



Composición química de PM y contribución de fuentes en zonas rurales olivareras de Andalucía

Agustina Romero Pereira

Trabajo entregado para la obtención del grado de **MÁSTER EN
TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

Modalidad: Investigación

Septiembre / 2024

Directores:

Ana M. Sánchez de la Campa
Jesús D. de la Rosa

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 “**Composición química de PM y contribución de fuentes en zonas rurales olivareras de Andalucía**”, presentado por **D. Agustina Romero Pereira**, con D.N.I.: **YB 5950146**, ha sido realizado en bajo mi 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

Firmado por SANCHEZ DE LA CAMPA
VERDONA ANA MARIA - ***1550** el
día 16/09/2024 con un certificado
emitido por AC FNMT Usuarios

Firmado por DE LA ROSA DIAZ
JESUS DAMIAN - ***7511** el día
16/09/2024 con un certificado
emitido por AC FNMT Usuarios

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

RESUMEN

En los últimos años, el municipio de Villanueva del Arzobispo posee un alto número de superaciones del valor límite diario (VLD) de PM10 ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 días al año) a pesar de poseer de un censo de 8.000 habitantes. Las superaciones del VLD ocurridas entre los años 2012-2019 derivaron en un procedimiento sancionado por parte de la Unión Europea, conjuntamente con Madrid y Barcelona. por el incumplimiento de las obligaciones que impone la directiva relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente.

En este trabajo se ha realizado un estudio de niveles de PM10 y CO entre los años 2018 (junio) y 2024 (junio), y composición química de PM10 entre los años 2021 a 2023 con objeto de conocer la contribución de fuentes aplicando el modelo PMF5 de US-EPA.

Se han analizado un total de 181 filtros de PM10, obteniéndose una concentración media de $30.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el límite promedio anual propuesto por la futura Directiva Europea del 2030 ($20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Aunque actualmente no se supera este límite según la directiva vigente (2008/50/CE, $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), claramente se supera el futuro límite anual, siendo necesario realizar un plan que contemple la cuantificación de la fuente de combustión de biomasa al PM10 y las medidas de reducción de este contaminante.

Las máximas concentraciones de PM10 ocurren sistemáticamente en los meses de diciembre y enero de cada año, coincidiendo también con la temporada de recolección de la aceituna. Los máximos principales ocurren a 10:00 y 22:00 horas, siendo los momentos de inicio de la actividad de la población y activación de las estufas domésticas empleando biomasa derivada del olivar.

El componente químico principal es la materia mineral (50%) seguido por C orgánico (OC, 26%), compuestos inorgánicos secundarios (SIC, 12%), aerosol marino (7%) y C elemental (EC, 5%). No se destacan altas concentraciones en metales pesados normativos tales como Pb, As, Ni y Cd.

Aplicando el modelo PMF5 de US-EPA, se propone cinco fuentes principales que contribuyen al PM10, siendo la más importante la fuente de combustión ($11.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 40%; K+Cu+Rb+Cl+OC+EC), seguida por Mineral 1 ($8.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 30%; Al+Fe+Mn+Ti+fosfato+V+Rb+Sr+Ba), Regional: ($3.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 12%; Na+fosfato+V+Zn+Pb+sulfato+amonio), Mineral 2: ($2.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 10%; Ca+Mg+fosfato+Ba), y Marino envejecido ($2.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 8%; Na+Ni+Zn+Ba+nitrato+Cl).

La suma de las contribuciones a las PM10 es de $28,9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es necesaria una reducción del 25% de la fuente de combustión para alcanzar el objetivo según la futura directiva de 2030.

ABSTRACT

In recent years, the municipality of Villanueva del Arzobispo has a high number of exceedances of the daily limit value (DLV) of PM10 ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 days a year) despite having a population of 8,000 inhabitants. The VLD exceedances that occurred between 2012-2019 resulted in a sanctioning procedure by the European Union, together with Madrid and Barcelona, for non-compliance with the obligations imposed by the directive on limit values for sulfur dioxide, nitrogen dioxide and nitrogen oxides, particulate matter and lead in ambient air.

In this work, a study of PM10 and CO levels between the years 2018 (June) and 2024 (June), and PM10 chemical composition between the years 2021 to 2023 has been carried out to know the contribution of sources applying the PMF5 model of US-EPA.

A total of 181 PM10 filters have been analyzed, obtaining an average concentration of $30.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, exceeding the annual average limit proposed by the future European Directive of 2030 ($20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Although this limit is not currently exceeded according to the current directive (2008/50/CE, $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), the future annual limit is clearly exceeded, being necessary to make a plan that contemplates the quantification of the biomass combustion source to PM10 and the measures to reduce this pollutant.

The maximum concentrations of PM10 occur systematically in the months of December and January of each year, also coinciding with the olive harvesting season. The main peaks occur at 10 a.m. and 10 p.m., being the moments of the beginning of the activity of the population and activation of domestic stoves using biomass derived from the olive grove.

The main chemical component is mineral matter (50%) followed by organic C (OC, 26%), secondary inorganic compounds (SIC, 12%), marine aerosol (7%) and elemental C (EC, 5%). High concentrations of normative heavy metals such as Pb, As, Ni and Cd do not stand out.

Applying the US-EPA PMF5 model, five major sources contributing to PM10 are proposed, the most important being the combustion source ($11.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 40%; K+Cu+Rb+Cl+OC+EC), followed by Mineral 1 ($8.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 30%; Al+Fe+Mn+Ti+phosphate+V+Rb+Sr+Ba), Regional: ($3.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 12%; Na+phosphate+V+Zn+Pb+sulfate+ammonium), Mineral 2: ($2.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 10%; Ca+Mg+phosphate+Ba), and Marine aged ($2.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 8%; Na+Ni+Zn+Ba+nitrate+Cl).

The sum of contributions to PM10 is $28.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Discounting the net load to PM10 by particles coming from North Africa, a 25% reduction of the combustion source is necessary to reach the objective according to the future directive of 2030.

AGRADECIMIENTOS

A las mujeres de mi familia: Sylvia, Teresa, Luli, Joaquina y Dulce, por ser mi red de apoyo incondicional y fuente constante de inspiración.

A mis abuelos, Carlos y Antonio, por sus valiosas enseñanzas y por haberme guiado siempre a través del ejemplo.

A mis tutores, Ana y Jesús, por su paciencia, dedicación y el tiempo invertido en orientarme a lo largo de este proceso.

