



Autora: María Tárraga Díaz

Departamento: Física Aplicada

Área: Contaminación atmosférica

Tutores: Eduardo Yubero Funes y Nuria Galindo Corral

# Medidas en continuo de la concentración atmosférica de *Black Carbon* en desplazamientos en transporte público

Facultad de Ciencias Experimentales

Grado de Ciencias Ambientales

Curso 2021/2022



CIENCIAS AMBIENTALES  
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

## **RESUMEN**

La contaminación atmosférica es un fenómeno global al que se encuentra asociado un importante riesgo ambiental. Concretamente el *Black Carbon* es un tipo de material carbonoso presente mayoritariamente en la fracción  $PM_{2.5}$  que absorbe fuertemente la luz visible, y desencadena efectos nocivos sobre la salud humana, los ecosistemas, el clima y el patrimonio cultural. En este estudio se han tomado muestras de este contaminante en dos medios de transporte diferentes, concretamente, en un autobús urbano de la ciudad de Elche y un tren cercanías que conecta Alicante con Elche. El objetivo es analizar la exposición que tiene la población usuaria de estos transportes públicos a este contaminante. Sobre la base de los resultados obtenidos de estos análisis, se ha estudiado la variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de *Black Carbon* durante los recorridos, además de evaluar diferentes factores relacionados con la concentración de este contaminante carbonoso.

Palabras clave: *Black Carbon* (BC), autobús, tren, concentración y recorrido.

## **SUMMARY**

Atmospheric pollution is a global phenomenon associated with a significant environmental risk. More specifically, Black Carbon is a type of carbonaceous material present mainly in the  $PM_{2.5}$  fraction that strongly absorbs visible light, and triggers adverse effects on human health, ecosystems, climate and cultural heritage. In this study, samples of this pollutant have been taken in two different means of transport, specifically, in an urban bus of the city of Elche and a commuter train that connects Alicante with Elche. The objective is to analyze the exposure of the population using these public transports to this pollutant. Based on the results obtained from these analyses, the spatial and temporal variability of Black Carbon concentrations during the routes has been studied, in addition to evaluating different factors related to the concentration of this carbonaceous pollutant.

Keywords: *Black Carbon* (BC), bus, train, concentration and ride.

# ÍNDICE

1. Introducción .....	4
1.1. Material Particulado Atmosférico.....	4
1.1.1. Clasificación del Material Particulado Atmosférico .....	4
1.2. Composición química del PM.....	7
1.3. Compuestos carbonosos.....	7
1.3.1. Black Carbon.....	8
1.3.2. Fuentes principales del Black Carbon.....	8
1.3.3. Efectos del Black Carbon. ....	9
1.3.4. Técnicas de medición de EC y BC.....	10
1.4. Características de los vehículos .....	10
1.4.1. Autobús urbano de elche .....	10
1.4.2. Cercanías Elche - Alicante .....	10
2. Antecedentes y objetivos.....	11
2.1. Medidas en continuo del BC: estudios previos .....	11
2.2. Objetivos del estudio.....	12
3. Materiales y métodos.....	13
3.1. Localización del estudio.....	13
3.1.1. Características climáticas del área de estudio.....	13
3.1.2. Ubicación de las rutas de muestreo .....	13
3.2. Microetalmómetro AE51.....	16
3.3. GPS-Tracker Pro.....	17
3.4. Quantum SIG .....	17
4. Resultados.....	19
4.1. Autobús urbano Elche.....	19
4.2. Cercanías Elche - Alicante.....	27
5. Discusión. ....	25
5.1. Autobús urbano Elche.....	25
5.2. Cercanías Elche - Alicante.....	26
6. Conclusiones y proyección futura. ....	31
7. Bibliografía.....	32

# 1. Introducción

La contaminación atmosférica es un fenómeno global al que se encuentra asociado un importante riesgo ambiental, tanto para la salud humana como para el medioambiente y sus ecosistemas. Los principales problemas de salud relacionados con este tipo de contaminación son las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, el asma y las alergias. Se estima que anualmente se producen alrededor de 400.000 muertes prematuras en la Unión Europea debido a la exposición al aire contaminado (EC, 2021).

## 1.1. Material Particulado Atmosférico

El Material Particulado Atmosférico (PM) o aerosol es una mezcla compleja de sustancias sólidas y/o líquidas suspendidas en la atmósfera, con tamaños comprendidos entre unos pocos nanómetros y varias decenas de micras (Rodríguez et al., 2007). El PM es un componente común de la atmósfera terrestre de origen tanto natural como antropogénico, y es considerado, en ambos casos, un contaminante atmosférico debido a sus efectos sobre la salud humana (Davidson et al., 2005), los ecosistemas (Grantz et al., 2003), el clima (Bellouin et al., 2020) y el patrimonio cultural (Horemans et al., 2011). No todos los aspectos son negativos en relación con los aerosoles, ya que tienen un rol fundamental en la formación de nubes, debido a que actúan como núcleos de condensación.

### 1.1.1. Clasificación del Material Particulado Atmosférico

El PM atmosférico se puede clasificar según diferentes criterios en función de su origen, proceso de formación y tamaño.

#### Origen del Material Particulado

Se denominan partículas de origen natural a las que proceden de emisiones no causadas, directa o indirectamente, por actividades humanas. Por ejemplo, partículas derivadas de la actividad volcánica, aerosoles marinos, incendios forestales naturales, polvo del desierto, etc. (Viana et al., 2014). Por otra parte, las partículas de origen antropogénico derivan de las actividades humanas. Las principales fuentes antropogénicas de aerosoles incluyen la quema de combustibles fósiles en vehículos, calefacciones domésticas y centrales eléctricas; los procesos de desgaste de frenos y neumáticos; la resuspensión del polvo de la calzada por el tráfico; la quema de la biomasa; y los procesos industriales (Bonvalot et al., 2019, Groma et al., 2022, Piscitello et al., 2021).



A escala global, las emisiones naturales son mucho mayores que las emisiones antropogénicas (Smithson, 2002) ya que estas representan únicamente alrededor del 10% de la cantidad total de aerosol emitido (Morera-Gómez, 2018).

#### Material particulado primario y secundario

Las partículas se clasifican en función de sus procesos de formación en dos categorías: primarias y secundarias. Las partículas primarias se emiten directamente a la atmósfera desde diferentes fuentes, tanto naturales como antropogénicas, mientras que las partículas secundarias se forman por reacciones químicas atmosféricas a partir de los precursores gaseosos.

#### Distribución por tamaño

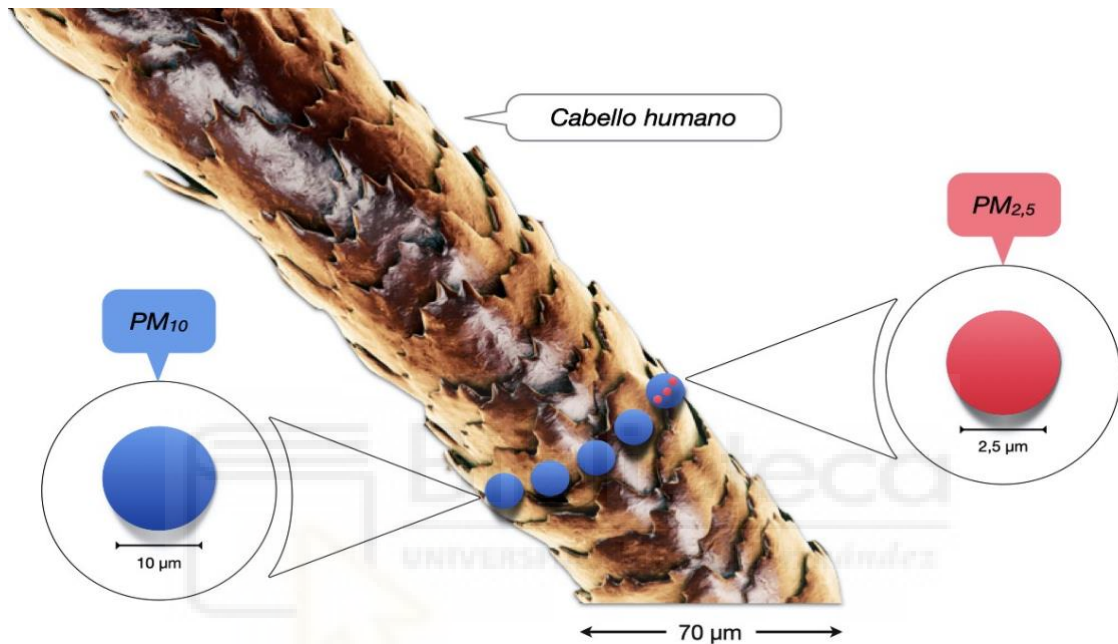
El tamaño es uno de los parámetros más importantes para comprender el comportamiento de los aerosoles atmosféricos debido a que este factor nos aporta información relacionada con el origen y fuentes de estos e incluso para determinar la escala de transporte, tiempo de residencia, mecanismos de eliminación y sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente.

Las partículas atmosféricas no son esféricas en casi ningún caso. Por lo tanto, el tamaño de las partículas se define a partir del diámetro aerodinámico, es decir, el diámetro de una esfera de densidad  $1 \text{ g/cm}^3$  con la misma velocidad de sedimentación en aire en calma que la partícula en cuestión. Así, se consideran partículas finas aquellas con un diámetro aerodinámico inferior a  $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ , mientras que las que tienen un tamaño superior a este se denominan partículas gruesas. Debido a que el tamaño de las partículas condiciona en gran medida sus efectos sobre la salud humana, los estándares de calidad de aire fijados por la legislación nacional e internacional hacen referencia a dos fracciones de tamaño de aerosol atmosférico:  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{PM}_{10}$  (Figura 1).

La fracción  $\text{PM}_{10}$  se define como el conjunto de partículas recogidas en un filtro después de pasar por un cabezal que la selecciona en función de su tamaño y que tiene una eficacia de corte del 50 % para aquellas partículas con un diámetro aerodinámico de  $10 \text{ }\mu\text{m}$ .

Una definición análoga puede hacerse para la fracción  $\text{PM}_{2,5}$  que recibe el nombre de “respirable” y engloba a aquellas partículas que pueden depositarse en los alveolos pulmonares una vez inhaladas (Gallego et al., 2012).

Las partículas gruesas generalmente se producen en procesos de disgregación mecánica como los procesos de erosión y desgaste, por el estallido de burbujas del océano o por resuspensión del polvo del suelo o de la calzada. Aunque la mayoría de las partículas gruesas son primarias, también se pueden encontrar algunas partículas secundarias en esta fracción. Las partículas gruesas pueden depositarse rápidamente, de tal forma que no viajan largas distancias como consecuencia de su eliminación por sedimentación gravitatoria cerca de la fuente de emisión o por impacto en superficies.



**Figura 1:** Representación del tamaño del  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10}$  en relación con un cabello humano.

Por el contrario, las partículas finas ( $PM_{2,5}$ ) son de origen principalmente antropogénico y se forman mayoritariamente mediante procesos químicos o por reacciones en fase líquida. Las partículas que forman la fracción  $PM_{2,5}$  tienen tiempos de permanencia en la atmósfera más largos que las partículas gruesas y pueden transportarse a través de distancias más largas.

En el caso de ambas fracciones, niveles elevados se asocian con los efectos adversos para la salud. Sin embargo, las partículas finas presentan efectos más nocivos para los seres humanos que las partículas gruesas presentes en la atmósfera. Esto se debe en gran medida a que estas partículas finas pueden penetrar directamente hasta los alveolos pulmonares y provocar daños sobre el sistema respiratorio y circulatorio, mientras que las partículas gruesas son fácilmente retenidas por las barreras biológicas del cuerpo humano y no son tan perjudiciales para el ser humano (Gallego et al., 2012).

## 1.2. Composición química del PM

La composición del PM está condicionada por su origen.

Así, las partículas de origen natural contienen principalmente especies marinas (NaCl), componentes presentes en la corteza terrestre (carbonato de calcio, óxidos metálicos o aluminosilicatos) y cenizas volcánicas (Fuzzi et al., 2015). Las fuentes naturales originan partículas mayoritariamente gruesas.

Las partículas primarias antropogénicas producidas en procesos mecánicos como el desgaste de frenos y neumáticos y la resuspensión de polvo de la calzada también tienen tamaños frecuentemente por encima de las 2,5  $\mu\text{m}$ . Estas partículas están formadas por compuestos metálicos inorgánicos y materiales orgánicos (Harrison et al., 2021). Por el contrario, las partículas primarias generadas en procesos de combustión de carburantes fósiles, que son ricas en compuestos orgánicos y carbono elemental, están principalmente distribuidas en la fracción fina (Pant et al., 2013).

Los aerosoles secundarios suelen estar constituidos principalmente por nitratos, sulfatos y sales de amonio, generados por reacciones atmosféricas de gases emitidos mayoritariamente por fuentes antropogénicas ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{NH}_3$ ), así como por compuestos orgánicos secundarios formados en procesos de fotooxidación de precursores gaseosos de origen tanto natural como antropogénico (Fuzzi et al., 2015). Dependiendo del proceso de formación, estas partículas secundarias pueden ser tanto finas como gruesas.

## 1.3. Compuestos carbonosos

Los aerosoles carbonosos contribuyen entre un 20% y un 50% a la masa total de partículas atmosféricas (Jafar et al., 2021). Se dividen principalmente en dos tipos: carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC).

El carbono orgánico es la fracción dominante de los aerosoles carbonosos, ya que incluye todos los compuestos orgánicos presentes en el material particulado. Por otro lado, el carbono elemental constituye una pequeña fracción que corresponde con la parte carbonosa del aerosol que no se volatiliza. El EC procede de una variedad de fuentes de combustión que emiten este en dos formas: char-EC cuya estructura es similar al grafito del carbono natural parcialmente conservado, de color marrón, y soot-EC donde no se mantiene la estructura original del carbono natural de tal forma que se percibe de color negro. Ambas presentan diferentes propiedades químicas y físicas, como su absorción de la luz.

### 1.3.1. Black Carbon

El Black Carbon (BC) se ha utilizado en diversos estudios indistintamente como una medida sustituta del EC, debido a que el BC se puede determinar más fácilmente a través de la absorción de la luz producida por este tipo de partículas. De tal forma, el BC es un tipo de material carbonoso presente mayoritariamente en PM<sub>2,5</sub> que absorbe fuertemente la luz visible (Kim et al., 2019). En este sentido, la definición del BC proviene de una propiedad física.

Tanto BC como EC consisten en especies de partículas carbonosas suspendidas en el aire formadas a partir de la combustión incompleta del combustible carbonoso. Ambos absorben considerables cantidades de luz y están vinculadas con posibles impactos en la salud (Briggs, 2016). Sin embargo, sus medidas no se llevan a cabo mediante los mismos procedimientos y no son completamente intercambiables, aunque ciertamente en muchas situaciones presentan una correlación muy elevada. El EC se mide empleando un método termo-óptico, mientras que la medida del BC está relacionada con la absorción de luz. La relación entre ambas variables es evidente, ya que el EC (de color oscuro) va a absorber de forma significativa la luz y, por lo tanto, un aumento de la concentración del mismo va a hacer que aumente, también, el valor del BC.

### 1.3.2. Fuentes del Black Carbon

Las principales fuentes de BC son los motores de combustión (especialmente diésel), la quema residencial de madera y carbón, las centrales eléctricas que utilizan petróleo pesado o carbón, la quema de desechos agrícolas en el campo, así como los incendios forestales.

Los estudios asignan la mayor parte del BC o EC emitido a fuentes de combustión de diésel, gasolina o vehículos motorizados (Briggs, 2016). De tal forma, el tráfico es una de las principales fuentes de emisión de BC. La alta densidad de tráfico en grandes ciudades puede llegar a afectar directamente a los ciudadanos que transitan al lado de la calzada. El 90% del BC procedente de la combustión de los automóviles posee un diámetro aerodinámico menor de 0,5 µm (Cheng et al., 2014). Por lo tanto, este BC se engloba en la fracción PM<sub>2,5</sub>.

Por otra parte, el tiempo que una persona pasa en los desplazamientos diarios en las grandes ciudades a horas punta pueden suponer exposiciones a niveles nocivos de contaminación atmosférica. Los estudios sobre la exposición personal diaria a los contaminantes atmosféricos, entre ellos BC, han encontrado que una gran proporción de la exposición diaria a estos se experimenta durante estos viajes diarios para ir a trabajar, centros de aprendizaje, etc. (Velasco et al., 2019, Dons et al., 2012, Jafar et al., 2021 y Boniardi et al., 2021).

