que garantiza aparcamientos en el entorno, el acceso en transporte público y la actividad del PCT y en cuyos primeros meses primará la labor de información y concienciación.* <https://www.sevilla.org/actualidad/noticias/2022/el-ayuntamiento-senaliza-la-zona-de-bajas-emisiones-de-cartuja-para-implantarla-en-su-primera-fase-a-partir-de-enero-con-dos-areas-donde-quedaran-excluidos-los-vehiculos-mas-contaminantes-de-7-a-19-horas-en-dias-laborables-y-un-sistema-que-garantiza>

Ayuntamiento de Sevilla (26 de marzo de 2024). *El Ayuntamiento amplía la fase de información de la Zona de Bajas Emisiones de la Cartuja hasta el 30 de*

junio. <https://www.sevilla.org/actualidad/noticias/2024/el-ayuntamiento-amplia-la-fase-de-informacion-de-la-zona-de-bajas-emisiones-de-la-cartuja-hasta-el-30-de-junio>

Ayuntamiento de Sevilla. *Documentación. Informes de Intensidades Medias Diarias en Rutas*. Recuperado el 8 de septiembre de 2024, de <https://traficosevilla.es/documentacion.html>

Ayuntamiento de Sevilla. *Excepciones y usuarios afectados*. Recuperado el 9 de septiembre de 2024, de <https://www.sevilla.org/servicios/movilidad/zbe/excepciones-y-usuarios-afectados>

Ayuntamiento de Sevilla. *Quienes somos. Datos de interés*. Recuperado el 29 de junio de 2024, de <https://traficosevilla.es/quienes-somos.html>

Ayuntamiento de Sevilla. *Zonas y vehículos afectados*. Recuperado el 9 de septiembre de 2024, de <https://www.sevilla.org/servicios/movilidad/zbe/zonas-y-vehiculos-afectados>

Ayuntamiento de Sevilla. *Zona de Bajas Emisiones de Sevilla*. Recuperado el 8 de junio de 2024, de <https://www.sevilla.org/servicios/movilidad/zona-de-bajas-emisiones>

Dirección General de Tráfico. *detalle-cifras*. Recuperado el 3 de julio de 2024, de <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Datos-municipales-informacion-general-2023/>

Dirección General de Tráfico. *Distintivo ambiental*. Recuperado el 3 de julio de 2024, de <https://www.dgt.es/nuestros-servicios/tu-vehiculo/tus-vehiculos/distintivo-ambiental/>

Habitatmap, 2023. *Habitatmap - AirBeam3 - AirCasting*. <https://www.habitatmap.org/>

Instituto Nacional de Estadísticas. Recuperado el 3 de julio de 2024, de <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=61398>

Junta de Andalucía. *Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire de Andalucía*. Recuperado el 2 de septiembre de 2024, de [https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset\\_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/red-de-vigilancia-y-control-de-la-calidad-del-aire-de-andaluc-c3-ada/20151](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/red-de-vigilancia-y-control-de-la-calidad-del-aire-de-andaluc-c3-ada/20151)

- Linares, C. y Díaz, J. (1 de septiembre de 2008). *¿Qué son las PM2,5 y cómo afectan a nuestra salud?* Ecologistas en Acción, 58. <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Movilidad. Zonas de bajas emisiones en España*. Recuperado el 2 de septiembre de 2024, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/movilidad.html>
- Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica. *Centro de Descargas*. Recuperado el 20 de julio de 2024, de <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDA2>
- Organización Mundial de la Salud (19 de diciembre de 2022). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Parlamento Europeo (13 de marzo de 2024). *Euro 7: aprobadas nuevas medidas para reducir las emisiones del transporte por carretera*. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20240308IPR19017/euro-7-aprobadas-nuevas-medidas-para-reducir-las-emisiones-del-transporte>
- Parlamento Europeo (24 de abril de 2024). *El Parlamento fija nuevos requisitos para mejorar la calidad del aire*. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20240419IPR20587/el-parlamento-fija-nuevos-requisitos-para-mejorar-la-calidad-del-aire>
- Transport for London. *Congestion charge*. Recuperado el 3 de agosto de 2024, de <https://tfl.gov.uk/modes/driving/congestion-charge?intcmp=2053>
- Transport for London. *How to pay a LEZ charge*. Recuperado el 3 de agosto de 2024, de <https://tfl.gov.uk/modes/driving/low-emission-zone/make-a-payment>
- Transport for London. *Low emission zone*. Recuperado el 3 de agosto de 2024, de <https://tfl.gov.uk/modes/driving/low-emission-zone>
- Transport for London. *ULEZ: Where and when*. Recuperado el 3 de agosto de 2024, de <https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone/ulez-where-and-when>

Transport for London. *Your vehicle and LEZ*. Transport for London. Recuperado el 3 de agosto de 2024, de <https://tfl.gov.uk/modes/driving/low-emission-zone/your-vehicle-and-lez>

Unión Europea. *Urban Access Regulations. Milano LEZ Area B*. Recuperado el 24 de julio de 2024, de <https://es.urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/italy-mainmenu-81/milano-lez-area-b>

Universidad de Granada (23 de julio de 2024). *Proyecto para demostrar cómo los árboles disminuyen la contaminación y la isla de calor en las ciudades*. Recuperado el 20 de agosto de 2024, de <https://www.ugr.es/universidad/noticias/arboles-disminuyen-contaminacion-isla-calor-ciudades>