A mis compañeros de máster: María, Mario, Dani y Jorge, por la hermosa amistad que ha nacido en este camino.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
1.- INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. ANTECEDENTES.....	11
1.2. MARCO LEGAL.....	12
1.3. OBJETIVOS Y DESAFÍOS FUTUROS DE LA UE SOBRE CALIDAD DEL AIRE.....	14
1.4 CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS OLIVARERAS DE ANDALUCÍA.....	16
2.-OBJETIVOS.....	17
3.- METODOLOGÍA.....	18
3.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.2. RED DE CALIDAD DEL AIRE.....	19
3.3. ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO.....	20
3.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	20
3.5. ANÁLISIS QUÍMICO.....	21
3.6. CONTRIBUCIÓN DE FUENTES.....	23
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1. NIVELES PM10 Y CO.....	24
4.2.- COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	31
4.2.1. Distribución de los componentes químicos principales en PM10.....	31
4.2.2. Evolución temporal de los componentes químicos principales y traza de PM10.....	34
4.3. CONTRIBUCIÓN DE FUENTES.....	37
5.- CONCLUSIONES.....	41
6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Villanueva del Arzobispo desde Iznatoral	18
Figura 2. Imagen Google-Map® de los elementos principales relacionados con Calidad del Aire (Estación Red Calidad del Aire, Central Térmica de La Loma y Orujera de San Miguel).....	19
Figura 3. Imagen de la Cabina de Calidad del Aire de Villanueva del Arzobispo en el año 2014 (Ayuntamiento) y en el Colegio Fuensanta (actualidad). Izquierda y derecha respectivamente.....	20
Figura 4. Instrumentación empleada en el análisis de elementos traza (ICP-MS, Agilent 7900), mayores (ICP-OES, Agilent 5110), iones (Cromatografía Iónica, 883 Basic IC plus METHROM) y especies de C (Sunset), respectivamente.	22
Figura 5. Superación valor límite diario ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 días al año) promedio mensual entre los años 2018 y 2024 en Villanueva del Arzobispo.....	25
Figura 6. Comparación de métodos de medición de PM10: atenuación beta automática frente a análisis gravimétrico.....	26
Figura 7. Variación temporal de PM10.....	27
Figura 8. Variación temporal de CO.....	28
Figura 9. Evolución estacional promedio de los niveles de PM10 y CO (junio 2018 - junio 2024).	29
Figura 10. Comportamiento de PM10 a nivel horario desde el año 2016 hasta el 2024.	30
Figura 11. Promedios de niveles de PM10 horarios a 10h y 22h de diciembre y enero entre los años 2016 a 2024 en la estación de Villanueva del Arzobispo.....	31
Figura 12. Promedio de la distribución de componentes químicos principales en PM10. Estación de Villanueva del Arzobispo. Distribución de componentes químicos principales en PM10 correspondientes a los años 2021, 2022 y 2023 respectivamente. Estación de Villanueva del Arzobispo. También se incluye la frecuencia de Intrusión de polvo sahariano en Villanueva del Arzobispo.	33
Figura 13. Evolución temporal de componentes químicos mayoritarios y traza en PM10. Estación Villanueva del Arzobispo.	35
Figura 14. Perfil químico de las fuentes de PM10 (expresado como contribución de elementos mayores y traza en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	37
Figura 15. Contribución media de las fuentes identificadas a la concentración media de PM10 en la estación de Calidad del aire de Villanueva del Arzobispo en el año 2021-2023.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores límites contemplados en la Directiva 2008/50/CE y la futura directiva del año 2030	15
Tabla 2. Promedios anuales de PM10, CO, y exceso de límites antropogénicos diarios periodo 2018-2024.....	24
Tabla 3. Promedios mensuales de PM10, CO, y exceso de límites diarios antropogénicos diarios en el periodo 2018-2024.	25
Tabla 4. Composición química de PM10. Estación Villanueva del Arzobispo.....	32
Tabla 5. Resumen de contribución media de las fuentes identificadas a la concentración media de PM10 en la estación de Calidad del aire de Villanueva del Arzobispo en el año 2021-2023.	38

1.- INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es un problema global que afecta tanto a la salud pública como al medio ambiente. Numerosos estudios han demostrado como importantes sectores de la población están expuestos a niveles perjudiciales de contaminantes atmosféricos, lo que constituye el principal factor ambiental asociado a enfermedades evitables y mortalidad prematura en la Unión Europea (UE). La Organización Mundial de la Salud (OMS) ([OMS, 2021](#)) ha señalado que la exposición a la contaminación del aire, particularmente al material particulado atmosférico (PM), está vinculada a una amplia gama de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

La OMS ([op. cit.](#)) ha actualizado recientemente sus guías de calidad del aire, estableciendo límites más estrictos para diversos gases contaminantes y PM con el objetivo de proteger la salud humana y aumentar la esperanza de vida. Estas acciones reflejan el grado de urgencia que a nivel mundial se debe abordar y enfrentar la contaminación atmosférica y sus consecuencias.

A pesar de las medidas implementadas en las últimas décadas para reducir las emisiones de contaminantes, evaluaciones tanto a nivel de la UE ([Parlamento Europeo, 2023](#)) como regional (Junta de Andalucía) indican que aún persisten niveles de contaminación con efectos adversos significativos. En particular, las partículas en suspensión (PM10) han mostrado ser una preocupación notable, ya que afectan tanto la calidad del aire exterior como interior, y tienen un impacto directo en la salud humana.

En el caso de Andalucía, y específicamente en las zonas rurales olivareras como Villanueva del Arzobispo (Jaén), la situación es especialmente preocupante. Las mediciones de calidad del aire han registrado repetidas superaciones de los valores límite de PM10 establecidos por la normativa europea, implicando la activación del Plan de Calidad del Aire en el municipio ([Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, 2021](#)).

La propuesta de nueva directiva de la UE para 2030 ([Parlamento Europeo, 2023](#)) expone la necesidad de una vigilancia más estricta y una reducción urgente de los niveles de contaminación, incluyendo contaminantes no convencionales como el carbono negro (BC) y otros. Esto implica la necesidad de estudios más detallados sobre la calidad del aire y la implementación de modelos de contribución de fuentes para entender mejor el origen y comportamiento del material particulado atmosférico en diferentes áreas.

En este contexto, el presente trabajo se centra en la caracterización de la composición química del PM10 y la contribución de fuentes en una zona rural olivarera representativa de Andalucía como es el municipio de Villanueva del Arzobispo. Mediante este estudio se realizará una evaluación de la variabilidad espacial y

temporal de exposición de estos contaminantes en la población. De esta forma se podrá proponer qué orígenes son los más importantes en cuanto al empeoramiento de la calidad del aire. En concreto, se evaluará la contribución de la combustión de biomasa y la posible capacidad de reducción para alcanzar los objetivos de la Unión Europea en el año 2030.

1.1. ANTECEDENTES

La producción de aceituna en Andalucía es de gran importancia, no solo desde el punto de vista económico dentro del sector agrícola, sino también por su papel cultural tanto a nivel nacional como internacional. Andalucía es conocida por ser una región líder en la producción de aceite de oliva, representando más del 36% de la producción mundial ([Consejería de Agricultura Pesca, Agua y Desarrollo Rural, 2023](#)). Este cultivo es fundamental en la economía regional y contribuye significativamente a la reputación del aceite de oliva español en todo el mundo.

Jaén es la provincia andaluza que se destaca por su producción de aceite de oliva ya que genera el 25% de AOVE a nivel mundial. Siete municipios producen un tercio de todo el aceite jienense, entre ellos, Villanueva del Arzobispo.

No cabe duda de que el aprovechamiento de los residuos de biomasa derivados del cultivo del olivar ha supuesto un gran reto, permitiendo un alineamiento estratégico con el pacto verde europeo ([EU, 2024](#)) sobre todo en cuanto a la reducción de las emisiones de CO₂. Sin embargo, existe una clara influencia de las emisiones derivadas de la combustión de la biomasa sobre la calidad del aire. Las principales fuentes de combustión son las instalaciones de calefacción domésticas con leña de olivo y hueso de aceituna de baja calidad, quema de rastros de poda, producción de aceite de oliva y centrales agroenergéticas ([Agencia Andaluza de la Energía, 2020](#)).

Las áreas rurales de Andalucía, especialmente las zonas olivareras, presentan un perfil de emisiones atmosféricas que difiere considerablemente de las zonas urbanas e industriales ([Sánchez de la Campa et al., 2018](#)). En estas regiones, la actividad agrícola, junto con ciertas prácticas tradicionales y la orografía local, juegan un papel crucial en la generación y dispersión de contaminantes atmosféricos.