### 1.3.3. Efectos del Black Carbon.

El BC presenta efectos adversos sobre la salud humana, el clima y el patrimonio cultural:

De manera global, el BC influye en el clima a través de la absorción y dispersión de la radiación, es decir, tiene un doble efecto. Por un lado, absorbe la luz solar, produciendo un efecto de calentamiento. Por otro lado, aumenta indirectamente la reflectividad de las nubes de tal forma que reduce el calentamiento de la superficie terrestre. La interacción del BC con la atmósfera y la luz depende en gran medida de la distribución de este en la atmósfera y determina sus efectos en el balance energético global (Kim et al., 2019).

Aparte de las implicaciones sobre el clima que tienen un efecto indirecto sobre los seres vivos, el BC posee una serie de impactos adversos en la salud pública como la posibilidad de desarrollar cáncer de pulmón. Además, está demostrado que aumenta la mortalidad causada por daños cardiovasculares y cardiopulmonares. Concretamente, exposiciones prolongadas al BC pueden aumentar el riesgo de mortalidad relacionada con enfermedades cardiovasculares, y la inhalación del BC puede iniciar respuestas inflamatorias en el tracto respiratorio, que es una de las principales causas de asma y mal funcionamiento de los pulmones. Estos problemas para la salud humana se deben a que las partículas de BC que posee un diámetro aerodinámico menor de  $0,1 \mu\text{m}$  pueden penetrar en el cuerpo humano a través del tracto pulmonar por difusión y llegar a invadir los principales órganos, incluido el cerebro.

Además de los efectos adversos sobre la salud humana y el clima, el BC tiene un impacto negativo sobre el patrimonio histórico-artístico. Gran parte de este patrimonio se encuentra al aire libre expuestos a contaminantes atmosféricos que pueden ocasionar daños estéticos y materiales. Estos factores pueden llegar a producir un deterioro irreversible de los monumentos y las obras de arte a lo largo del tiempo, que de forma indirecta puede tener impactos económicos y sociales significativos (Patrón et al., 2017). El BC participa en la formación de costras negras y otros efectos estéticos perjudiciales sobre el patrimonio cultural. De hecho, es el principal agente que ennegrece las superficies exteriores de los materiales patrimoniales y se sabe que concentraciones de BC superiores a  $2 - 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  están asociadas con niveles inaceptables de suciedad (Brimblecombe et al., 2005). A pesar de que su tiempo de vida atmosférico promedio varía de unos pocos días a semanas y pueden ser eliminado de la atmósfera a través de la precipitación y la deposición seca, en situaciones meteorológicas específicas, este daño se puede ver intensificado.

#### 1.3.4. Técnicas de medición de EC y BC.

Como se ha comentado anteriormente las técnicas de medición de carbono elemental (EC) comúnmente emplean métodos térmicos que lo separan del carbono orgánico (OC) y EC de las muestras en función de la volatilidad. Otros instrumentos de medición del EC combinan estas técnicas térmicas con métodos de absorción/transmisión óptica; nos referimos a este método de medición del EC como el "método termo-óptico". Se define el carbono total (TC) del aerosol como la suma de todo el carbono en el material particulado (OC + EC). El TC se determina mediante oxidación termoquímica y análisis de gases emitidos (principalmente CO<sub>2</sub>). El EC es el material de la muestra que no se volatiliza en un primer paso del análisis en ausencia de oxígeno y el OC se define como la diferencia entre ambos términos (OC = TC - EC) o el que se volatiliza en presencia de oxígeno. Si se utiliza este método es necesario corregir las concentraciones tanto de OC como de EC, ya que parte del OC se convertirá en EC a través de procesos de pirolisis (de ahí la necesidad de evaluar a la absorción/transmisión óptica).

Particularmente para la medición de *Black Carbon* de manera continua se emplean métodos ópticos por medio de etalómetros de absorción. Estos instrumentos se basan en la medida de la atenuación de la luz absorbida por las partículas que se depositan en un filtro. La compleja relación entre los cambios en la transmisión de luz y la absorción y dispersión del aerosol en el filtro requiere una calibración adecuada de estos métodos, incluida la selección de una longitud de onda efectiva para un coeficiente de absorción válido (normalmente en el infrarrojo), la determinación del tamaño del punto del filtro y la caracterización del flujo.

## 2. Antecedentes y objetivos.

### 2.1. Medidas en continuo de BC: estudios previos

Los niveles de exposición a los contaminantes presentes en el aire en zonas influenciadas por el BC están relacionados con factores como las concentraciones ambientales del contaminante, el tiempo de permanencia en esas zonas y los patrones de actividad, el modo de viaje, las condiciones meteorológicas, el grado de congestión del tráfico y las características de la carretera (Onat et al., 2019).

Aunque las personas pasan una pequeña proporción del tiempo diario desplazándose al trabajo, se reconoce que los desplazamientos diarios entre los domicilios particulares y los lugares habituales de trabajo y/o estudio contribuyen significativamente a la exposición diaria total a la contaminación del aire (Borniardi et al., 2021). Los modos de desplazamiento activo, especialmente el ciclismo, aunque contribuyen positivamente a la salud personal y la descongestión del tráfico urbano, también se ven afectados negativamente por las emisiones del tráfico. Por el contrario, conducir un automóvil para ir al trabajo no contribuye a la actividad física, pero sí afecta negativamente la calidad del aire y además está relacionado con una alta exposición personal.

En su mayor parte, los estudios indican que los viajeros dentro de diferentes tipos de vehículos están expuestos a niveles más altos de partículas y otros contaminantes que los peatones o ciclistas (Velasco et al., 2019, Morales et al., 2017, Moreno et al., 2015).

Durante el año 2016 en Bogotá (Colombia) se analizaron diferentes contaminantes atmosféricos, entre ellos el BC, en diferentes modos de transporte. Las concentraciones promedio más altas de BC se obtuvieron dentro de los autobuses de la ciudad. Concretamente, durante el estudio se determinó que en una calle de unos 60 m de ancho (con varios carriles exclusivos de autobús en ambos sentidos, 2 carriles para vehículos en ambos sentidos, carril bici y acera para peatones de aproximadamente 10 m) los peatones y usuarios de bicicletas estaban expuestos a concentraciones promedio hasta seis veces más bajas de BC que las obtenidas dentro del autobús en el mismo segmento de la calle. Sin embargo, la menor velocidad de desplazamiento y las tasas de inhalación ligeramente superiores dan lugar a una mayor exposición de PM para los peatones (Morales et al., 2017).

En un estudio realizado en Nueva York en 2015 se encontró que tanto los niveles de BC como de PM en el metro subterráneo de la ciudad de eran considerablemente más altos que los



niveles ambientales de las calles urbanas. Además, se observó que en las estaciones subterráneas las concentraciones promedio de BC medidas variaban entre 5 y 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en periodos de 1 min. También se observaron picos de BC mayores de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  correspondientes con el paso de un tren con motor diésel. Cuando se midieron las concentraciones dentro del vagón, se encontró que estas eran aproximadamente cuatro veces más pequeñas que las concentraciones en la estación ([Bianca et al., 2021](#)).

En el metro subterráneo de Milán se observó, por una parte, que la medida del BC está muy influenciada por los metales que absorben luz, emitidos por la fricción entre las ruedas motrices y la vía y de sistemas de frenado. Los valores de BC obtenidos fueron altos a pesar de que el tren es completamente eléctrico. Por otra parte, la presencia de BC en el entorno subterráneo también puede verse influenciada por la llegada desde fuentes externas (por ejemplo, emisiones relacionadas con el tráfico y el sector industrial) y que, por lo tanto, se sobreestimen las concentraciones del mismo ([Boniardí et al., 2021](#)).

La distancia con respecto a la locomotora influye en las concentraciones dentro de los trenes diésel. En el estudio de [Helena et al. 2019](#) se analizó la exposición a contaminantes atmosféricos, entre ellos el Black Carbon medido con dos mini-etatómetros MicroAeth AE51, con resolución de 1 min, en la red de Ferrocarriles Estatales Daneses. Se vio una disminución de las concentraciones de BC desde el vagón de pasajeros más próximo a la locomotora a los vagones más distantes. Las mayores concentraciones de BC en trenes diésel se obtuvieron cuando la locomotora estaba en la parte delantera. De forma general, las concentraciones de BC dentro del vagón de pasajeros fueron en promedio superiores a 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ([Helena et al., 2019](#)).

## 2.2. Objetivos del estudio

El objetivo principal de este estudio es evaluar la exposición al BC recibido de los usuarios del transporte público en dos situaciones particulares como son los desplazamientos en autobuses urbanos dentro de la ciudad de Elche y los trayectos en el tren de cercanías entre las ciudades de Elche y Alicante.



### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Localización del estudio

Elche y Alicante son las ciudades en las que se ha llevado a cabo este estudio, situadas ambas en el sur de la Comunidad Valenciana. Elche es la capital de la comarca del Bajo Vinalopó, ubicada a unos 20 km al suroeste de Alicante. Cuenta con una población censada de unos 190.000 habitantes y sus coordenadas geográficas se corresponden con latitud de 38.2655 y longitud de -0.698459. Alicante es la capital de la provincia del mismo nombre de la Comunidad Valenciana y esta situada en la costa mediterránea, concretamente a una latitud de 38.3452 y longitud de -0.481006. Su población es de aproximadamente de 330.000 habitantes.

##### 3.1.1. Características climáticas del área de estudio

El clima en el área de estudio se clasifica como mediterráneo árido, de inviernos suaves y veranos muy calurosos y secos. La temperatura media anual en ambos municipios oscila entre los 17 - 18 °C, alcanzando los meses de verano máximas que superan los 36 °C, principalmente debido a los vientos secos de poniente y recalentados por la costa del mediterráneo. En cuanto a la precipitación anual, se encuentra alrededor de 280 mm al año, generalmente en forma de lluvias torrenciales que se encuentran concentradas en primavera y otoño.

##### 3.1.2. Descripción de las rutas de muestreo

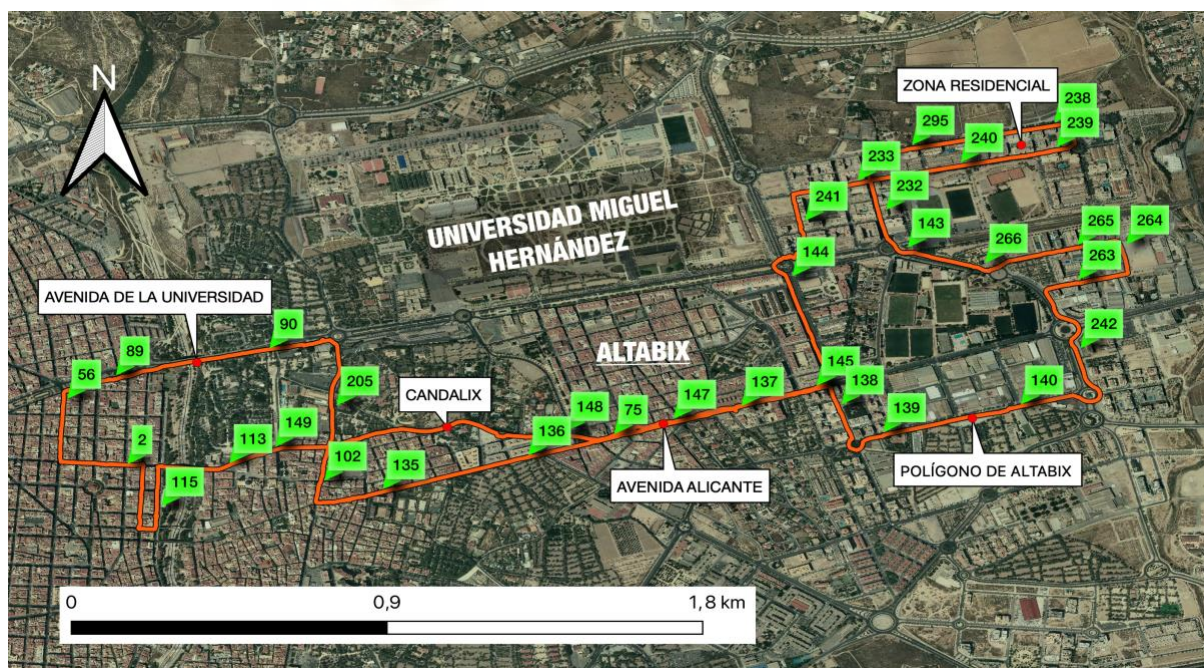


Figura 2: Recorrido de la línea H y localización de las paradas con su correspondiente número en verde.

Para evaluar la exposición al *Black Carbon* de los usuarios de los autobuses urbanos de Elche se seleccionó la línea H, cuyo recorrido se muestra en la [Figura 2](#). Se optó por esta ruta ya que transcurre por zonas muy diferentes de la ciudad, con distintas densidades de tráfico tales como grandes avenidas, zonas de calles estrechas y encajonadas en el centro de Elche, áreas residenciales y zonas con actividades industriales como en el polígono industrial de Altabix.

En cuanto a la posición del asiento dentro del autobús, se ha utilizado el mismo en todos los recorridos, en la parte trasera y al lado de la puerta final ([Figura 3](#)).



Figura 3: Ubicación del asiento del autobús en el que se tomaron las muestras.

En la segunda parte de este estudio se evaluó la exposición al BC de los pasajeros del tren cercanías que conecta Murcia con Alicante. El trayecto, tanto de ida como de vuelta, se realizó desde la parada de Elx Parc, próxima al campus de la Universidad Miguel Hernández (UMH), hasta la terminal de Alicante ([Figura 4](#)). Durante esta ruta, el tren realiza únicamente dos paradas entre ambas estaciones: una en el municipio de Torrellano y la otra en el barrio de San Gabriel, a las afueras de Alicante. Se escogió este trayecto ya que es usado diariamente por muchos alumnos y personal de la UMH.

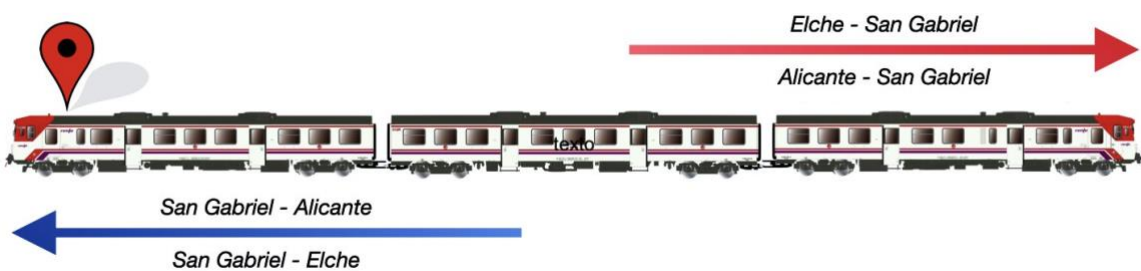
La localización del vagón es importante, ya que en la parada de San Gabriel el tren realiza un cambio de sentido. Esto se debe a que los trenes que cubren este trayecto tienen dos locomotoras, una en cada extremo. De este modo, aunque que no se produzca un cambio de asiento por parte del usuario, sí cambia su posición con respecto a la locomotora. Por ejemplo, en el caso de que un pasajero ocupara inicialmente un asiento en el primer vagón (dirección Alicante), tras la parada realizada en San Gabriel dicho pasajero se encontraría en el último vagón.





**Figura 4:** Línea ferroviaria del tren de cercanías Alicante-Murcia, entre la estación de Elche-Parque y la terminal de Alicante

Es importante señalar que todos los muestreos se realizaron en el mismo vagón, cuya posición respecto a la locomotora cambió en función de la dirección. Así, en dirección Alicante, la ruta se inició siempre en el primer vagón, que pasó a ser el último después de la parada de San Gabriel (*Figura 5*).



**Figura 5:** Dirección del cercanías entre las diferentes paradas y localización del vagón de muestreo.

En la *Tabla 1* se muestra la información de todos los trayectos realizados tanto en autobús como en tren. En total se realizaron 10 viaje en autobús y 6 viajes de ida y vuelta en tren entre Elche y Alicante.