En las zonas rurales de Andalucía, donde el cultivo del olivo es predominante, las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos están principalmente asociadas con ([Agencia Andaluza de la Energía, 2020](#)):

- **Quema de Residuos Agrícolas:** Una práctica común en las áreas olivareras es la quema de los restos de poda y otros residuos agrícolas. Este proceso libera una considerable cantidad de partículas en suspensión (PM), así como gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Estas emisiones

son especialmente elevadas durante los meses de otoño e invierno, cuando se realizan las labores de poda.

- **Uso de Maquinaria Agrícola:** La maquinaria utilizada en la labranza, la cosecha y otras actividades relacionadas con el cultivo del olivo es una fuente importante de emisiones de NOx y partículas finas. El uso de combustibles fósiles en estos equipos contribuye a la contaminación atmosférica, aunque en menor medida que la quema de residuos.
- **Aplicación de Productos Fitofarmacéuticos:** Aunque no se asocia directamente con la emisión de gases, la aplicación de pesticidas y fertilizantes puede contribuir a la contaminación del aire. Estos productos pueden volatilizarse y ser transportados por el viento, afectando la calidad del aire en las zonas cercanas.

Los contaminantes más relevantes relacionados con la combustión de biomasa de origen agrícola es el material particulado atmosférico, principalmente secundario y dominando tanto Carbono Orgánico como Carbono Elemental (OC y EC), y monóxido de Carbono. Hay que añadir compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno (NOx) los cuales pueden reaccionar en la atmósfera con la luz solar para formar ozono troposférico, un contaminante secundario que es perjudicial tanto para la salud humana como para los cultivos.

La magnitud y composición de las emisiones en las áreas rurales de Andalucía varían significativamente a lo largo del año, influenciadas por la estacionalidad de las actividades agrícolas. Durante la época de poda y recolección de aceitunas, que coincide con los meses más fríos del año, se observa un incremento en las emisiones debido a la quema de residuos agrícolas.

Por otro lado, la dispersión de contaminantes en estas áreas depende en gran medida de factores meteorológicos y topográficos. Las zonas con orografía compleja, como valles y zonas montañosas, pueden experimentar acumulaciones de contaminantes en periodos de calma atmosférica o inversiones térmicas, lo que agrava la calidad del aire local ([Pérez-Pastor et al., 2020](#)).

1.2. MARCO LEGAL

El marco legal que regula la calidad del aire y la contaminación atmosférica se establece a distintos niveles, tanto europeo, nacionales y regionales, destacándose:

EUROPA

[**DIRECTIVA 2008/50/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.**](#) Esta directiva establece límites para la concentración de

contaminantes en el aire, con especial énfasis en las partículas en suspensión (PM10 y PM2.5). Los límites específicos son:

- PM10:
 - Límite diario: 50 µg/m³, que no debe superarse más de 35 veces por año civil
 - Límite anual: 40 µg/m³
- PM2.5:
 - Objetivo anual: 25 µg/m³ (fase 1)
 - Objetivo anual: 20 µg/m³ (fase 2, a partir de 2020)

[La Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo se centra en la regulación de ciertos metales pesados y contaminantes específicos en el aire ambiente, como el arsénico, cadmio, mercurio, y níquel, así como los hidrocarburos aromáticos policíclicos](#). Estos metales son de particular interés debido a sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. La directiva establece valores objetivo para la concentración de estos metales en el aire con el fin de proteger la salud pública y los ecosistemas.

[DIRECTIVA \(UE\) 2016/2284 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos](#). Esta directiva fija compromisos de reducción de emisiones para los Estados miembros. Para España, los objetivos de reducción de PM2.5 son:

- 15% de reducción para el período 2020-2029
- 50% de reducción a partir de 2030 (en comparación con los niveles de 2005)

[Reglamento \(UE\) 2019/1021 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2019 sobre contaminantes orgánicos persistentes](#). Aunque no establece límites específicos para PM10 o PM2.5, este reglamento es relevante ya que regula la producción, uso y eliminación de contaminantes orgánicos persistentes que pueden afectar la calidad del aire.

ESPAÑA

Las directivas europeas mencionadas anteriormente están transpuestas a la legislación española a través de leyes, y reales decretos:

- [LEY 34/2007, de 15 de noviembre, de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera](#). Esta ley establece las bases en materia de prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica. Aunque no fija límites específicos, proporciona el marco para el desarrollo de normativas más detalladas.

[- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.](#) Este decreto transpone la Directiva 2008/50/CE y establece valores límite para los contaminantes atmosféricos. Los límites para PM10 y PM2.5 son idénticos a los establecidos en la directiva europea.

También hay que tener en cuenta el establecimiento del [Plan Nacional de Calidad del AIRE 2017-2019 \(Plan Aire II\)](#). Este plan establece una estrategia para mejorar la calidad del aire en España, aunque no fija límites específicos adicionales a los ya establecidos en la legislación. Este Plan se encuentra vigente en la actualidad.

ANDALUCÍA

A nivel de la Comunidad Autónoma de Andalucía, se publica el [Acuerdo de 19-4-16 del Consejo de Gobierno por el que se aprueba la formulación de la Estrategia Andaluza de Calidad del Aire](#), el cual contempla los distintos planes actuales que se desarrollan en toda la comunidad autónoma de Andalucía. El Acuerdo supuso un gran reto en la Comunidad del Aire de Andalucía, al intentar llegar a los niveles propuestos por la [OMS \(2005\)](#).

1.3. OBJETIVOS Y DESAFÍOS FUTUROS DE LA UE SOBRE CALIDAD DEL AIRE

La Unión Europea ha establecido una serie de objetivos ambiciosos para mejorar la calidad del aire en las próximas décadas, enfrentando una serie de desafíos significativos ([Parlamento Europeo 2023](#)). Estos desafíos incluyen la reducción de emisiones contaminantes, la implementación de tecnologías limpias y la mejora continua de la normativa ambiental. A medida que la UE avanza hacia estos objetivos, se destacan dos metas clave para los próximos años: 2030 y 2050.

En el año 2030, la UE ha fijado metas concretas de reducción de emisiones de contaminantes (Tabla 1). En particular, se busca una disminución del 46% en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en comparación con los niveles de 2005. Esta reducción está orientada a mejorar la calidad del aire en las zonas urbanas y mitigar el impacto del tráfico y la industria. Además, se pretende reducir las emisiones de material particulado (PM2.5) en un 23% para el mismo año, y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en un 16% respecto a los niveles de 2005. Estos compuestos contribuyen a la formación de ozono troposférico y tienen efectos adversos en la salud y el medio ambiente.

Tabla 1. Valores límites contemplados en la Directiva 2008/50/CE y la futura directiva del año 2030

Contaminante	Límite anual (2008)	Límite anual (2030)	Límite diario (2008)	Límite de excedencias por año (2008)	Límite diario (2030)	Límite de excedencias por año (2030)
NO ₂	40 µg/m ³	20 µg/m ³	200 µg/m ³ (horario)	18	50 µg/m ³	18
PM10	40 µg/m ³	20 µg/m ³	50 µg/m ³	35	45 µg/m ³	18
SO ₂	--	20 µg/m ³	125 µg/m ³	3	50 µg/m ³	18

En el año 2050, la UE se ha comprometido a alcanzar la neutralidad climática, es decir, reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero a cero dentro (EU, 2024). Esta meta implica una reducción significativa de las emisiones de contaminantes asociados con la quema de combustibles fósiles, contribuyendo así a una mejor calidad del aire. La transición hacia energías renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, es fundamental para lograr este objetivo, ya que reducirá las emisiones atmosféricas derivadas de la generación de energía.

Además, se promoverá el desarrollo e implementación de tecnologías limpias y soluciones innovadoras para reducir las emisiones de contaminantes. Se espera una integración más estrecha de las políticas de calidad del aire con las políticas de salud y medio ambiente, abordando de manera integral los impactos de la contaminación en la salud pública. La UE también seguirá implementando medidas integrales que aborden todas las fuentes de contaminación, incluyendo el transporte, la agricultura y la industria, para garantizar el cumplimiento de los objetivos de calidad del aire en el contexto de una economía libre de emisiones (EU, 2024).

Estos objetivos son parte del Pacto Verde Europeo (European Green Deal) y otras iniciativas clave que buscan crear un entorno más limpio y saludable para los ciudadanos europeos, promoviendo una economía sostenible y respetuosa con el medio ambiente. (EU, 2024).

1.4 CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS OLIVARERAS DE ANDALUCÍA

El municipio de Villanueva del Arzobispo es un claro ejemplo de cómo la actividad agrícola, en particular la olivarera, puede impactar negativamente en la calidad del aire en zonas rurales ([Sánchez de la Campa et al., 2018](#); [Pérez-Pastor et al., 2020](#)). Las emisiones derivadas de la combustión de biomasa, como la quema de residuos de poda, son una fuente significativa de partículas en suspensión (PM10 y PM2.5).

Además de la quema de biomasa doméstica, la proximidad de instalaciones industriales que utilizan gas natural y biomasa para generar energía eléctrica en Villanueva del Arzobispo pueden empeorar aun más la calidad del aire ([Salvador et al., 2016](#)). La Red de Calidad del Aire de Andalucía dispone de casi 100 estaciones de muestreo repartidas por toda la región incluyendo zonas de tráfico, urbanas industriales, fondo urbano y rurales. Son muy pocas las estaciones en zonas rurales en comparación con el resto, pero muy necesarias para evaluar el fondo de las concentraciones de los gases contaminantes y PM. En el caso de Villanueva del Arzobispo, hasta el año 2014 se situó una serie de equipos de medida de NO₂, CO y PM10 en la azotea del Ayuntamiento con objeto de controlar la calidad del aire. Las reiteradas superaciones del valor límite diario (50 µg/m³, 35 días al año) derivadas de las proximidades de las chimeneas de estufas domésticas determinó el traslado a una zona más abierta en el Colegio Fuensanta, más al norte de la población.

Salvo en este municipio, no existen estaciones específicas en municipios olivareros, existiendo una laguna en el conocimiento de la exposición de la población sometida a las emisiones derivadas de la combustión de la biomasa. Estudios previos de [Sánchez de la Campa et al. \(2018\)](#) y [Pérez-Pastor et al. \(2020\)](#) han demostrado que la quema de biomasa en Andalucía contribuye al empeoramiento de la calidad del aire en varias zonas olivareras. Estos estudios subrayan que las concentraciones de partículas contaminantes pueden igualar o superar las de grandes ciudades tales como Madrid ó Barcelona, afectando a la salud pública. Durante el período de 2015 a 2019, Villanueva del Arzobispo superó los límites diarios de PM10 establecidos por la Directiva 2008/50/CE en numerosas ocasiones.

El Informe sobre Villanueva del Arzobispo ([Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2016](#)) evidencia que la actividad olivarera tiene un impacto significativo en la calidad del aire, comparando estos niveles con los de áreas industriales urbanas. Se demostró que la quema de biomasa en estas regiones genera altas concentraciones de PM10, las cuales pueden afectar significativamente la calidad del aire.

2.-OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es conocer los niveles, composición química y origen del material particulado atmosférico (PM10) en una zona olivarera representativa de Andalucía (Villanueva del Arzobispo), la cual dispone de una cabina de control de calidad del aire de la Red de Andalucía.

Cabe destacar, que este municipio ha sido objeto de distintos requerimientos por parte de la Unión Europea debido a superaciones del valor límite diario ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 días al año). A nivel de Andalucía, Villanueva del Arzobispo es la única estación con superaciones del mencionado límite y una de las pocas de España según los informes anuales de MITECO sobre Calidad del Aire.

Para alcanzar este objetivo principal, se propone los siguientes objetivos específicos.

- Analizar, identificar y cuantificar los compuestos químicos presentes en las muestras de PM10, incluyendo metales pesados, Carbono Orgánico y Carbono Elemental (OC-EC) y otros elementos mayoritarios.
- Evaluar los patrones de variación espaciales y temporales de PM10 en la zona de estudio.
- Conocer la contribución específica de cada fuente al PM10 y si la contribución de la quema de biomasa es responsable de las posibles futuras superaciones de la Directiva Europea del 2030.

3.- METODOLOGÍA.

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el valle entre los ríos Guadalimar y Guadalquivir, con una altitud media de 685 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el valle del Guadalquivir y la Sierra de Cazorla, al este con las tierras que conducen a la Sierra de las Villas, y al sur con la Loma de Úbeda (Figura 1). Esta configuración topográfica provoca un cierto encajonamiento del núcleo urbano, con altitudes mayores hacia el este, sur y oeste.



Figura 1. Villanueva del Arzobispo desde Iznatoral

El clima en Villanueva del Arzobispo es de tipo mediterráneo continental. Los veranos se caracterizan por tener unas temperaturas medias de 20 a 23°C, y los inviernos son fríos, con temperaturas medias de 7 a 10°C, presentando frecuentes heladas. La temperatura media anual es de aproximadamente 15 a 16°C. Las precipitaciones anuales varían entre 400 y 500 mm, distribuyéndose de manera regular a lo largo del año, con máximos en primavera y lluvias ocasionales en julio y agosto ([Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, 2021](#)).

Según el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía ([IECA 2024](#)), el municipio de Villanueva del Arzobispo posee 7.944 habitantes. Durante la campaña de recolección de la aceituna, que ocurre principalmente en diciembre y enero, la población de Villanueva del Arzobispo experimenta un aumento temporal debido a la llegada de trabajadores temporeros que se emplean en la recogida de la aceituna, uno de los cultivos más importantes de la zona.

La actividad industrial en Villanueva del Arzobispo está centrada en la producción de aceite. En las cercanías del núcleo urbano, existe un complejo industrial que procesa alperujo y extrae aceite de orujo de oliva (San Miguel Arcángel S.A.) (Figura 2). También hay una planta de generación de energía eléctrica compuesta por una planta de combustión de biomasa de 16 MW (Energía de La Loma, S.A.) y una planta de cogeneración con turbina de gas natural de 25 MW (Compañía Energética de las Villas, S.A.). Los gases de la combustión de gas se utilizan para secar el alperujo de las almazaras, mientras que la planta de biomasa utiliza el orujillo como combustible. El secado del alperujo se limita al periodo de recogida de la aceituna (noviembre a marzo), mientras que la planta de biomasa opera durante todo el año. Estas instalaciones se encuentran a unos 3.8 km del centro urbano de Villanueva del Arzobispo, hacia el noreste.