	Dirección	Fecha	Hora	Fecha	Fecha
<b>Autobús Ruta H</b>	Altabix Centro Nuevo Altabix Altabix	14/02/2022	8:25 - 9:10	21/02/2022	7:57 - 8:43
		15/02/2022	8:07 - 8:58	22/02/2022	8:02 - 8:54
		16/02/2022	8:12 - 8:54	23/02/2022	7:57 - 8:46
		09/03/2022	20:26 - 21:01	24/02/2022	7:55 - 8:43
		26/03/2022	7:57 - 8:46	25/02/2022	7:57 - 8:46
<b>Tren cercanías</b>	Elche - Alicante	18/02/2022	16:22 - 16:54	17/03/22	9:14 - 9:39
		08/03/2022	19:05 - 19:40	28/03/2022	19:54 - 20:31
		29/03/2022	19:58 - 20:30	05/04/2022	17:14 - 17:44
	Alicante - Elche	20/02/2022	20:55 - 21:30	13/03/22	21:01 - 21:31
		08/03/2022	19:50 - 20:20	28/03/2022	21:05 - 21:40
		29/03/2022	21:05 - 21:37	25/04/2022	21:02 - 21:38

**Tabla 1:** Fechas, horarios y dirección de los muestreos utilizados en el estudio.

### 3.2. Microetalmómetro AE51

Para la medición de la concentración de *Black Carbon* en tiempo real se ha empleado un etalmómetro microAeth® AE51 (*Figura 6*). Este instrumento portátil (tamaño como el de la palma de una mano) de alta sensibilidad permite medir la concentración de BC en aerosol en intervalos de 30 segundos hasta 5 minutos. El dispositivo es autónomo con bomba integrada, control de flujo, almacenamiento de datos y batería, y está diseñado para el control de la exposición personal a este contaminante. El instrumento puede funcionar continuamente durante un máximo de 24 horas con una sola carga de batería. La muestra de aire se recoge en filtros de fibra de vidrio recubiertos de teflón. El filtro, situado en un soporte adecuado, es fácil de reemplazar para un manejo sencillo en campo. Para el estudio se establecieron los siguientes parámetros: flujo 150 mL/min, y un intervalo de muestreo de 30. Esta selección se produjo debido al compromiso que existe entre la resolución temporal y la necesidad de tener una cantidad de muestras suficiente para obtener las concentraciones de forma inequívoca.



**Figura 6:** Microetalmómetro portátil ModeloAE51 de AethLabs y un filtro muestreado.

Su funcionamiento se basa en la atenuación de un haz de luz (880 nm) que pasa a través de un filtro, el cual recoge continuamente muestra de aerosoles por medio de una bomba. De esta forma, se mide la tasa de cambio en la absorción de luz transmitida a través del filtro. La atenuación de la luz por parte de la muestra depositada sobre el filtro es medida en relación con la medida anterior del filtro, una vez transcurrido el periodo establecido. El caudal se mide por un sensor de flujo másico que también estabiliza la bomba. El microprocesador mide y almacena los datos. Posteriormente, el equipo convierte la medida a concentración en masa de BC expresada en nanogramos por metro cúbico ( $\text{ng/m}^3$ ) utilizando la absorbancia óptica conocida por unidad de masa de BC. Esta última relaciona la absorción de la luz con la concentración de BC.

### 3.3. GPS-Tracker Pro

Se ha empleado la aplicación *GPS-Tracker Pro* para hacer un seguimiento de los recorridos realizados en bus. Esta aplicación nos permite registrar la localización en coordenadas de latitud y longitud. Además, establecimos la configuración para que registrara cada segundo la geolocalización. Una vez iniciada la grabación se puede seguir la ruta en vivo en un mapa. Aparte de registrar la ubicación actual, también registra la velocidad y altitud durante el trayecto. Finalmente, la aplicación permite exportar estos datos en los siguientes formatos: Rastreador GPS Pro, KML, GPX y CSV.

### 3.4. Quantum SIG

Es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre y de código abierto. Se ha empleado en el estudio para realizar mapas de las concentraciones de BC proporcionados por el microetalmómetro en los recorridos de autobús, de tal forma que mediante la georeferenciación de los datos se ha podido hacer una representación de la distribución de las muestras.

### 3.5. Características de los vehículos

#### 3.5.1. *Autobús urbano de elche*

Los recorridos en autobús se realizaron en dos tipos de vehículos. El primero es un autobús modelo New City del Grupo Castrosua, aproximadamente de unos 12 metros de longitud con 24 asientos del modelo Metrópolis y equipado con sistema de aire acondicionado de Hispacold 12 L+. El segundo es un híbrido modelo Urbino 12 hybrid, también de 12 metros, con 3 puertas dobles. En este último vehículo solo se llevó a cabo un recorrido realizado el 14/02/2022.

### *3.5.2. Cercanías Elche - Alicante*

Actualmente, para la línea Alicante - Murcia se sigue utilizando el tren de la Serie 592 de Renfe, que alcanzan una velocidad de 120 km/h. Cada coche dispone de dos puertas a cada lado, dividiendo el interior en 3 salas de viajeros. La disposición de asientos es de pasillo central, con dos asientos a cada lado, con una capacidad de unos 200 pasajeros. Los asientos habituales de la serie son orientables, pudiendo pivotar el respaldo para orientar el asiento en el sentido de la marcha.



## 4. Resultados.

### 4.1. Autobús urbano Elche

El intervalo en el que se realizaron los trayectos en el bus urbano de Elche (8:00 – 8:45) coincide aproximadamente con el horario de comienzo de los institutos de educación secundaria al inicio de la ruta, y el comienzo de la jornada escolar al final del trayecto. Durante estos recorridos se observó como desde el punto de partida el bus se encontraba lleno por los estudiantes que se bajan a las dos paradas siguientes del inicio de la ruta. Tras esto, el bus se permanecía casi completamente vacío la mayoría de la ruta, hasta llegar a la zona residencial, donde se comenzaba nuevamente a llenarse por niños acompañados de sus padres.

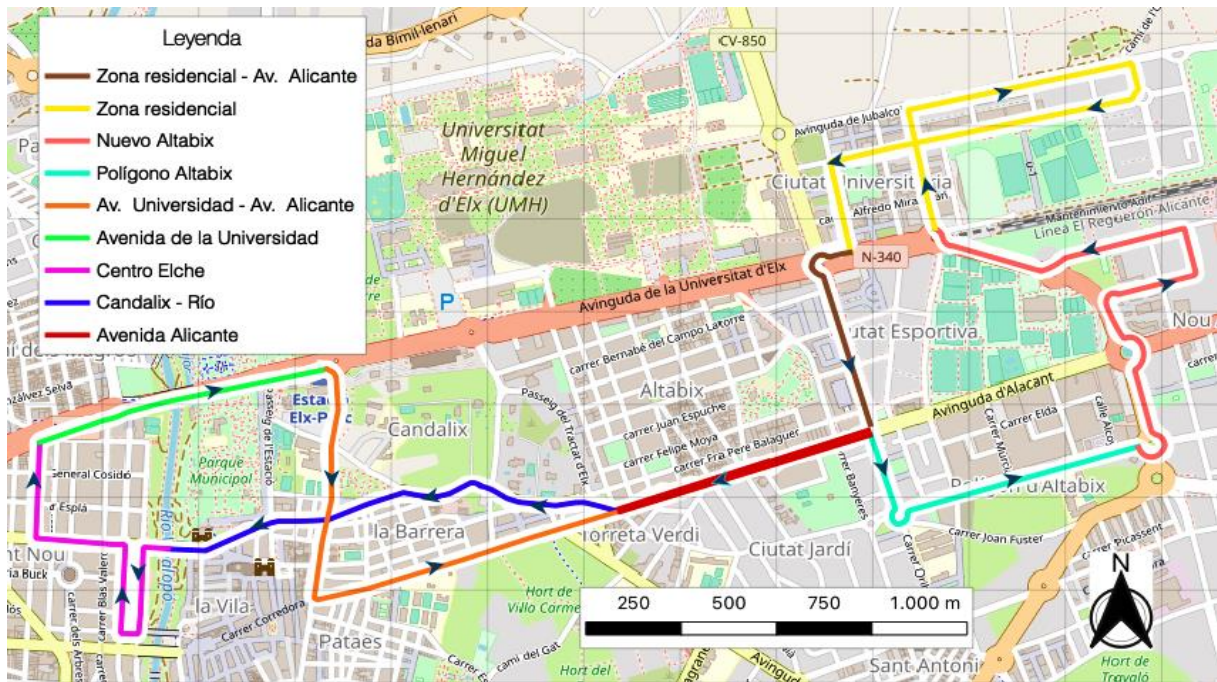
La concentración promedio de BC durante los 10 viajes de unos 45 minutos de duración realizados en este de medio transporte fue de  $2,21 \pm 1,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 7). Sin embargo, en algunos puntos del recorrido se alcanzaron niveles superiores a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Fecha	Hora	N	máx	$\bar{X}$	$\sigma$	Fecha	Hora	N	máx	$\bar{X}$	$\sigma$
14/02/2022	8:25 - 9:10	90,0	7,6	4,9	1,1	21/02/2022	7:57 - 8:43	92,0	7,2	1,7	1,6
15/02/2022	8:07 - 8:58	104,0	4,3	1,8	0,8	22/02/2022	8:02 - 8:54	105,0	8,2	1,6	1,2
16/02/2022	8:12 - 8:54	86,0	5,6	2,1	0,9	23/02/2022	7:57 - 8:46	97,0	6,9	2,1	1,4
09/03/2022	20:26 - 21:01	99,0	7,2	2,3	1,4	24/02/2022	7:55 - 8:43	95,0	4,3	1,5	0,9
26/03/2022	7:57 - 8:46	95,0	2,0	0,9	0,2	25/02/2022	7:57 - 8:46	98,0	11,2	3,2	2,1

Figura 7: Representación de las zonas en las que se ha dividido el recorrido de la línea H del estudio.

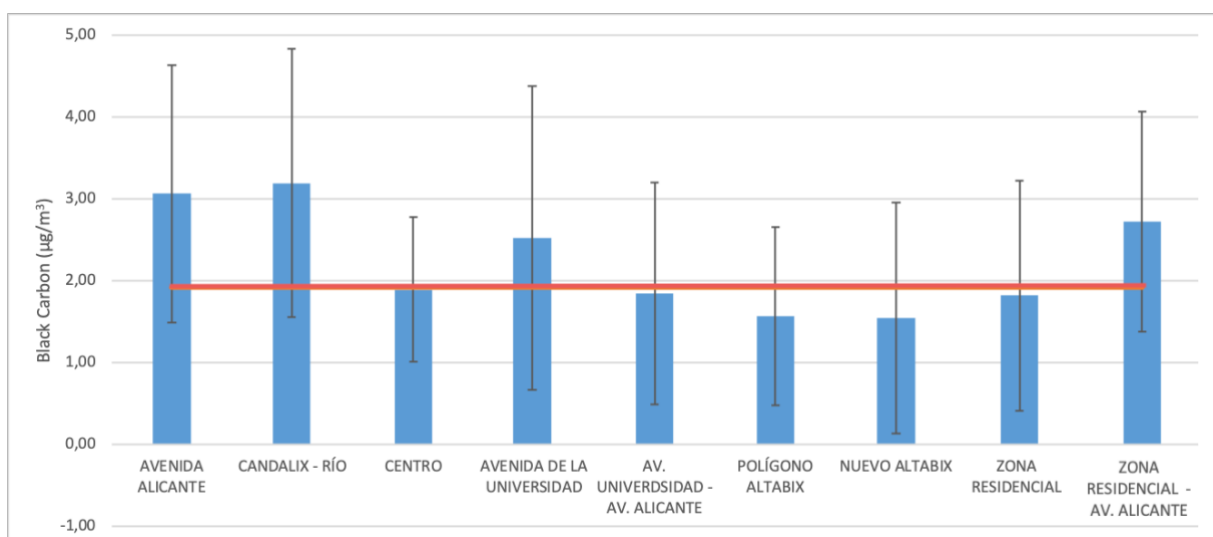
Se dividió el recorrido en zonas para observar el comportamiento de las concentraciones de BC a lo largo del recorrido. Para la fragmentación del recorrido en las diferentes zonas, se siguió un criterio que se basa en la densidad de tráfico, (Figura 8). De tal forma, que se separaron las zonas en las localizaciones donde se concentra el tráfico en horas punta que son las dos Avenidas por las que transcurre el autobús, la Avenida de Alicante y la Avenida de la Universidad. Tras ellos, las zonas restantes se dividieron en dos zonas residenciales (centro de Elche y zona rural) con la intención de poder comparar en estas dos zonas, en las que debería haber menor congestión de tráfico comparado con las avenidas, las diferencias entre una zona más urbana en el centro de Elche y otra zona en las afueras de la ciudad (zona rural). Finalmente, las zonas restantes son de tráfico intermedio y las que conectan las avenidas con las áreas residenciales.





**Figura 8:** Representación de las zonas en las que se ha dividido el recorrido de la línea H del estudio.

De los resultados obtenidos de la división de estas zonas (Figura 9) se excluyeron dos recorridos. En el primer caso, el día 14/02/2022, debido a que se hizo el recorrido con un autobús híbrido, diferente al que se tomaron las demás muestras, y además se obtuvieron medidas excesivamente altas, probablemente debido las circunstancias climáticas. Y el recorrido del 09/03/2022 se excluyó ya que fue el único día que se hizo el recorrido por la tarde-noche, de forma que no se coincide con ninguna hora punta y las concentraciones del BC fueron muy bajas. Esto último indica claramente que la exposición al BC disminuye considerablemente cuando nos alejamos de las horas con mayor densidad de tráfico.



**Figura 9:** Concentración promedio de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en cada una de las zonas durante los recorridos a excepción de los recorridos del día 14/02/2022 y 09/03/2022.



De estos datos podemos deducir que las concentraciones más altas, de forma general, se midieron entre la Avenida de Alicante, en el área de Candalix – Río y en la Zona residencial - Av. de Alicante, coincidentes con el inicio y final del recorrido y con las horas punta de tráfico. Por el contrario, en la zona de Nuevo Altabix, el Polígono de Altabix y la Zona residencial, registraron las concentraciones más bajas (Figura 9).

Con la finalidad de comprobar la validez de los datos, se ha realizado un análisis de la varianza de los promedios de las concentraciones para cada una de las zonas y en los diferentes días.

Para ello se ha realizado una Anova de 2 factores, para corroborar si existen diferencias significativas entre los días en que se toman las medidas y las zonas en las que se ha dividido el recorrido y así comprobar si estos factores influyen o no en las concentraciones.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas (Días)	109,8376035	8	13,72970044	23,6021368	2,27514E-16	2,086757693
Columnas (Zonas)	29,6330784	8	3,7041348	6,36761864	4,66247E-06	2,086757693
Error	37,22971499	64	0,581714297			
Total	176,7003969	80				

**Figura 10:** Resultados Anova con respecto a los días y zonas en que se tomaron las muestras.

Según los resultados del análisis estadístico, si habría diferencias significativas en función del día, así como de la zona dado que la probabilidad es menor de 0,05 tanto para los diferentes días como para las zonas (Figura 10). Por lo tanto, en términos generales, podemos afirmar que a lo largo de los recorridos si hay diferencias entre las zonas y los días.

El recorrido con concentraciones más bajas y que coincide con el de menor tiempo de recorrido, unos 35 minutos solamente, fue el último realizado, correspondiente el recorrido llevado a cabo el 26/03/2022 (Figura 11). La concentración media en este recorrido fue de unos 0,86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un máximo de 2,011  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mientras que en el primer recorrido llevado a cabo el 14/02/2022, se dieron las concentraciones más altas, en promedio de 4,91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un máximo de 7,23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 12).

Con ello, se estudia si hay diferencias significativas entre los días que se realizaron los estudios, concretamente entre semana y los fines, ya que, en términos generales, en finde semana el tráfico es mucho menor en horas punta, al no estar abiertos los centros académicos. Para comprobar si una relación entre la concentración de BC y el día en el que se tomaron las muestras, se realizó un análisis de la varianza entre un día que corresponde a un sábado donde el tráfico es menor (14/02/2022) y un viernes (26/03/2022) (Figura 13).