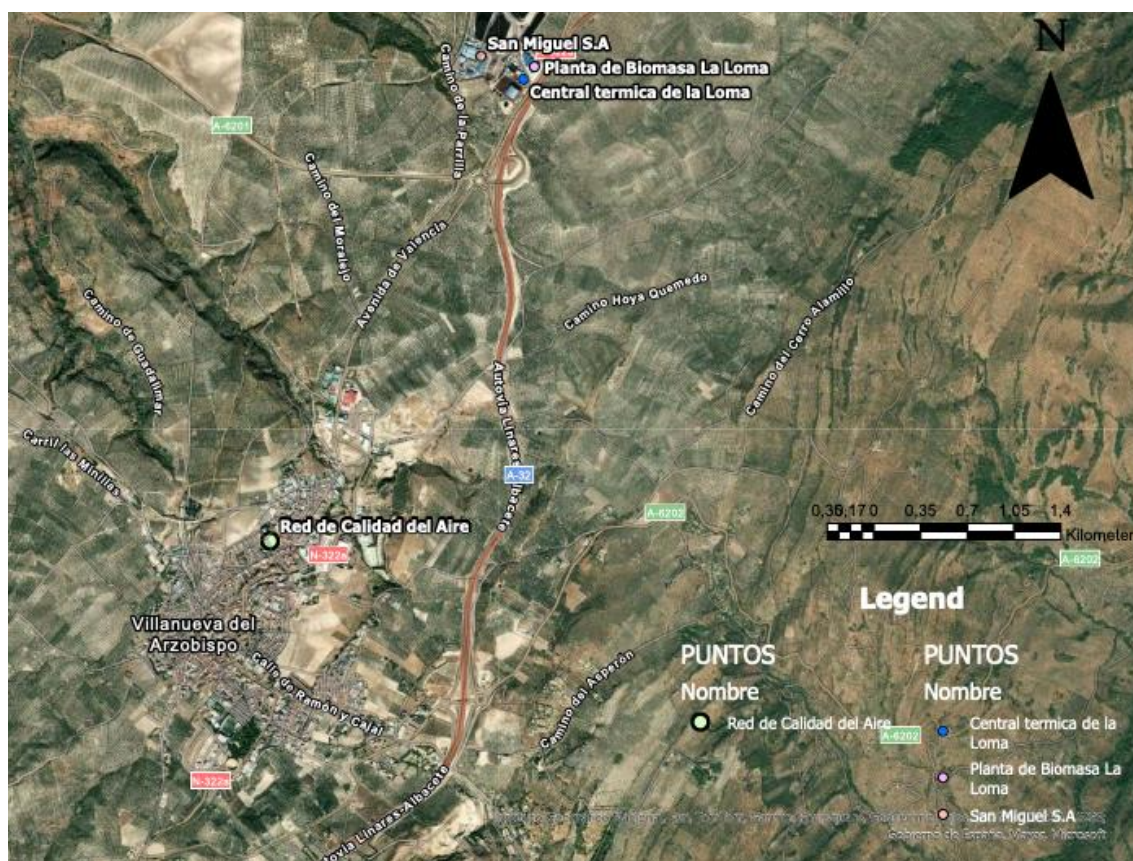


Figura 2. Imagen Google-Map® de los elementos principales relacionados con Calidad del Aire (Estación Red Calidad del Aire, Central Térmica de La Loma y Orujera de San Miguel).

3.2. RED DE CALIDAD DEL AIRE

El municipio de Villanueva del Arzobispo dispone de una estación fija de la Red de Calidad del Aire de Andalucía ($38^{\circ}10'28''N$, $3^{\circ}00'17''O$, 692 msnm), ubicada en las

instalaciones del Colegio Público Nuestra Señora de la Fuensanta. La misma cuenta con instrumentación básica en línea de gases contaminantes (NO , NO_2 , NO_x , SO_2 , CO , O_3) y PM_{10} , así como también captadores de bajo volumen de entrada de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} (Figura 3).



Figura 3. Imagen de la Cabina de Calidad del Aire de Villanueva del Arzobispo en el año 2014 (Ayuntamiento) y en el Colegio Fuensanta (actualidad). Izquierda y derecha respectivamente.

3.3. ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO

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 ($T=20\pm 1^\circ\text{C}$ y $50\pm 5\%$, respectivamente), siguiendo los criterios de la NORMA UNE-EN 12341:1999.

3.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Después del análisis gravimétrico, se realiza un tratamiento previo basado en el método desarrollado por [Querol et al. \(2002\)](#). Este método incluye digestión ácida total (para el análisis de elementos mayoritarios y traza), lixiviación (para el análisis de

aniones, cationes y amonio) y combustión (para determinar el contenido en carbono de la fracción insoluble).

Para la digestión ácida, se introduce medio filtro de 47 mm de diámetro en una bomba de PFA (Savillex®) de 60 ml con 0.5 ml de HNO₃ y 1 ml de HF. La bomba se cierra y se coloca en una estufa a 90°C durante al menos 4 horas. Los ácidos utilizados son de alta pureza (Merck): HNO₃ al 65% y HF al 40%.

Transcurrido este tiempo, la bomba se retira de la estufa y la solución se evapora en una placa a 180°C. Posteriormente se añade 0.5 ml de HClO₄ (Merck, 60% de pureza). Este proceso dura unas 8 horas. La proporción de los ácidos es siempre de 1:2:1 (HNO₃, HF) cuando se trabaja con filtros de fibra de cuarzo con material particulado. El HNO₃ disuelve la materia orgánica y carbonatos, mientras que el HF disuelve partículas de aluminosilicatos y el propio filtro. Posteriormente, se añade HClO₄ para digerir la materia orgánica más resistente.

Una vez evaporada la solución ácida, queda un residuo sólido seco o "perla", que se disuelve añadiendo 0.5 ml de HNO₃ y agua bi-distilada (grado Milli-Q) hasta enrasar a 10 ml de solución en un matraz, obteniendo así una solución acidificada al 5% de HNO₃. Esta solución se puede analizar mediante ICP-OES y ICP-MS.

3.5. ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico de los componentes inorgánicos del PM se ha llevado a cabo mediante técnicas multielementales avanzadas como ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), ICP-OES (Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente), CI (Cromatografía Iónica) y análisis elemental de especies de carbono (OC-EC) (Figura 4). La caracterización química total es fundamental para estimar la contribución de fuentes según el modelo PMF v.5.

La instrumentación forma parte de los Servicios de Instrumentación Científica (SIC) del Centro de Investigación en Química Sostenible (CIQSO) de la Universidad de Huelva. A continuación se describe cada una de las técnicas empleadas.

ICP-MS (AGILENT 7900): Para elementos como 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, W. La calibración se realizó con soluciones estándar AGILENT de 10 ppm multielemental para preparar 0.5, 1, 10, 50, y 100 ppb, y un blanco al 5% de HNO₃. La sintonía del equipo se hizo con una solución de 10 ppb de Li, Y y Tl.

ICP-OES (AGILENT 5110): Para elementos como Ca, S, Al, Fe, V, K, Ti, Na, Mg, Mn, Pb, Sr, Ba, Zn, Cu, Cr, Ni y P. La calibración se realizó con soluciones patrón de blanco, 0.05 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm y 100 ppm, usando soluciones mono-elementales de Agilent Technologies y S. La secuencia de análisis incluyó blancos de filtros, material de referencia, muestras, y un monitor interno (Y).

Cromatografía Iónica (883 Basic IC plus METHROM): 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: SO_4^{2-} , Cl^- , y NO_3^- y de cationes solubles: NH_4^+).

Transmitancia Termo-óptico (TOT) (SUNSET): La concentración de C y especies (orgánico y elemental) se realiza mediante un equipo TOT, el cual emplea un conjunto de gases para oxidar la muestra y posterior análisis de CO_2 . Se emplea punch de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ y standard de sacarosa de 4.2 mg/cm^2 .



Figura 4. Instrumentación empleada en el análisis de elementos traza (ICP-MS, Agilent 7900), mayores (ICP-OES, Agilent 5110), iones (Cromatografía Iónica, 883 Basic IC plus METHROM) y especies de C (Sunset), respectivamente.

Para asegurar la calidad de los resultados, se analiza simultáneamente el estándar NIST 1633c (ash fly) en el ICP-OES y ICP-MS, obteniendo una precisión y exactitud entre el 5-10% en la mayoría de los elementos. El límite de detección para los metales es superior a 0.1 ng/m^3 en las muestras de filtros de 47 mm.

3.6. CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

En este estudio, se ha implementado el modelo receptor PMF versión 5 (Positive Matrix Factorization, [Paatero y Tapper, 1994](#); <https://bit.ly/2KL1ixe>), para identificar las principales fuentes de PM en las estaciones analizadas durante el año 2023. Este modelo organiza los datos experimentales mediante el método de mínimos cuadrados y los agrupa en factores que se asimilan a fuentes o procesos de formación de partículas, calculando el peso de cada dato en función del grado de incertidumbre asociado.

La estimación de la incertidumbre de los datos se ha realizado siguiendo el método desarrollado por [Polissar et al. \(1998\)](#), modificado para incluir también la incertidumbre asociada al uso de los filtros blancos, según lo descrito por [Amato et al. \(2009\)](#). Este enfoque asegura una representación precisa de las fuentes y procesos de formación de partículas, considerando todas las posibles variaciones y errores en los datos experimentales.

El modelo PMF requiere un alto número de muestras para que el análisis sea suficientemente robusto. La precisión y fiabilidad del modelo dependen de la cantidad y calidad de los datos recopilados, lo que permite identificar y caracterizar de manera efectiva las distintas fuentes de PM presentes en las áreas de estudio.

Al aplicar el modelo PMF, se han identificado varias fuentes de partículas en suspensión (PM) en las estaciones estudiadas. Los resultados han permitido desglosar las contribuciones de cada fuente, proporcionando una visión clara de las principales actividades y procesos que afectan la calidad del aire en las zonas de estudio. Este análisis es crucial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y control de la contaminación del aire, contribuyendo a mejorar la salud pública y el medio ambiente.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. NIVELES PM10 Y CO

En la Tabla 2 se presenta una descripción de las series de valores medios diarios de PM10 y CO registrados con los equipos automáticos en la estación de Villanueva del Arzobispo desde el año 2018 hasta el 30 de junio del 2024. Las medias anuales obtenidas fueron de 32 $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ y 507 $\mu\text{gCO}/\text{m}^3$. En el año 2019 solamente se superó el valor límite diario (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) por causas antrópicas en 54 días, debiendo ser inferior a 35. Para conocer las superaciones por causas antrópicas se realizó un estudio masas de aire norteafricanas en el periodo de estudio mediante la metodología y teniendo en cuenta el procedimiento descrito por [IDAEA-CSIC et al., \(2013\)](#) para el Ministerio de Medio Ambiente.

Tabla 2. Promedios anuales de PM10, CO, y exceso de límites antropogénicos diarios periodo 2018-2024.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10	CO	>VLD ANT
Año 2018	36	420	30
Año 2019	35	645	54
Año 2020	29	521	23
Año 2021	31	469	27
Año 2022	37	468	17
Año 2023	29	507	27
Año 2024	30	464	18
Promedio	32	507	33

El análisis de los datos de PM10 y monóxido de carbono (CO) revela patrones estacionales a lo largo del año. Las concentraciones de PM10 alcanzan sus niveles más altos en los meses de enero y diciembre, con valores de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo en los meses de primavera y verano, entre abril y agosto, las concentraciones de PM10 disminuyen considerablemente, llegando a un mínimo de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en abril.

El monóxido de carbono (CO) sigue un comportamiento similar al de PM10, con picos en enero y diciembre (1037 ppm y 1006 ppm, respectivamente). Al igual que con las partículas en suspensión, las concentraciones de CO tienden a disminuir durante los meses cálidos, alcanzando su punto más bajo en junio con 252 ppm (Tabla 3).

Tabla 3. Promedios mensuales de PM10, CO, y exceso de límites diarios antropogénicos diarios en el periodo 2018-2024.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10	CO	>VLD ANT
enero	50	1037	13
febrero	44	755	5
marzo	38	482	1
abril	20	392	0
mayo	21	316	0
junio	23	252	0
julio	32	341	0
agosto	32	321	0
septiembre	24	278	0
octubre	25	306	0
noviembre	29	646	2
diciembre	50	1006	12
Promedio	32	507	33

El número de días en los que se superó el límite diario de contaminantes coincide con los meses de mayor concentración de PM10 y CO. Enero y diciembre destacan con 13 y 12 días por encima del límite, respectivamente. Sin embargo, los meses de abril a octubre no registran días que superen estos valores, lo que refleja una mejor calidad del aire en ese periodo (Figura 5). En resumen, los datos sugieren un empeoramiento de la calidad del aire en PM10 en invierno con una notable reducción en los meses más cálidos.

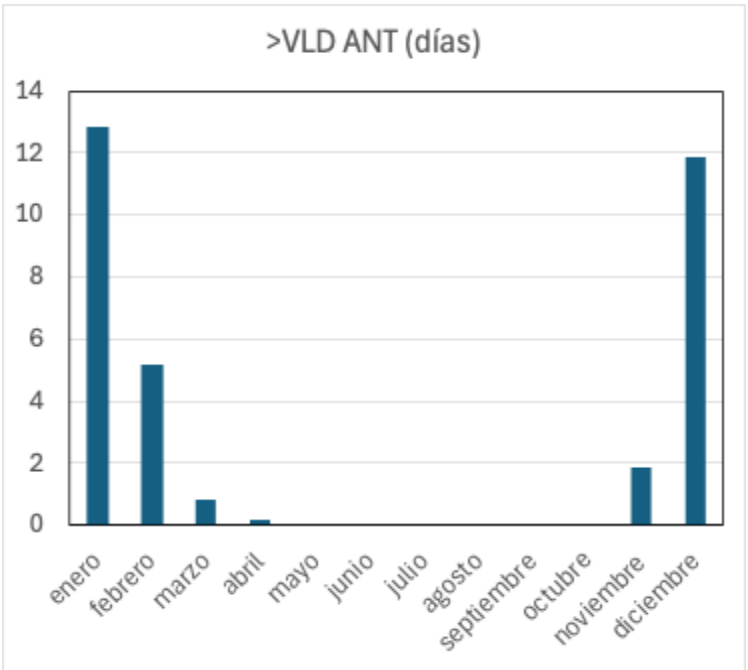


Figura 5. Superación valor límite diario ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 días al año) promedio mensual entre los años 2018 y 2024 en Villanueva del Arzobispo.

En el contexto de la Directiva 2008/50/CE y el R.D. 102/2011, que establecen la necesidad de utilizar instrumentación de referencia o equipos equivalentes para la determinación de niveles de PM, el presente estudio ha analizado las series temporales de PM₁₀ obtenidas mediante un equipo automático basado en el método de atenuación de la radiación Beta en comparación con la gravimetría. Estas series de datos han sido corregidas utilizando un factor de intercomparación de 1.09. El gráfico de dispersión (Figura 6) muestra una buena correlación entre las mediciones de PM₁₀ de los métodos Beta (automático) y el equipo Digitel (gravimetría), con un coeficiente de determinación R² de 0.86, lo que valida la consistencia y fiabilidad de los datos corregidos. Este enfoque asegura que las mediciones automáticas sean comparables con los métodos de referencia, cumpliendo así con las pautas establecidas por el Grupo de Trabajo sobre Material Particulado (EU, 2011).