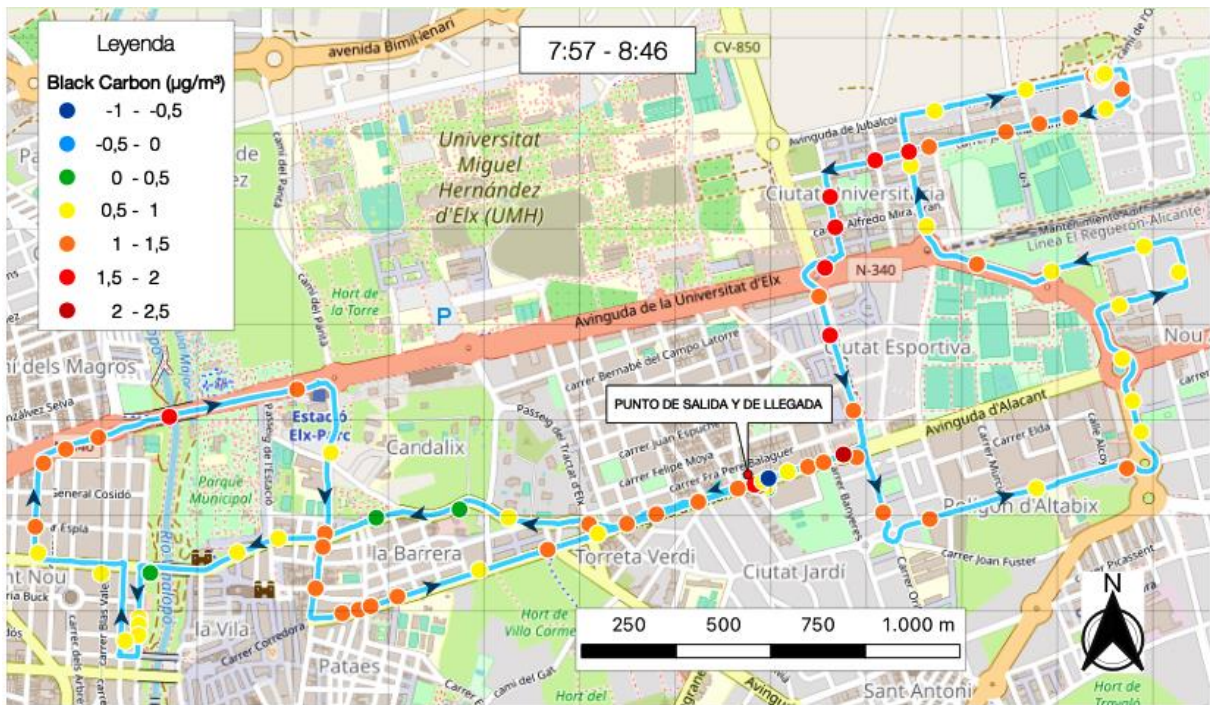
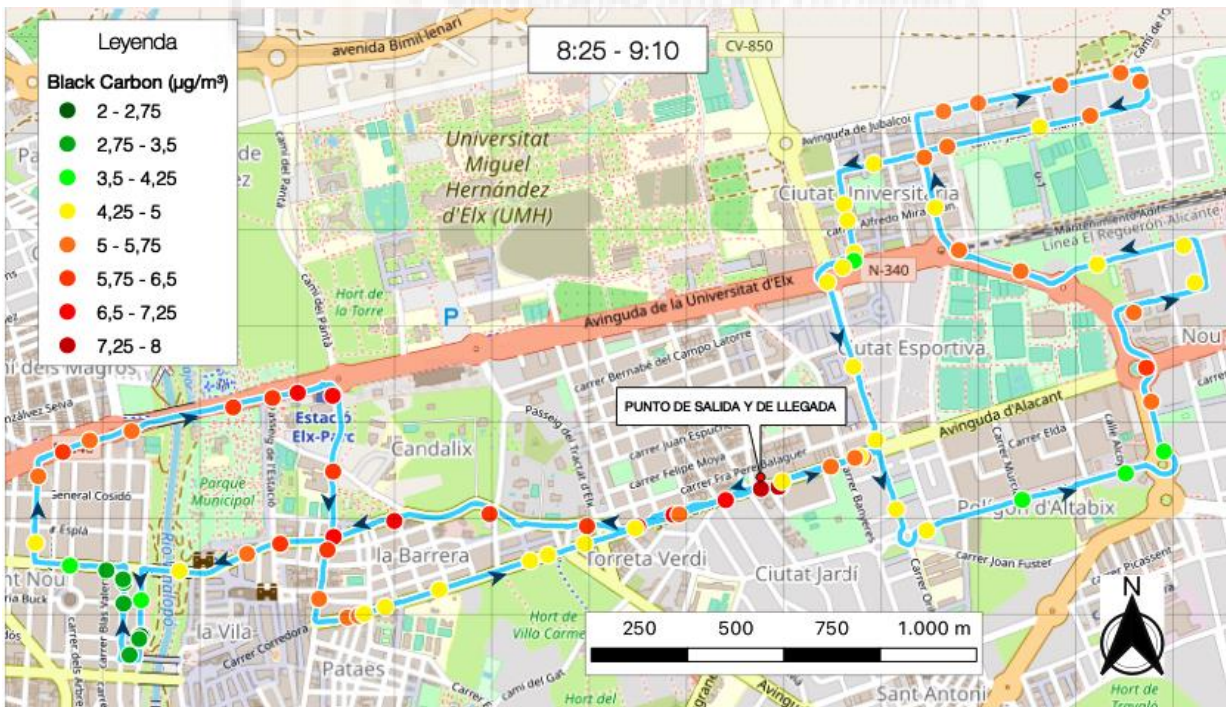


Figura 11: Concentración de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a lo largo de la línea H, autobús urbano de Elche, durante el sábado 26 de marzo de 2022.

Figura 12: Concentración de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a lo largo de la línea H, autobús urbano de Elche, durante el lunes 14



de febrero de 2022.



ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	26,53089205	1	26,53089205	14,4102571	0,00158578	4,493998478
Dentro de los grupos	29,4577862	16	1,841111638			
Total	55,98867826	17				

Figura 13: Resultados Anova con respecto a los días 14/02/2022 y 26/03/2022.

Según los resultados al ser la probabilidad menor de 0,05 podemos confirmar que, si existe una diferencia significativa entre estos días.

A continuación, nos centraremos en recorrido del 23 de febrero de 2022, *Figura 14*. La elección de esta ruta se debe principalmente a que es la más representativa y que se asemeja más al promedio. Observamos que las concentraciones más altas se encuentran en la Avenida de Alicante (punto de partida), como hemos mencionado anteriormente, y van disminuyendo conforme nos dirigimos al oeste por Candalix, dirección centro. Principalmente esta disminución se encuentra relacionada con la densidad del tráfico, como podemos observar con más detalle en la *Figura 15*, tanto a la hora de salida como de llegada es hora punta (8:00 y 8:45) y hay alta densidad de tráfico. Como puede verse en la *Figura 15*, las concentraciones varían entre 6,9 y 3,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  al comienzo del recorrido, mientras que cuando pasamos sobre

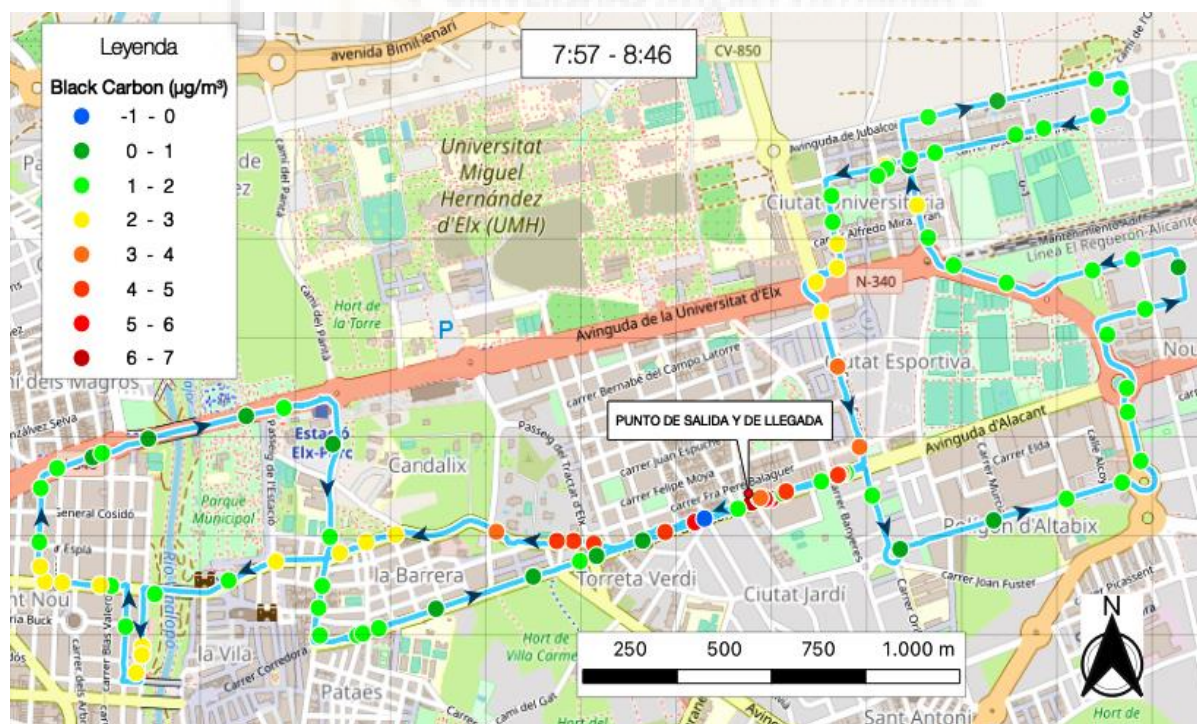
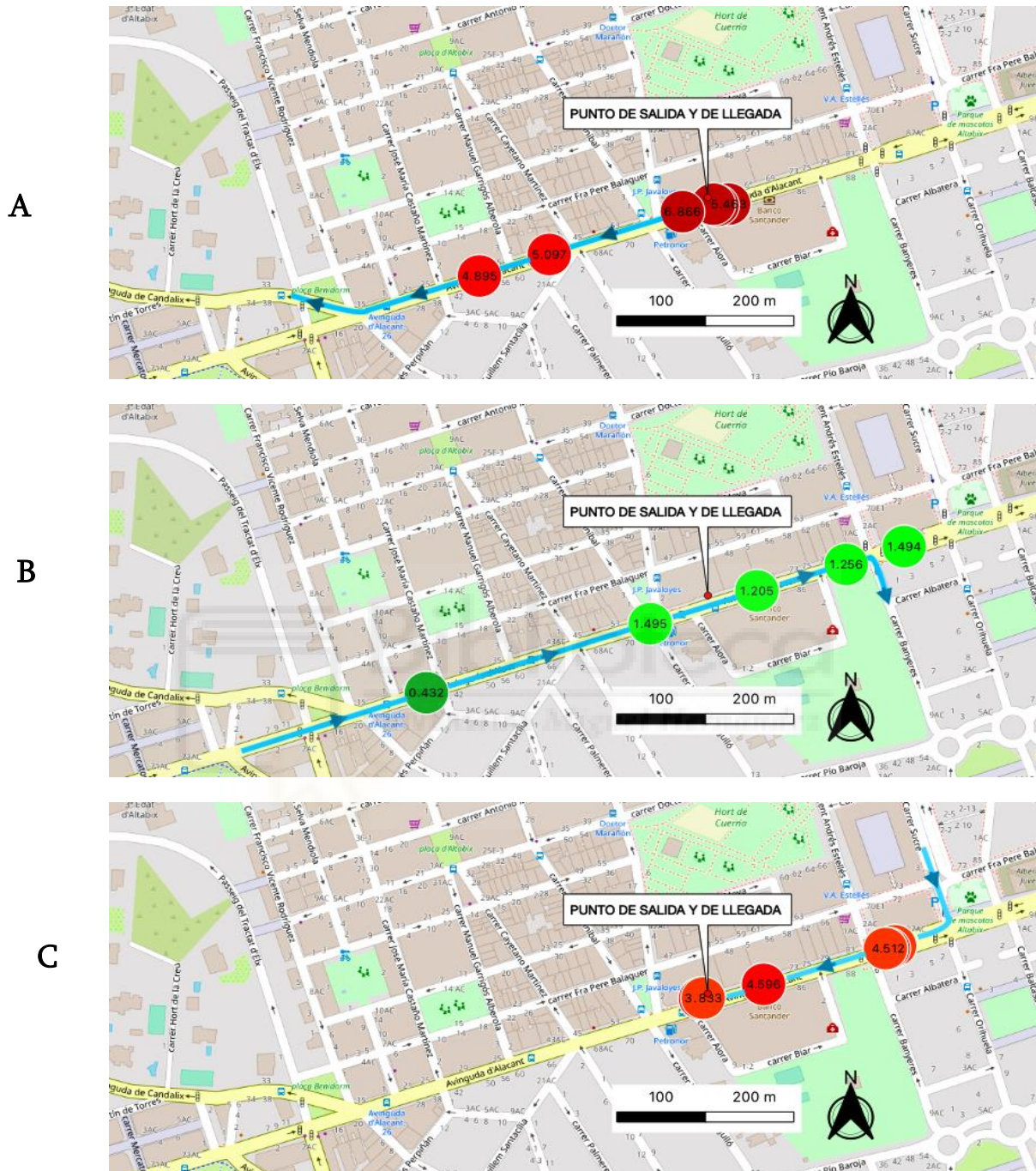


Figura 14: Concentración de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a lo largo de la línea H, autobús urbano de Elche, durante el miércoles 23 de febrero de 2022.

las 8:20 y se reduce en gran medida el tráfico y las concentraciones bajan hasta valores entre 0,5 - 1,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 15:** Concentración de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la Avenida de Alicante, el día miércoles 23/02/2022, en diferentes horas. A: Inicio del recorrido (7:57 - 8:00). B: Mitad del recorrido (8:20 - 8:22). C: Final del recorrido (8:42 - 8:46)

En términos generales, se ha observado que en la ruta H, al inicio es cuando aparecen las mayores concentraciones, lo que se debe principalmente a que es una hora punta de tráfico, lo que está directamente relacionado con este aumento de las concentraciones de BC, al ser la combustión del diésel una de sus principales fuentes contaminantes del BC. Lo podemos



observar con más profundidad, porque a lo largo del recorrido se vuelve a pasar por esta misma avenida a mitad del recorrido sobre las 8:20. Sin embargo, las concentraciones se reducen hasta 4 veces, al igual que se reduce la densidad del tráfico, *Figura 11*.

En las zonas del Polígono de Altabix, Nuevo Altabix y la Zona Residencial, las concentraciones se encuentran por debajo de la media, *Figura 15*. En estas zonas las concentraciones variaron entre 1,5 y 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de BC, mientras en las zonas de las Avenidas cuyas concentraciones promedio son las más altas (Avenida de Alicante – Candalix) son aproximadamente el doble de estas.

Para comprobar si realmente había una diferencia significativa en las concentraciones de BC, entre una zona en la que suele haber mayor congestión de tráfico y zonas en las que no, se realizó un análisis estadístico, entre la zona de la Avenida de Alicante y el polígono de Altabix.

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10,09177878	1	10,09177878	7,46520306	0,014762635	4,493998478
Dentro de los grupos	21,62948003	16	1,351842502			
Total	31,72125882	17				

**Figura 16:** Resultados Anova comparando la zona de Avenida de Alicante con el Polígono de Altabix.

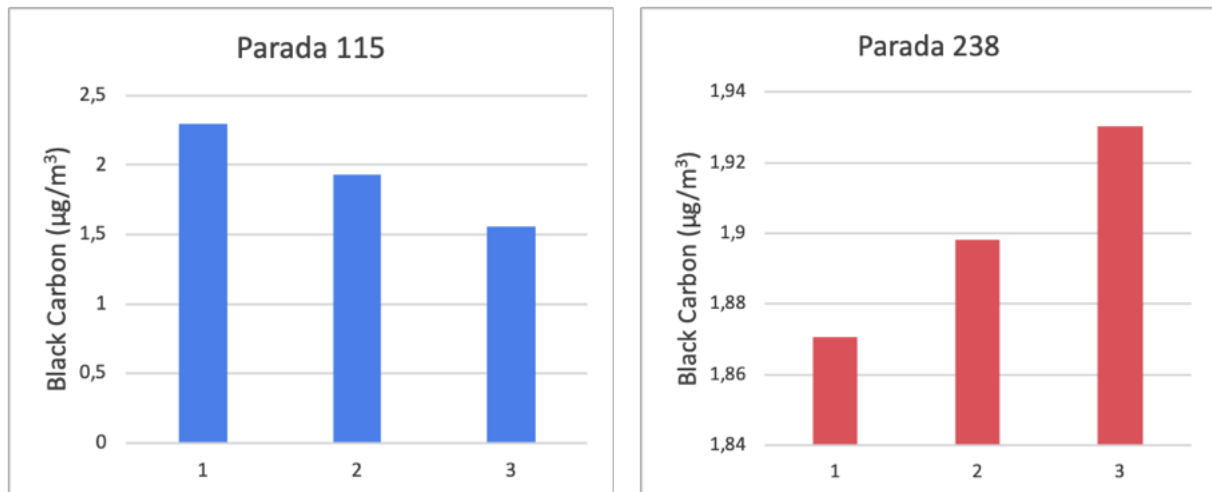
Conforme a lo obtenido de la anova, al ser la probabilidad menor de 0,05 podemos confirmar que, si existe una diferencia significativa entre ambas zonas para los diferentes recorridos, *Figura 16*.