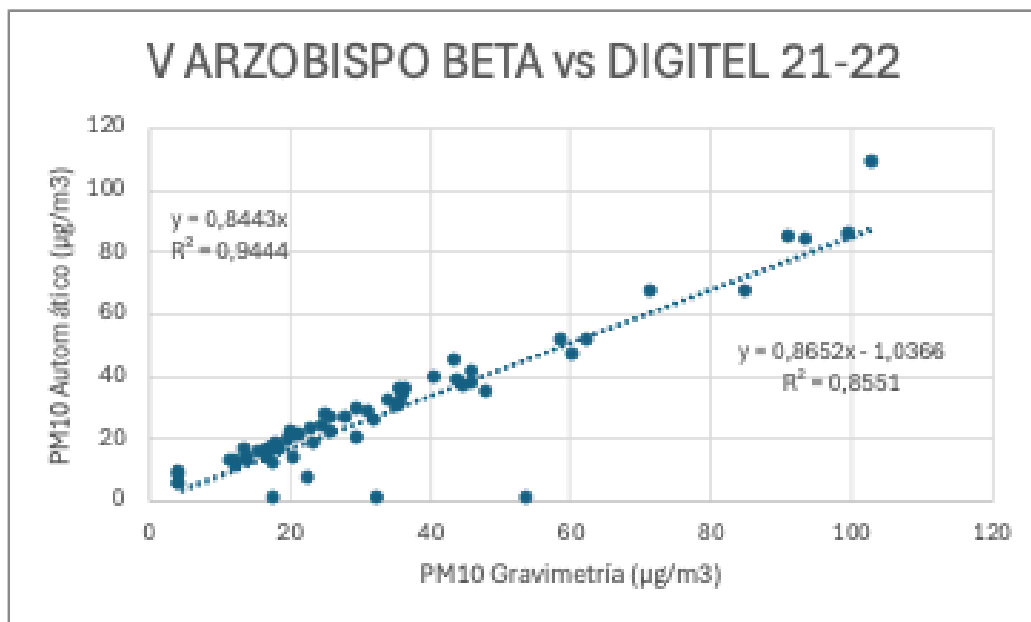


Figura 6. Comparación de métodos de medición de PM₁₀: atenuación beta automática frente a análisis gravimétrico.

A lo largo del período 2018-2024, los niveles de PM₁₀ muestran fluctuaciones significativas, con picos que superan los 100 µg/m³ en diversos momentos de cada año (Figura 7).

Se aprecian mayores concentraciones de PM₁₀ durante los meses de invierno, lo que podría estar vinculado a condiciones meteorológica desfavorables, como heladas que provocan un mayor uso de la calefacción doméstica. En contraste, los niveles tienden a reducirse en los meses de verano y otoño, probablemente debido a la mayor dispersión de contaminantes por la actividad atmosférica y cambios en las fuentes de emisión. En marzo y meses de verano pueden distinguirse picos ocasionales debidos

a la intrusión de masas de aire procedente del norte de África, aunque estas superaciones pueden ser descontadas según la directiva europea, al no deberse a causas antropogénicas.

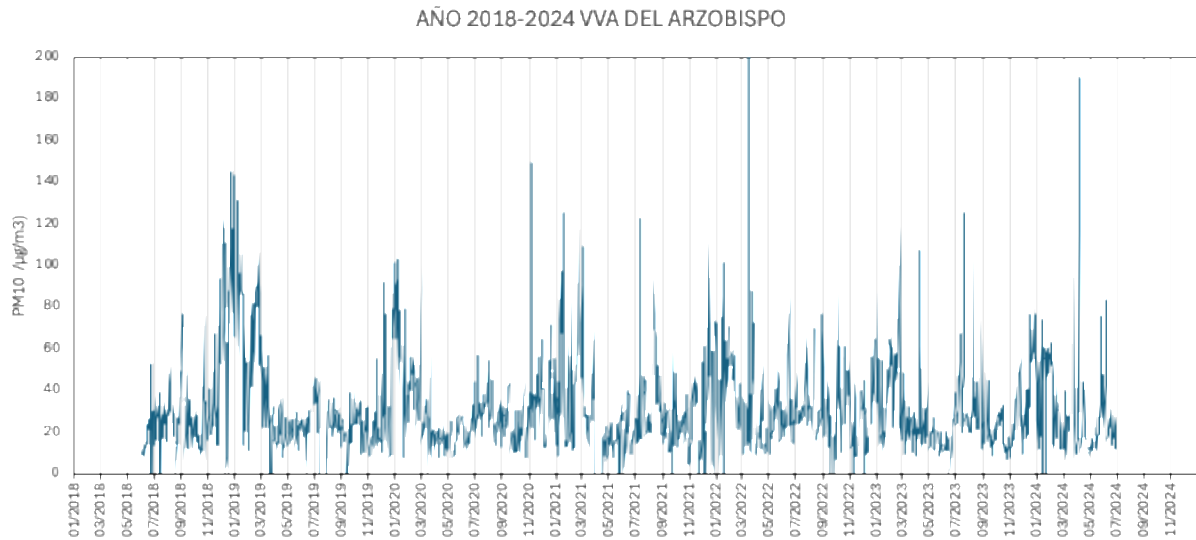


Figura 7. Variación temporal de PM10

En resumen, los picos más significativos de PM10 se registran principalmente entre los meses de diciembre a febrero, con valores que históricamente han alcanzado y sobrepasado los 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de masas de aire norteafricanas (marzo 2022 y abril de 2024).

La variación de niveles de CO (monóxido de carbono) en el periodo 2018-2024, muestran fluctuaciones marcadas, con varios picos que superan los 1.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada año, muy superior al límite anual de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual según la directiva europea 2008/50/CE (Figura 8). Durante los años 2018 y 2019, los picos más altos alcanzan valores cercanos a los 2.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando episodios críticos de contaminación por CO. En 2020, se observa una disminución significativa en los niveles de CO, coincidiendo con el periodo de restricciones durante la pandemia. A partir de 2021, los niveles de CO vuelven a aumentar, aunque sin llegar a los máximos de los primeros años.

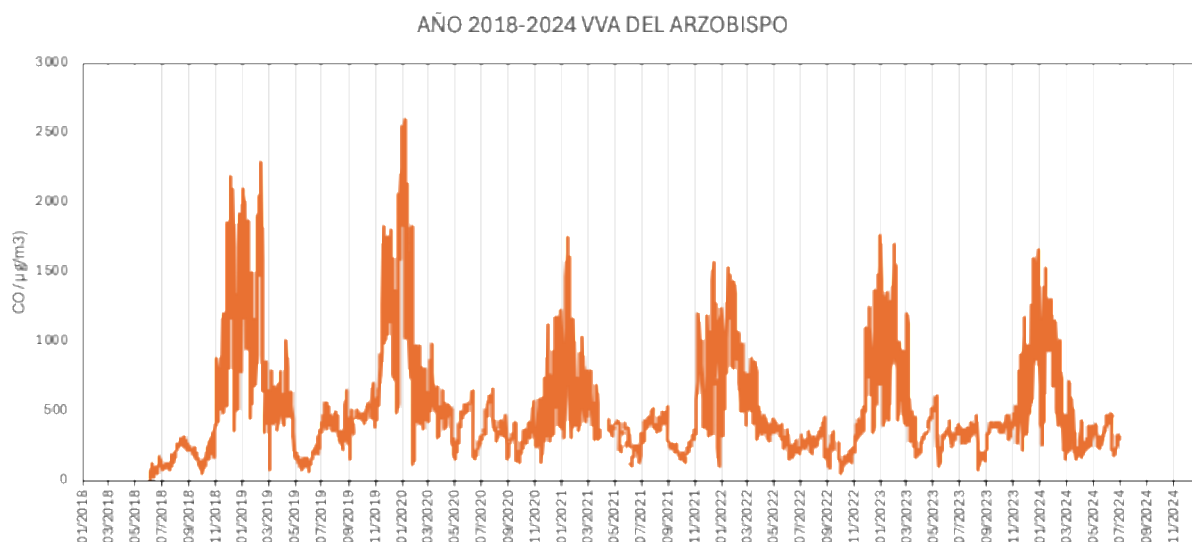


Figura 8. Variación temporal de CO.