En general, encontramos bajas concentraciones en la zona residencial, con una concentración media de 1,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mientras que en la Avenida de la Universidad y al salir de la zona residencial, donde pasamos por una rotonda de la Avenida de la Universidad, encontramos concentraciones altas por encima del promedio, entre 2,52 y 2,72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , *Figura 14*.

Sin embargo, en el centro de Elche, una vez pasado el río, las concentraciones fueron en promedio de 1,89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dependientes en gran medida del tráfico en dicho momento, para cada recorrido.

También se estudió como influía el tiempo que permanecían con las puertas abiertas en las paradas con la concentración de BC. Para ello se seleccionaron 2 paradas, en las cuales el tiempo de espera con las puertas abiertas fue superior o igual a 30 segundos, ya que es la resolución del equipo entre muestra y muestra. De esta forma se seleccionaron; la parada 115, situada en el centro, donde las paradas duraron en promedio 2 minutos; y la parada 238

ubicada en zona residencial cuyas paradas duraron aproximadamente 1 minutos. En ambos casos solo se tuvieron en cuenta las paradas de duración superior a un minuto.



**Figura 17:** Concentración de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en dos paradas de la ruta H.

1: Un minuto antes de la parada 2: Parada con las puertas abiertas 3: Un minuto después de la parada.

En la parada 115, podemos observar como la concentración disminuye, mientras que en la parada 238 sucede el efecto contrario, observar [Figura 17](#). La relación entre las concentraciones de BC cada parada del bus, tiene que deberse a la concentración que hay en dicho momento en el exterior del autobús. De tal manera que en la parada 115, la concentración disminuye debido a que la concentración dentro del bus es mayor a la presente en el ambiente, de forma que al abrir las puertas se ventila el interior del bus. Por la otra parte, el efecto contrario ocurriría en la parada 238, donde la concentración fuera del bus es mayor que la presente dentro por lo que al abrirse las puertas se acondicionan las concentraciones a las del ambiente

En la mayoría de los recorridos, el autobús fue el mismo, modelo New City del Grupo Castrosua, con motor diésel. Sin embargo, el Recorrido 1 ([Figura 12](#)) se llevó a cabo en uno de los nuevos híbridos modelo Urbino 12 hybrid, y podemos ver que a pesar de este hecho, se midieron las concentraciones más altas de todos los recorridos. Esto debe estar asociado a una situación de inversión térmica, ya que en las pruebas previas al estudio se realizó un pequeño recorrido en este mismo bus y no se dieron estas altas concentraciones por lo que no existe una relación directa entre el tipo de motor utilizado por el autobús y las concentraciones de BC obtenidas dentro y si hay una relación entre los valores de BC dentro y fuera. Estos valores, además, aumentan mucho durante episodios de acumulación, donde la dispersión de los contaminantes se ve muy limitada.

## 4.2. Cercanías Elche - Alicante

En el caso del tren cercanías, la duración promedio de la ruta es de unos 33 minutos y la concentración media dentro del cercanías fue de  $16,85 \pm 12,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, encontramos picos de concentraciones muy elevados, alcanzándose valores de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Durante los recorridos entre Elche y Alicante, vemos que las concentraciones de BC son más del doble que en los recorridos entre Alicante y Elche (*Tabla 2*).

	Elche - Alicante							Alicante - Elche						
	18/02	08/03	17/03	28/03	29/03	06/05	$\bar{x}$	20/02	08/03	13/03	28/03	29/03	25/04	$\bar{x}$
Estación Elche	29,49	20,73	8,43	76,98	54,23	13,77	33,94	15,95	21,24	5,59	45,97	52,80	11,18	25,45
Estación Elche subterráneo	46,29	19,83	9,88	106,42	44,54	24,87	41,97	17,81	29,28	9,06	55,22	54,24	14,79	30,07
Túnel Elche	45,62	20,01	22,24	90,49	51,05	35,88	44,22	3,14	34,45	19,85	13,87	9,12	9,68	15,02
Parada Torrellano	22,84	3,24	3,68	35,25	12,11	16,44	15,59	1,23	4,90	9,99	1,86	1,57	3,83	3,90
Parada San Gabriel	10,64	0,72	0,37	28,41	4,47	8,06	8,78	9,63	5,49	2,99	36,82	4,47	4,85	10,71
Túnel Alicante	3,90	27,93	0,00	2,99	2,54	0,32	5,99	21,90	5,25	6,75	29,24	13,12	3,82	13,35
Recorrido Genral	32,54	10,21	7,98	47,47	19,59	22,83	23,44	9,56	12,99	9,33	19,31	5,70	4,70	10,26

**Tabla 2:** Concentraciones de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en distintos puntos del recorrido.

Las concentraciones en la estación subterránea de Elche son considerablemente más altas, llegando a superar 20 veces a los niveles ambientales obtenidos en el recorrido entre la universidad y la estación. En las estaciones subterráneas de la ciudad de Nueva York, las concentraciones medias de BC en tiempo real variaron de 5 a  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Bianca et al., 2021), mientras que en nuestro caso varían entre 8 y  $47,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En Nueva York aparecieron picos promedio 1 min mayores de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cuando paso un tren de motor diésel (Bianca et al., 2021), en la estación de Elche los picos promedio de 30 segundo fueron mayores de  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo por lo tanto muy superiores.

Las concentraciones más altas de todo el recorrido se encuentran dentro de la estación de Elche, en la primera planta, la concentración media se encuentra entre  $29,7 \pm 22,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mientras que en la parte que se encuentra en el subsuelo de la estación, es decir, en los andenes, las concentraciones se incrementan en gran medida, con un valor promedio de  $36,0 \pm 27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Por su parte, en la estación de Alicante, la cual se encuentra abierta, las concentraciones son aproximadamente de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En *Figura 18* y *Figura 19*, también podemos ver como al pasar por los túneles antes de entrar en ambas estaciones, se incrementan las concentraciones de Black Carbon debido a la acumulación del penacho de humo del tren al pasar a través de ellos.

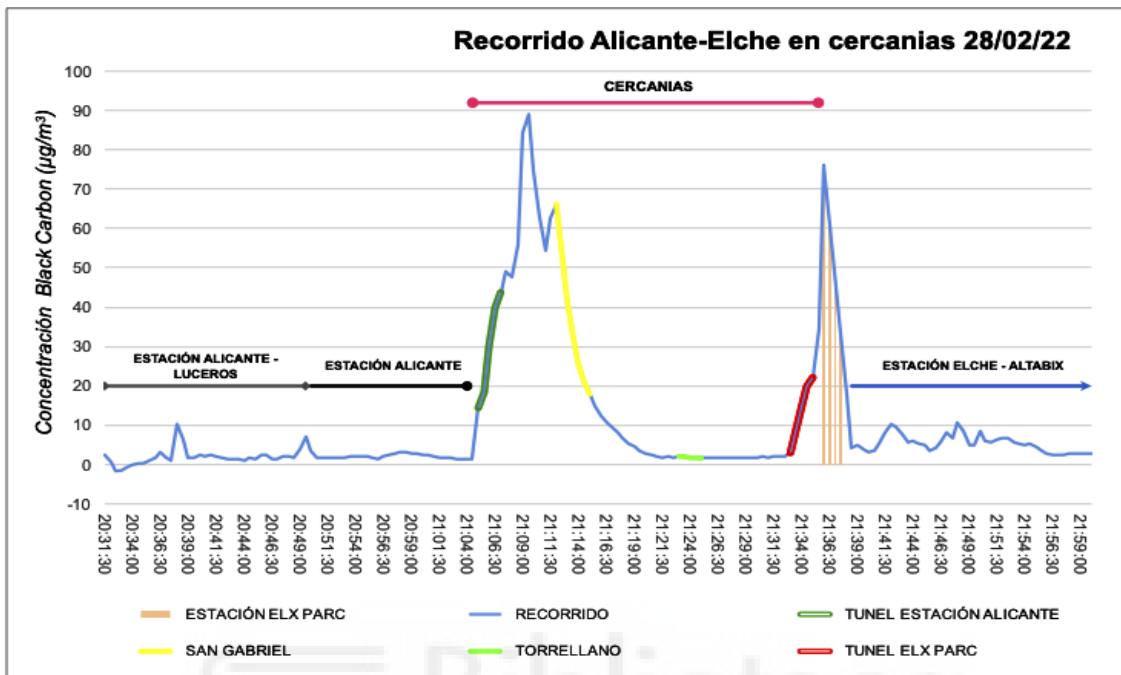


Figura 18: Concentración de BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) del Recorrido realizado el 28 de febrero de 2022, en dirección Elche - Alicante.

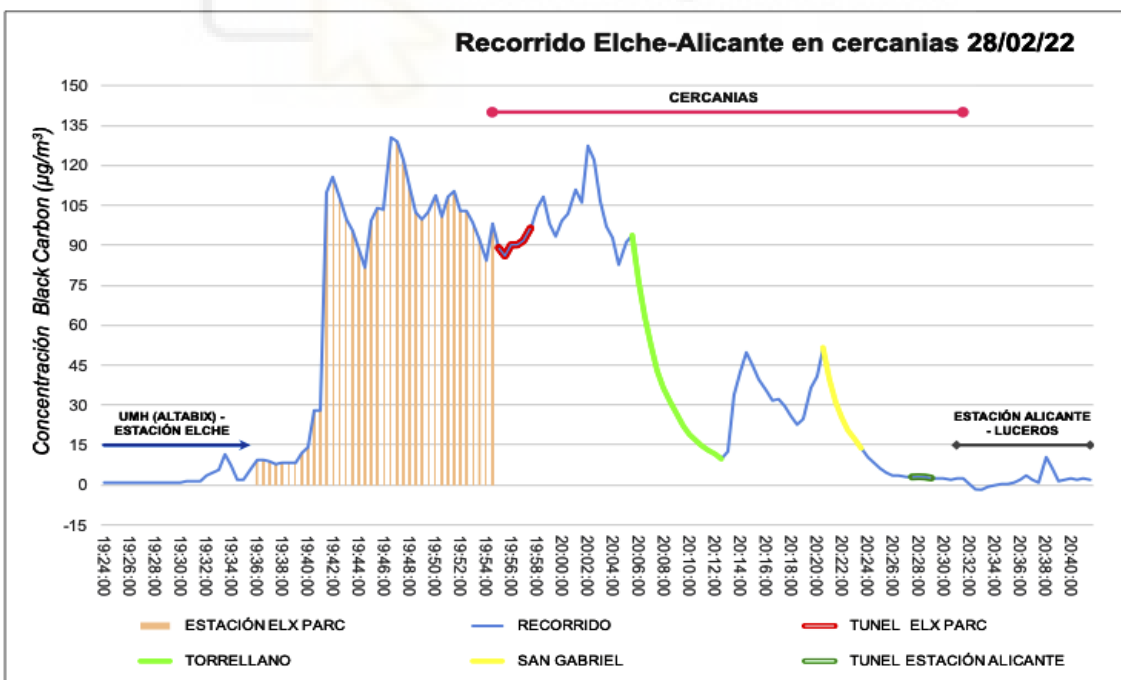
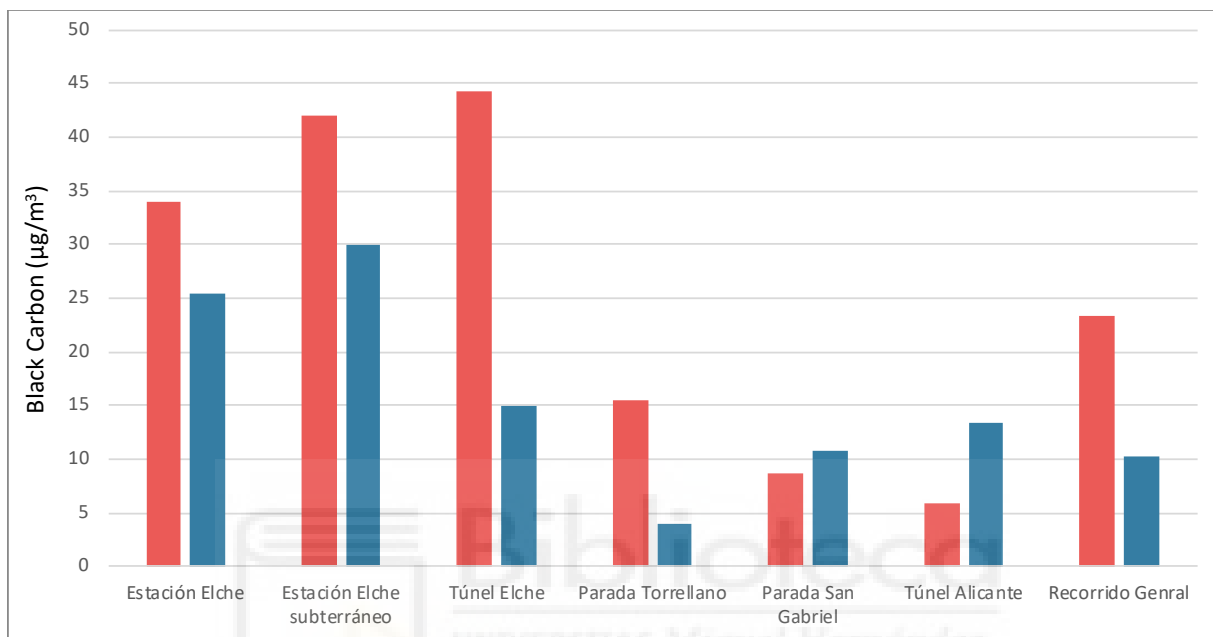


Figura 19: Concentración de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) del Recorrido realizado el 28 de febrero de 2022, en dirección Alicante - Elche.



Podemos observar, cómo las concentraciones disminuyen en las dos paradas Torrellano y San Gabriel, aunque en el caso de la vuelta de Alicante a Elche, *Figura 19*, las concentraciones en la estación de Torrellano son tan bajas que ni se observa el cambio.

Para analizar en más profundidad se separaron las concentraciones en diferentes unidades según la localización en dicho momento (*Figura 20*).



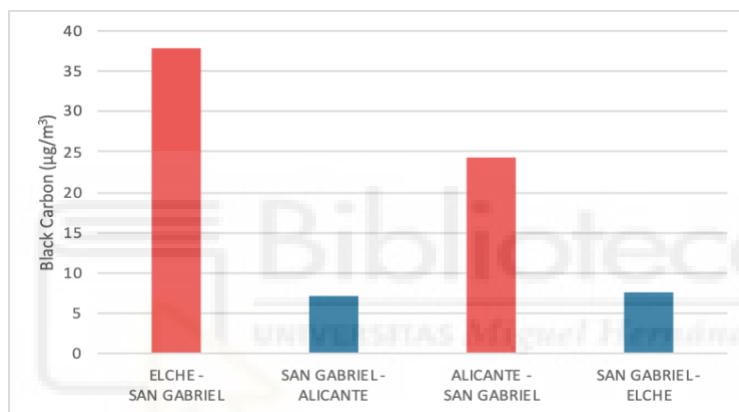
**Figura 20:** Concentraciones promedio de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en las distintas zonas del recorrido en cercanías, diferencia el sentido de la Marcha. **Rojo:** Elche – Alicante y **Azul:** Alicante - Elche

Tanto para ir a la Estación de Elche como para volver al barrio de Altabix se tomaron muestras a pie de las concentraciones de BC, al igual que se hizo en la Estación de Alicante donde se tomaron muestras desde la estación hasta la plaza de los Luceros y vuelta a la estación. Los resultados mostraron concentraciones muy bajas, sobre todo comparadas con las concentraciones a las que nos encontramos expuestos en el tren. En general, la concentración promedio a la que se encuentra expuesto el peatón es de  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con picos de unos  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos valores se obtuvieron principalmente en los semáforos debido a la proximidad al tráfico y por tanto alas emisiones d ellos tubos de escape.

La mejora del sistema de ventilación, el rediseño de la estación, la limpieza periódica y el mantenimiento adecuado deben realizarse en dichas estaciones para mejorar la calidad del aire interior del sistema ferroviario y prevenir riesgos para la salud de los trabajadores y viajeros usuarios del mismo. La mejora en el diseño del cercanías para aumentar la ventilación, la aplicación de materiales y tecnologías, la instalación de puertas que aislen andenes, la limpieza regular del ambiente interior de las estaciones de metro puede ayudar a mejorar el

aire interior. Finalmente, la sustitución de la locomotora por una eléctrica redundaría enormemente en la reducción de emisiones de este contaminante y por lo tanto en la salud de los viajeros.

En el estudio observamos que ocurre al contrario que en los Ferrocarriles Estatales Daneses (Helena et al., 2019), ya que vemos como la concentración aumenta en los vagones finales, mientras que cuando nos encontramos en el primer vagón las concentraciones son más bajas, (Figura 21). Las concentraciones en promedio cuando el primer vagón es  $7,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mientras que cuando es el último es de  $31,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , es decir, las concentraciones cuando nos encontramos en el último vagón son más de 4 veces más altas que en el primer vagón. Esto se podría deber principalmente a la posición de la chimenea y la filtración de los contaminantes por los sistemas de ventilación.



**Figura 21:** Concentración promedio de Black Carbon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante los recorridos en cercanías, representando en color rojo la posición en el último vagón y con color azul la posición en el primer vagón con respecto a la locomotora.

## 5. Conclusiones y proyección futura.

### 5.1. Conclusiones

- Dentro del autobús urbano de Elche, la concentración de Black Carbon a la que nos encontramos expuestos se encuentra entre  $2,21 \pm 1,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- La densidad de tráfico influye directamente sobre la concentración de Black Carbon, lo que se puede ver en las Avenidas del recorrido y en horas puntas de tráfico.
- El día también influye en las concentraciones de exposición a Black Carbon, ya que vemos que el día al que menos exposición de Black Carbon se dio en sábado, cuando la densidad de tráfico se reduce.
- Los tiempos de paradas con las puertas abiertas pueden influir en la exposición a Black Carbon de los pasajeros dependiendo de la relación que haya entre las concentraciones dentro y fuera del autobús.
- En el otro medio de transporte estudiado, tren cercanías, la exposición a Black Carbon en el trayecto fue de  $16,85 \pm 12,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esta es mucho más elevada que en el autobús urbano.
- El tipo de estación influye en la exposición a BC, de forma que las concentraciones más altas del recorrido se dan en la Estación de Elche que es 30 superior a las obtenidas en la Estación de Alicante, la cual se encuentra abierta.
- En las paradas del recorrido podemos observar un claro descenso de las concentraciones de Black Carbon que parece estar relacionado con la situación de la dirección del tren y la localización de vagón.
- Es indispensable el cambio de locomotoras de gasoil por equivalentes eléctricas para reducir la exposición de los viajeros/trabajadores en estaciones subterráneas.

### 5.2. Proyección futura

Con el fin de contemplar los resultados de este estudio y ampliar así el conocimiento sobre la contaminación atmosférica por *Black Carbon* en diferentes medios de transporte otras líneas de investigación posibles incluyen:

- Estudiar otros medios de transporte como vehículos privados.
- Realizar recogida de muestras en filtros para su posterior análisis.
- Realización de medidas de BC en paralelo con medidas de aerosoles (GRIMM).

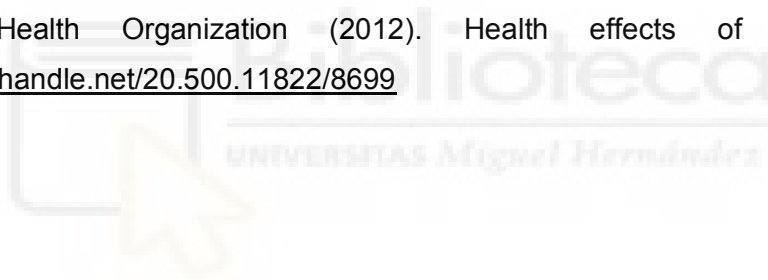
## 6. Bibliografía.

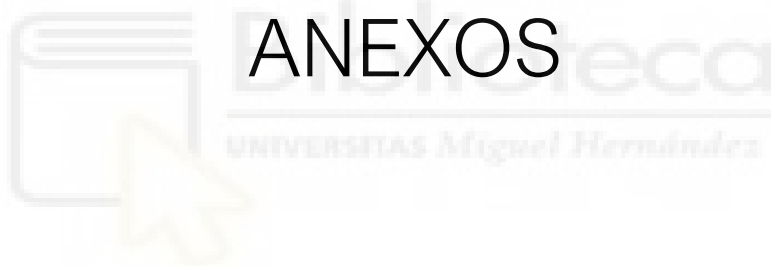
- Andersen M.H. G, Johannesson S, Fonseca A.S, Clausen P.A, Saber A.T, Roursgaard M, Loeschner K, Koponen I.K, Loft S, Vogel U, Møller P. (2019). Exposure to Air Pollution inside Electric and Diesel-Powered Passenger Trains. *Environmental Science & Technology*, 53 (8), 4579-4587. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06980>
- Bellouin N, Quaas J, Gryspeerdt E, Kinne S, Stier P, Watson-Parris D, Boucher O, Carslaw KS, Christensen M, Daniau AL, Dufresne JL, Feingold G, Fiedler S, Forster P, Gettelman A, Haywood JM, Lohmann U, Malavelle F, Mauritsen T, McCoy DT, Myhre G, Mülmenstädt J, Neubauer D, Possner A, Rugenstein M, Sato Y, Schulz M, Schwartz SE, Sourdeval O, Storelvmo T, Toll V, Winker D, Stevens B. (2020). Bounding Global Aerosol Radiative Forcing of Climate Change. *Reviews of Geophysics*, 58. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019rg000660>
- Bianca D. Lima, Elba C. Teixeira, James C. Hower, Matheus S. Civeira, Omar Ramírez, Cheng-Xue Yang, Marcos L.S. Oliveira, Luis F.O. Silva. (2021). Metal-enriched nanoparticles and black carbon: A perspective from the Brazil railway system air pollution. *Geoscience Frontiers*, Volume 12, Issue 3, 101129, ISSN 1674-9871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.010>
- Boniardi L, Borghi F, Straccini S, Fanti G, Campagnolo D, Campo L, Olgiati L, Lioi S, Cattaneo A, Spinazzè A, Maria Cavallo D, Fustinoni S (2021). Commuting by car, public transport, and bike: Exposure assessment and estimation of the inhaled dose of multiple airborne pollutants. *Atmospheric Environment*, Volume 262, 118613, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118613>
- Bonvalot L, Tuna T, Fagault Y, Sylvestre A, Mesbah B, Wortham H, Jaffrezo J.L, Marchand N, Bard E. (2019). Source apportionment of carbonaceous aerosols in the vicinity of a Mediterranean industrial harbor: A coupled approach based on radiocarbon and molecular tracers. *Atmospheric Environment* 2012, 250–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.008>
- Briggs N.L, Long C.M. (2016). Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States. *Atmospheric Environment*, Volume 144, Pages 409-427, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.002>
- Brimblecombe P, Grossi C.M. (2005). Aesthetic thresholds and blackening of stone buildings. *Science of The Total Environment*, Volume 349, Issues 1–3, 2005, Pages 175-189, ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.009>

- Cheng Y, Liao C, Liu Z, Tsai C, Hsi H. (2014). A size-segregation method for monitoring the diurnal characteristics of atmospheric black carbon size distribution at urban traffic sites. *Atmospheric Environment*, Volume 90, Pages 78-86, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.023>
- Davidson C, Phalen R, Solomon P. (2005) Airborne Particulate Matter and Human Health: A Review. *Aerosol Science and Technology*, 39:8, 737-749. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786820500191348>
- Dons E, Panis L.I, Poppel M.V, Theunis J, Wets G. (2012) Personal exposure to Black Carbon in transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, Volume 55, Pages 392-398, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.020>
- EC, 2021. Calidad del aire en Europa - Informe 2020, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>, consultado el 03.09.2022
- Fuzzi S, Baltensperger U, Carslaw K, Decesari S, Denier Van Der Gon H, Facchini M.C, Fowler D, Koren I, Langford B, Lohmann U, Nemitz E, Pandis S, Riipinen I, Rudich Y, Schaap M, Slowik J.G, Spracklen D.V, Vignati E, Wild M, Williams M, Gilardoni S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 8217-8299. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>
- Gallego Picó A. (2012). Contaminación atmosférica (1.). UNED.
- Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International* 29, 213–239. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Groma V, Aföldi B, Börcsök E, Czömpöly O, Fűri P, Kéri A.H, Kovács G, Török S, Osán J. (2022). Sources and health effects of fine and ultrafine aerosol particles in an urban environment. *Atmospheric Pollution Research* 13, 101302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101302>
- Harrison R.M, Allan J, Carruthers D, Heal M.R., Lewis A.C, Marnner B, Murrells T, Williams A. (2021). Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review. *Atmospheric Environment* 62, 118592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118592>
- Horemans B, Cardell C, Bencs L, Kontozova-Deutsch V, De Wael K, Van GriekenR. (2011). Evaluation of airborne particles at the Alhambra monument in Granada, Spain. *Microchemical Journal*, Volume 99, 2011, Pages 429-438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.06.018>

- Jafar H.A, Harrison R. M. (2021). Spatial and temporal trends in carbonaceous aerosols in the United Kingdom. *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 295–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.009>
- Kim C, Jun Kim K, Lee J. (2019). Assessment of black carbon concentration as a potential measure of air quality at multi-purpose facilities. *Journal of Aerosol Science*, Volume 138, 105450, ISSN 0021-8502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105450>
- Morales Betancourt R, Galvis B, Balachandran S, Ramos-Bonilla J.P, Sarmiento O.L, Gallo-Murcia S.M, Contreras Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmospheric Environment*, Volume 157, Pages 135-145, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.006>
- Moreno T, Reche C, Rivas I, Minguillón M.C, Martins V, Vargas C, Buonanno G, Parga J, Pandolfi M, Brines M, Ealo M, Fonseca A.S, Amato F, Sosa G, Capdevila M, de Miguel E, Querol Q, Gibbons W. (2015). Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environmental Research*, Volume 142, Pages 495-510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.022>
- Morera-Gómez, Y. "Chemical composition and sources of particulate matter across urban and rural sites in the Caribbean region of Cienfuegos (Cuba)". Santamaría, J.M., Elustondo, D. y Alonso, C.M. Tesis doctoral. Universidad de Navarra, 2018.
- Onat B, Şahin ÜA, Uzun B, Akın Ö, Özkaya F, Ayvaz C. (2019). Determinants of exposure to ultrafine particulate matter, black carbon, and PM<sub>2.5</sub> in common travel modes in Istanbul. *Atmospheric Environment*, Volume 206, Pages 258-270, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.015>
- Pant P, Harrison R.M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements. A review. *Atmospheric Environment* 77, 78-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>
- Patrón D, Lyamani H, Titos G, Casquero-Vera JA, Cardell C, Močnik G, Alados-Arboledas L, Olmo F.J. (2017). Monumental heritage exposure to urban black carbon pollution. *Atmospheric Environment*, Volume 170, Pages 22-32, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.030>
- Piscitello A, Bianco C, Casasso A, Sethi R, (2021). Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of the Total Environment* 766, 144440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>

- Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, de la Rosa J. (2007). Atmospheric particulate matter and air quality in the Mediterranean: a review. *Environ Chem Lett* 5, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-006-0071-0>
- Smithson P.A. (2002). IPCC, 2001: climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK. *Int. J. Climatol.* 22, 1144-1144. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.763>
- Velasco E, Retama A, Segovia E, Ramos R(2019). Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmospheric Environment*, Volume 219, 117044, ISSN 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117044>
- Viana M, Pey J, Querol X, Alastuey A, de Leeuw F, Lükewille A. (2014). Natural sources of atmospheric aerosols influencing air quality across Europe. *Science of the Total Environment* 472, 825–833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.140>
- World Health Organization (2012). Health effects of black carbon. <http://hdl.handle.net/20.500.11822/8699>





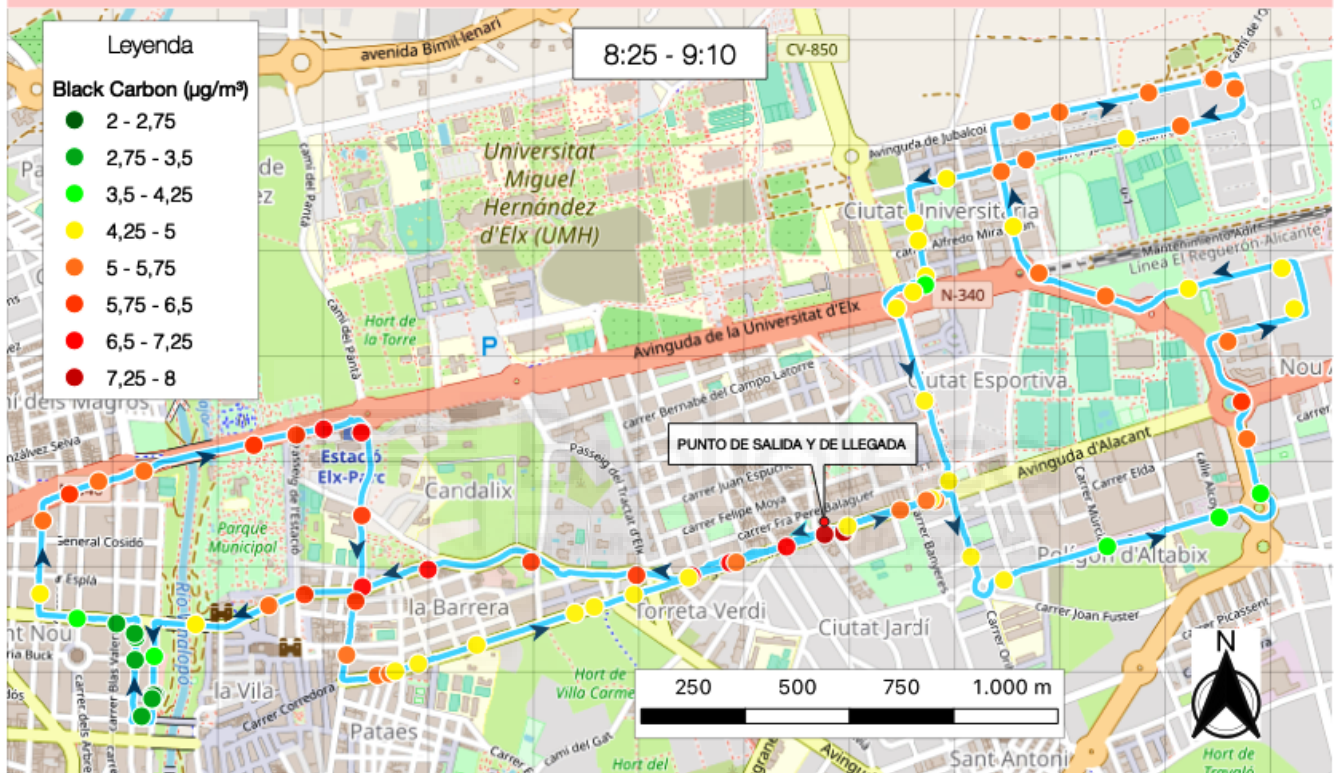
# ANEXOS



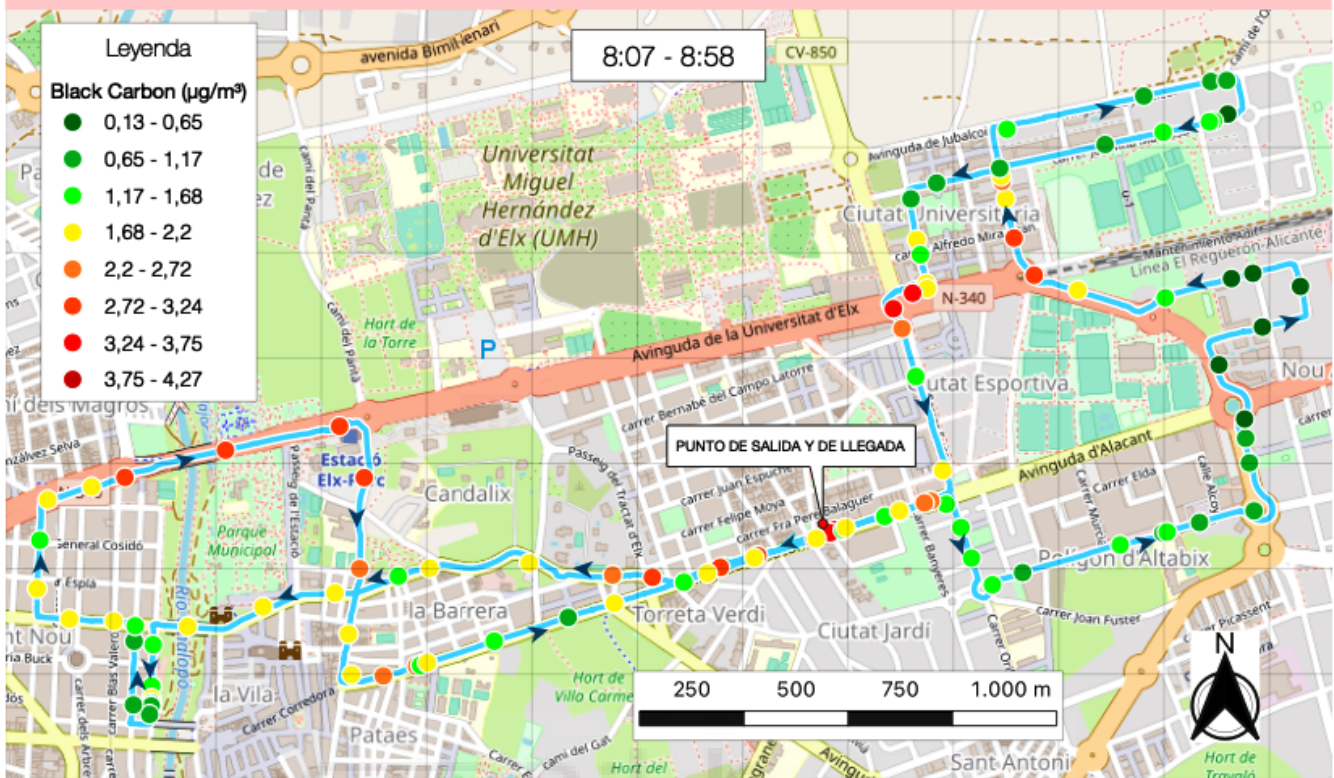
# ÍNDICE

1. Autobús: Ruta H.....	3
1. Recorrido 1 - 14/02/2022.....	3
2. Recorrido 2 - 15/02/2022.....	4
3. Recorrido 3 - 16/02/2022.....	4
4. Recorrido 4 - 21/02/2022.....	5
5. Recorrido 5 - 22/02/2022.....	6
6. Recorrido 6 - 23/02/2022.....	7
7. Recorrido 7 - 24/02/2022.....	8
8. Recorrido 8 - 25/02/2022.....	9
9. Recorrido 9 - 09/03/2022.....	10
10. Recorrido 10 - 26/03/2022.....	10
2. Tren: Cercanías.....	11
1. Recorrido - 18/02/2022.....	11
2. Recorrido - 20/02/2022.....	11
3. Recorrido - 28/02/2022.....	12
4. Recorrido - 29/02/2022.....	13
5. Recorrido - 08/03/2022.....	14
6. Recorrido - 13/03/2022.....	15
7. Recorrido - 17/03/2022.....	15
8. Recorrido - 05/04/2022.....	16
9. Recorrido - 25/04/2022.....	16

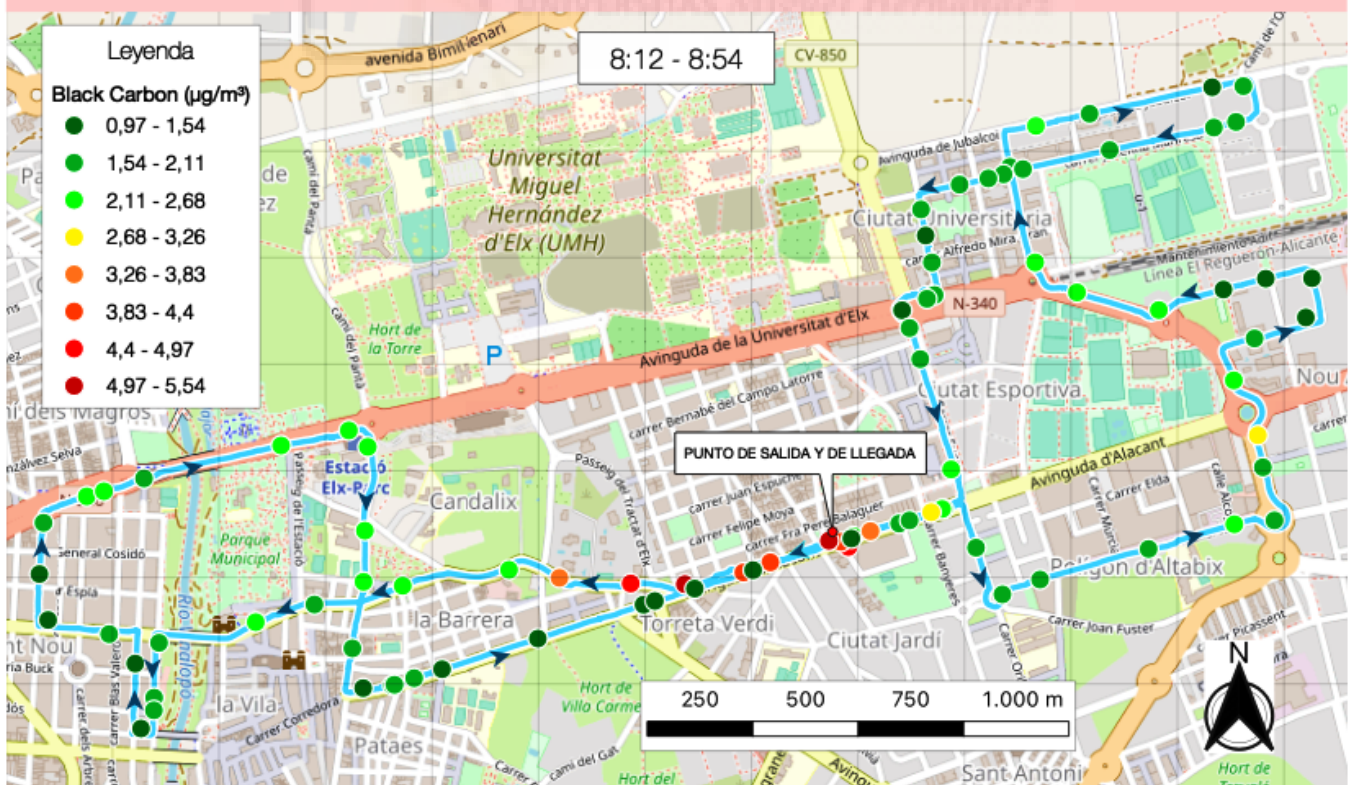
# Recorrido 1 - Ruta H - 14/02/2022



## Recorrido 2 - Ruta H - 15/02/2022

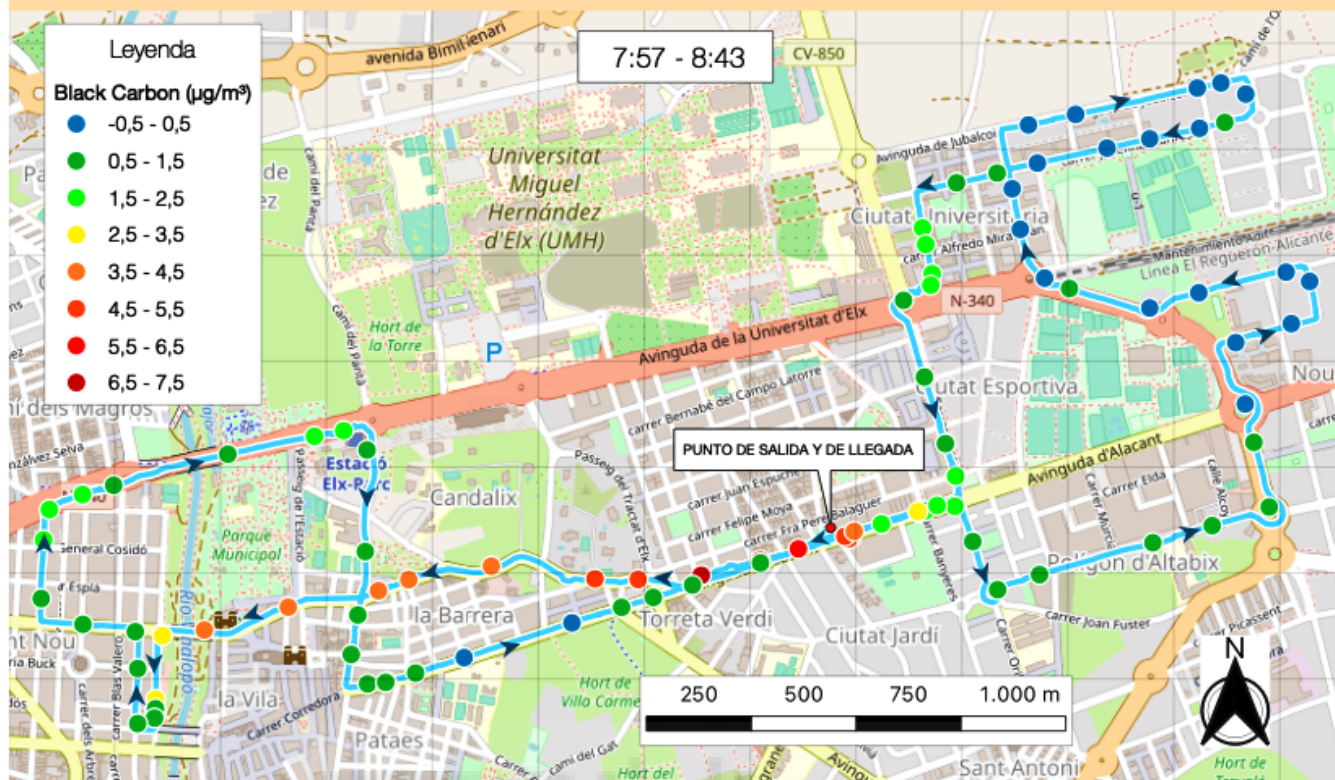


## Recorrido 3 - Ruta H - 16/02/2022





# Recorrido 4 - Ruta H - 21/02/2022



A



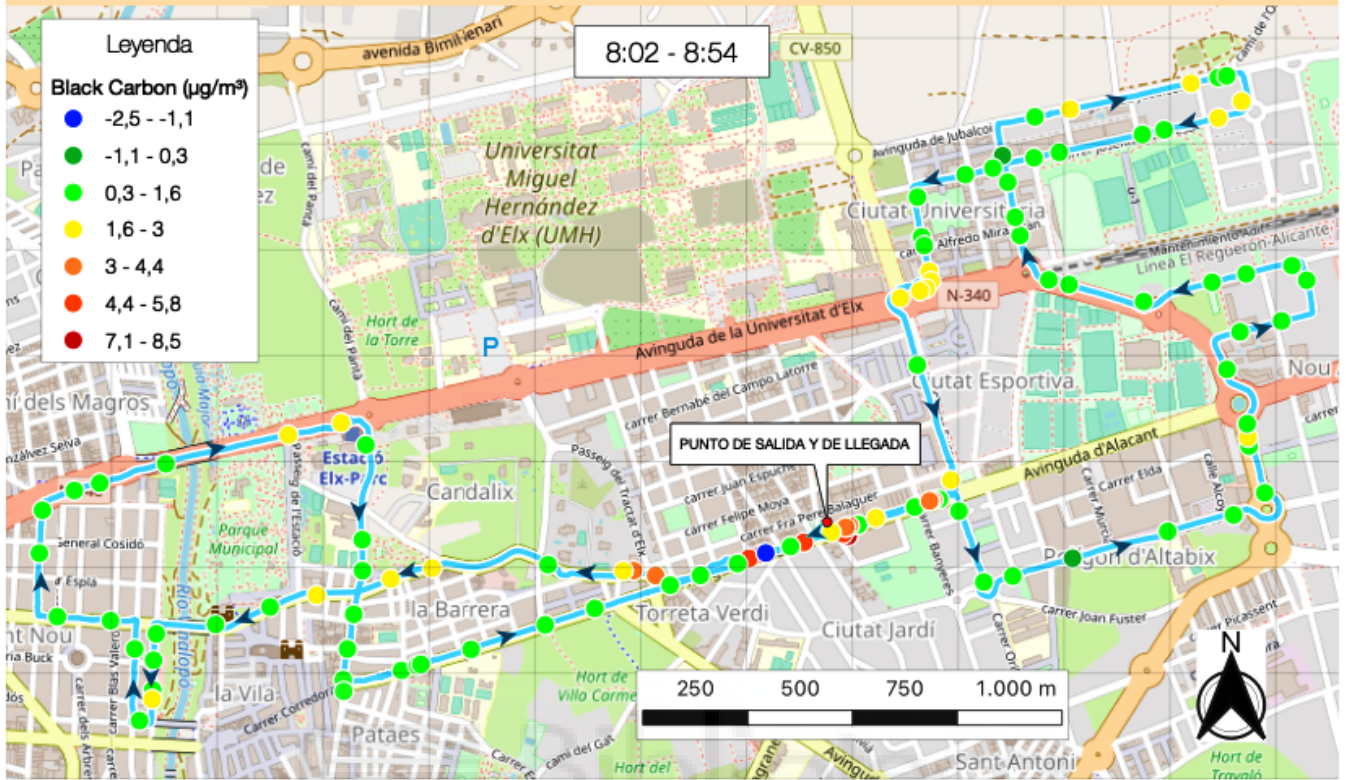
B



C



# Recorrido 5 - Ruta H - 22/02/2022



A



B

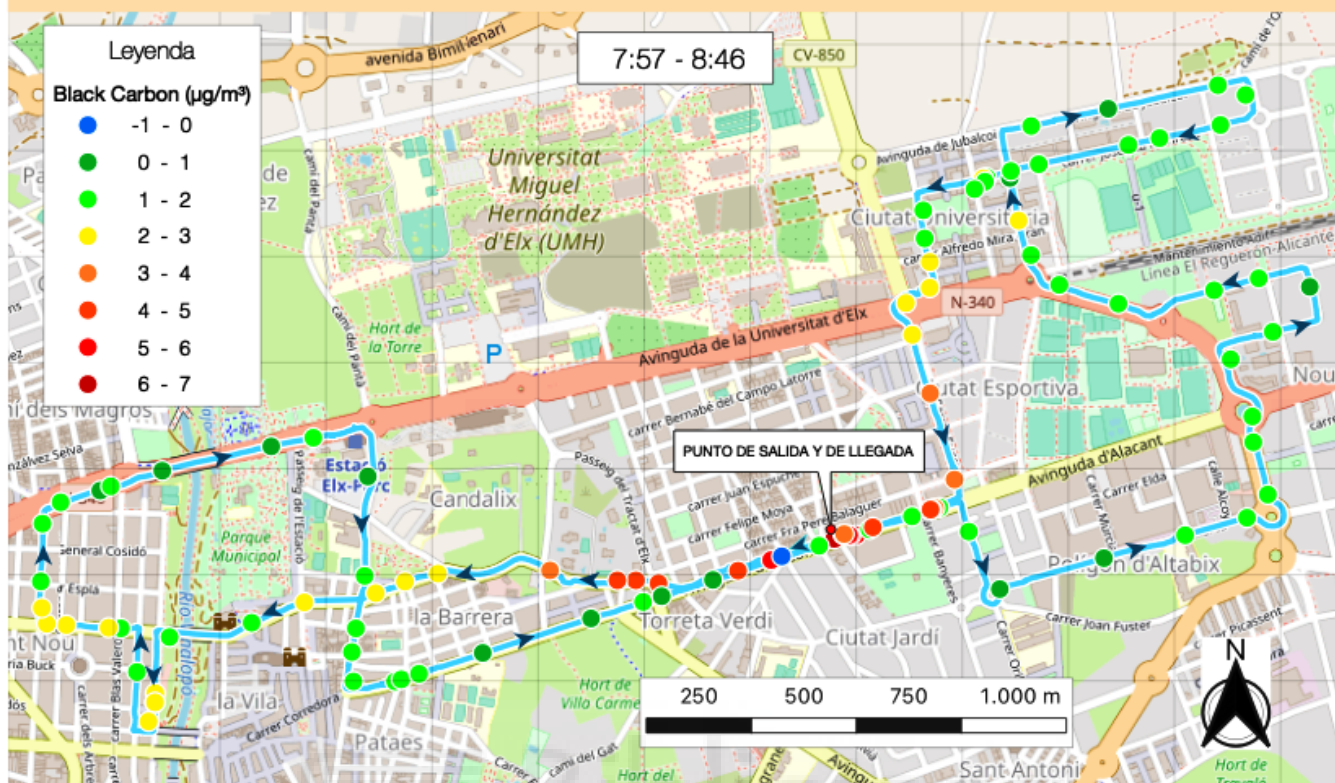


C





# Recorrido 6 - Ruta H - 23/02/2022



A



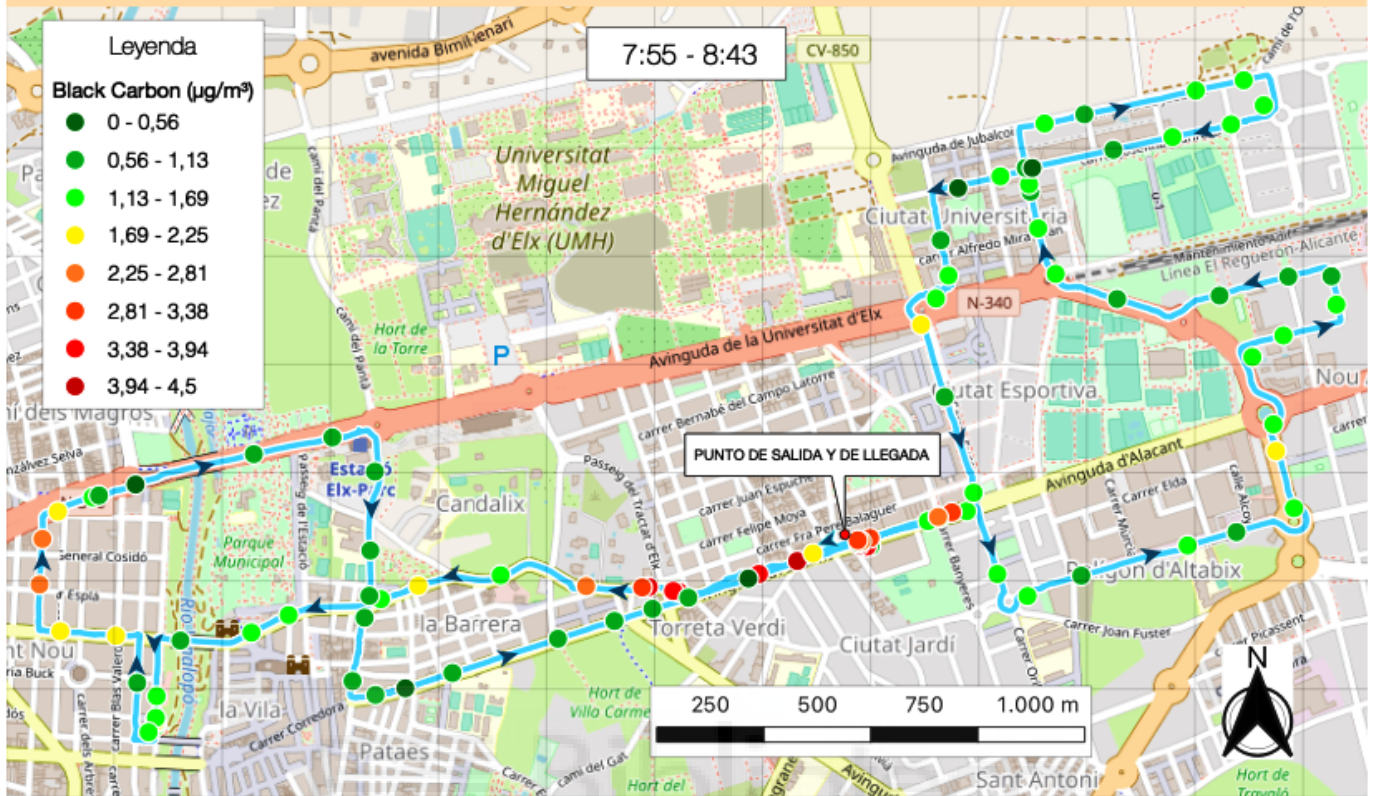
B



C



# Recorrido 7 - Ruta H - 24/02/2022



A



B

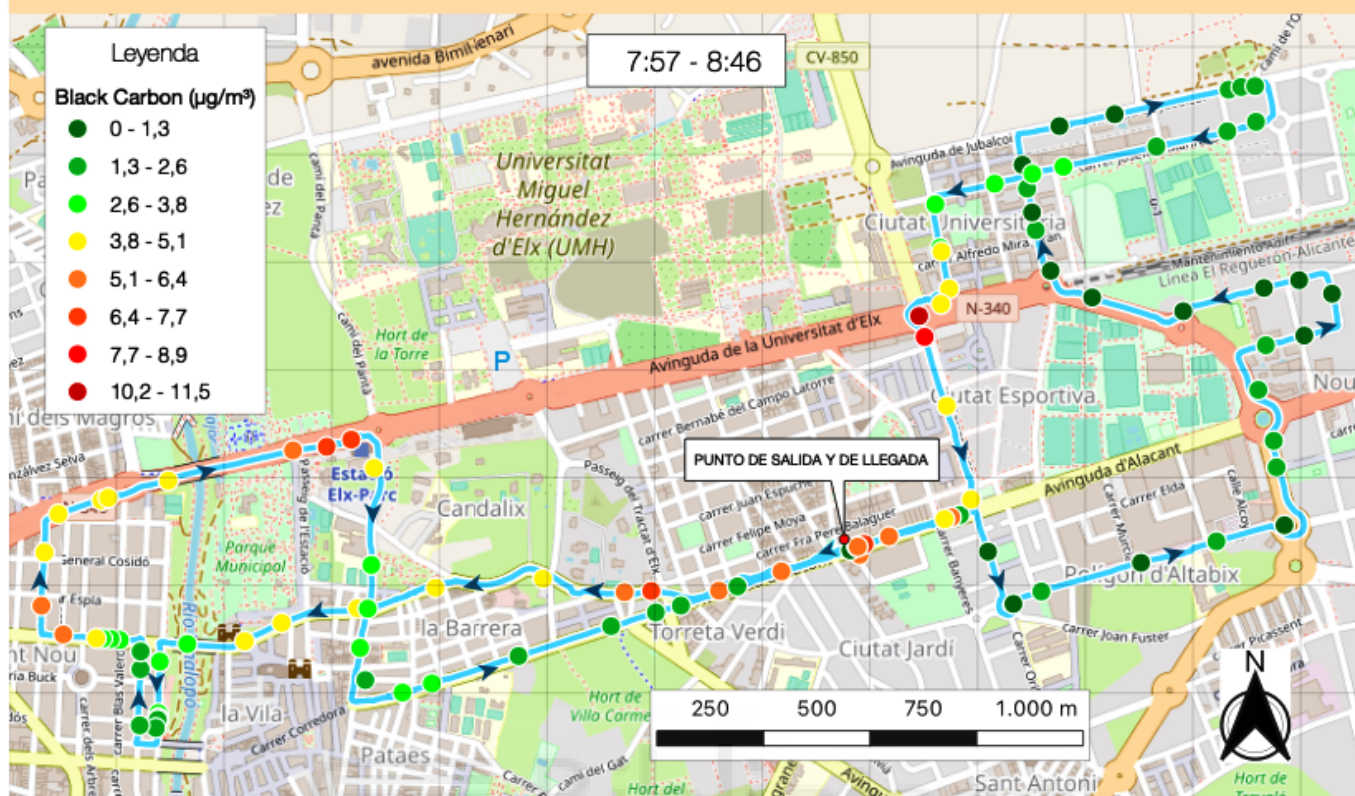


C





# Recorrido 8 - Ruta H - 25/02/2022



A



B

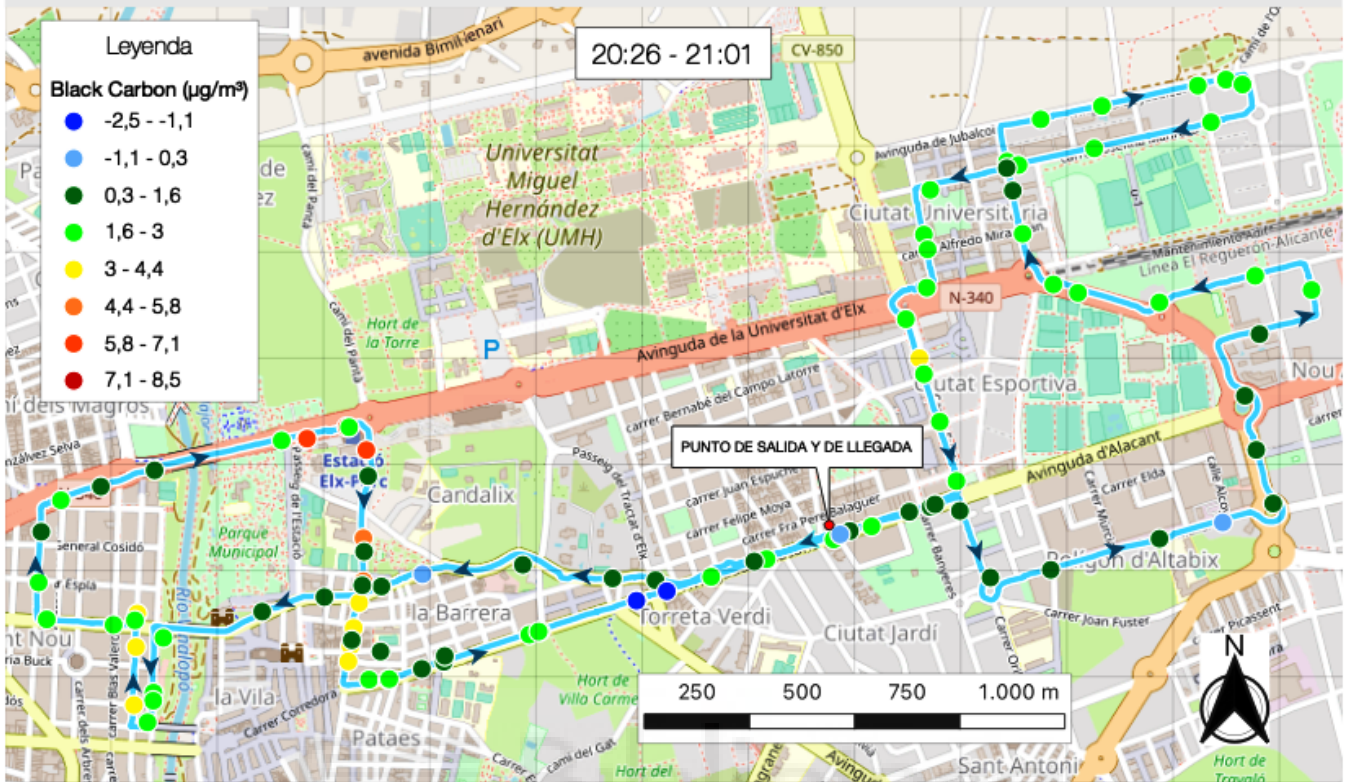


C

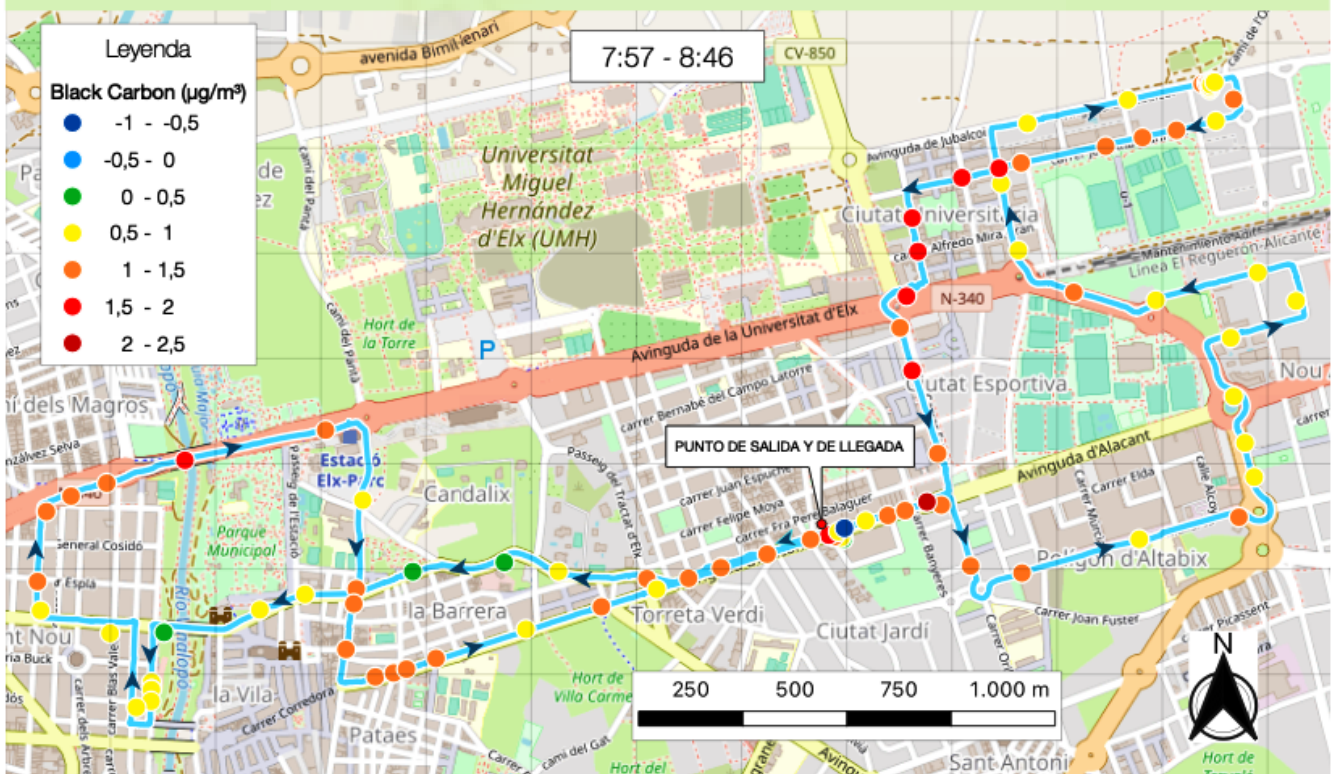




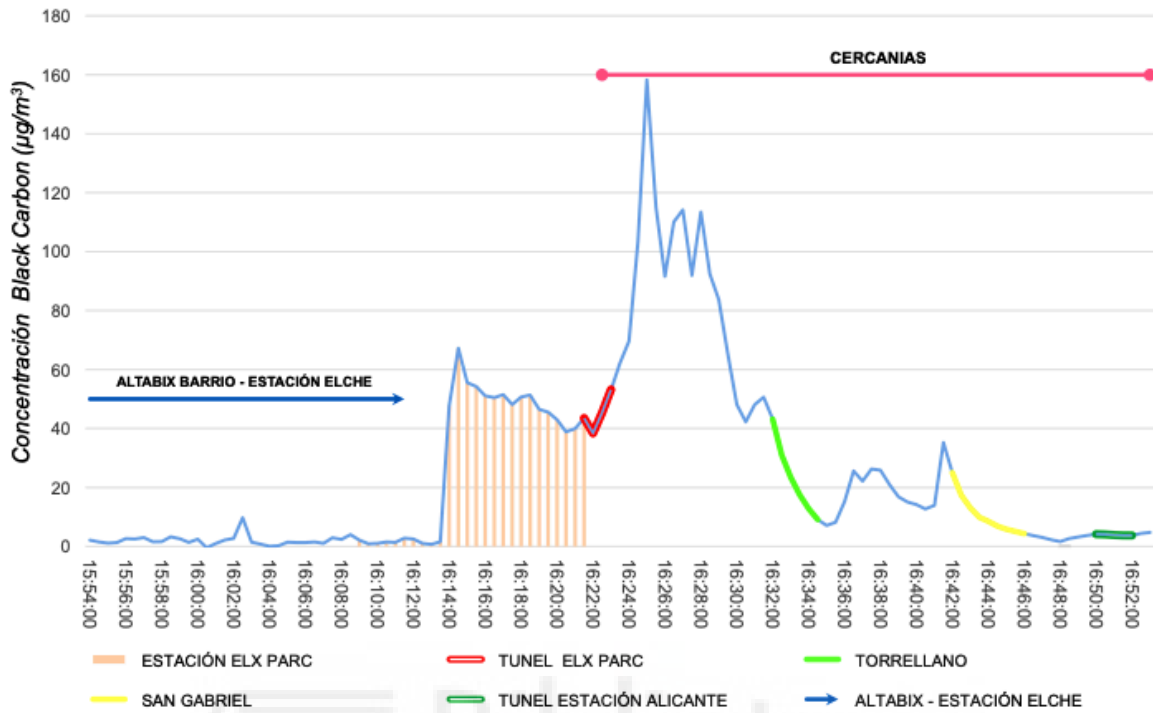
## Recorrido 9 - Ruta H - 09/03/2022



## Recorrido 10 - Ruta H - 26/03/2022



### Recorrido Elche-Alicante en cercanías 18/02/22



### Recorrido Alicante - Elche en cercanías 20/02/22