Se observa un patrón de variación estacional claro en los niveles de CO, con concentraciones más altas durante los meses de invierno, especialmente de noviembre a febrero, y reducciones notables en los meses de verano. Esta tendencia podría estar vinculada al mayor uso de combustibles para calefacción en invierno, así como a una menor dispersión de contaminantes debido a las condiciones meteorológicas. Los meses más cálidos, de abril a septiembre, presentan niveles más bajos de CO, posiblemente debido a una mejor ventilación atmosférica y menor uso de fuentes emisoras. Este patrón de comportamiento coincide con la variación temporal de PM10.

La evolución promedio mensual de los niveles de PM10 y CO entre junio de 2018 y junio de 2024 en Villanueva de Arzobispo revela un comportamiento estacional en ambos contaminantes (Figura 9). Los niveles de PM10 alcanzan su punto máximo durante los meses de invierno, con valores cercanos a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que disminuyen notablemente en primavera y verano, con un mínimo en junio inferior a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera similar, el CO presenta concentraciones más altas en invierno, superando los $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en diciembre y enero, y desciende a menos de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre mayo y septiembre. Este patrón refleja el aumento de emisiones en los meses fríos, relacionado con el uso de calefacción, y una mayor dispersión de contaminantes durante el verano.

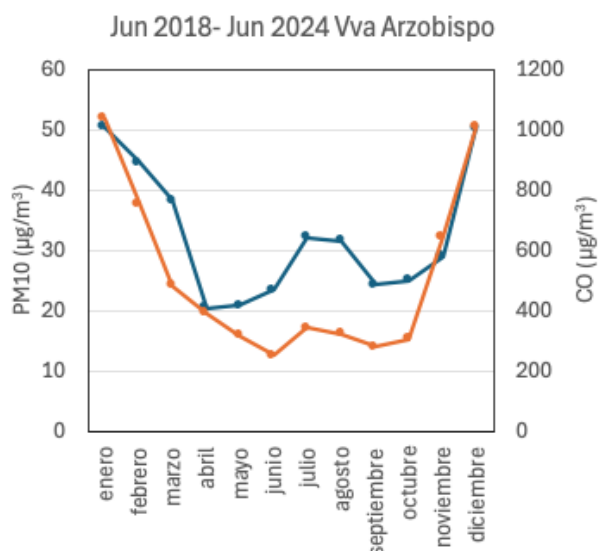


Figura 9. Evolución estacional promedio de los niveles de PM10 y CO (junio 2018 - junio 2024).

Según las tendencias observadas, las concentraciones de PM10 tienden a ser más altas durante la noche y las primeras horas de la mañana, con picos entre las 22:00 y las 03:00. Este comportamiento puede estar asociado con una menor dispersión atmosférica y el aumento de las emisiones nocturnas. Durante el día, los niveles de PM10 disminuyen, alcanzando los valores más bajos entre las 12:00 y las 15:00. Es importante destacar que a las 10:00, las concentraciones aún son elevadas, probablemente debido a la actividad matutina. A pesar de que disminuyen después de esta hora, el aire sigue cargado de partículas, y no es hasta el mediodía cuando se alcanzan las concentraciones más bajas (Figura 10).

El periodo 2018-2019 se destaca como el más contaminado en ambos momentos del día, con picos especialmente altos. A partir de 2019-2020, las concentraciones de PM10 muestran una clara tendencia a la baja, con el periodo 2021-2022 registrando los valores más bajos. Sin embargo, en los periodos 2022-2023 y 2023-2024, se observa un ligero aumento en las concentraciones, aunque no alcanzan los niveles críticos de años anteriores.

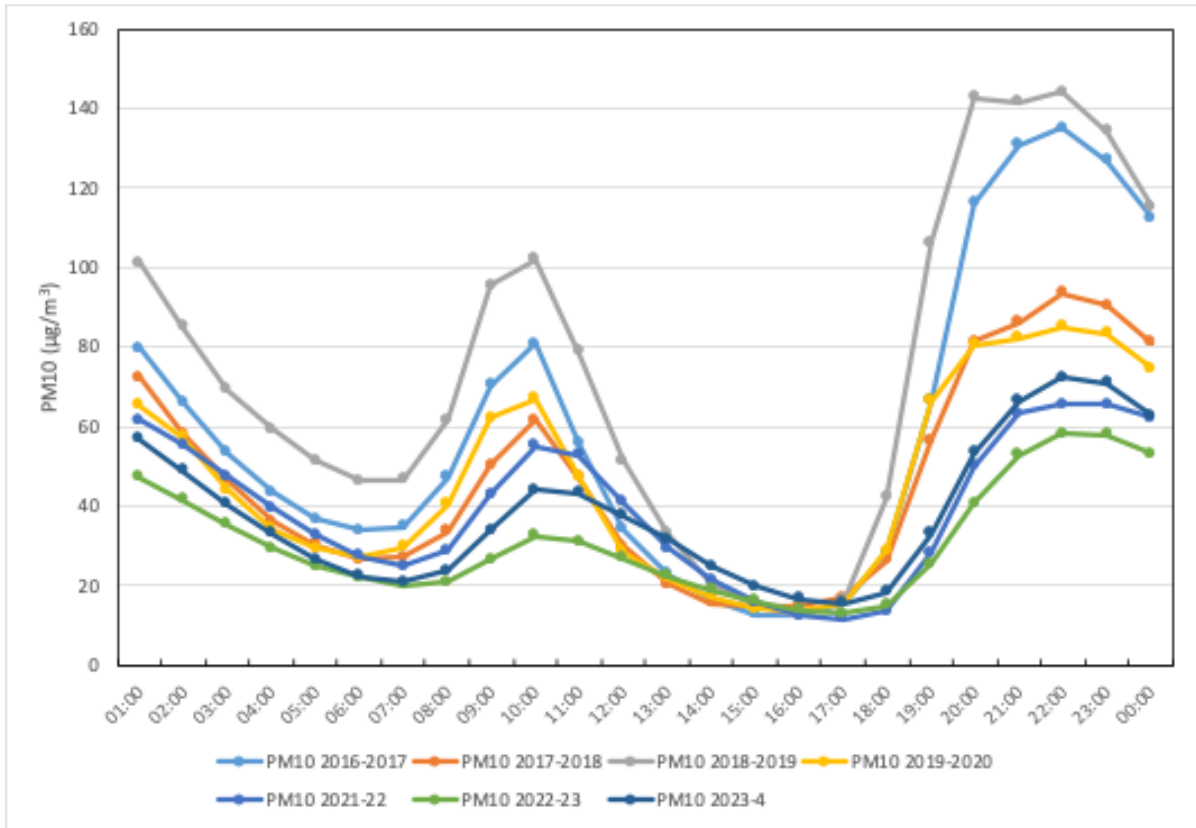


Figura 10. Comportamiento de PM10 a nivel horario desde el año 2016 hasta el 2024.

En resumen, las concentraciones de PM10 son más altas durante la noche, pero también se mantienen elevadas a las 10:00 AM con el inicio de la actividad en el municipio. A pesar de una tendencia general a la mejora en los últimos años, los datos más recientes sugieren un ligero repunte en los niveles de PM10, lo que subraya la necesidad de un seguimiento continuo de la calidad del aire (Figura 11).

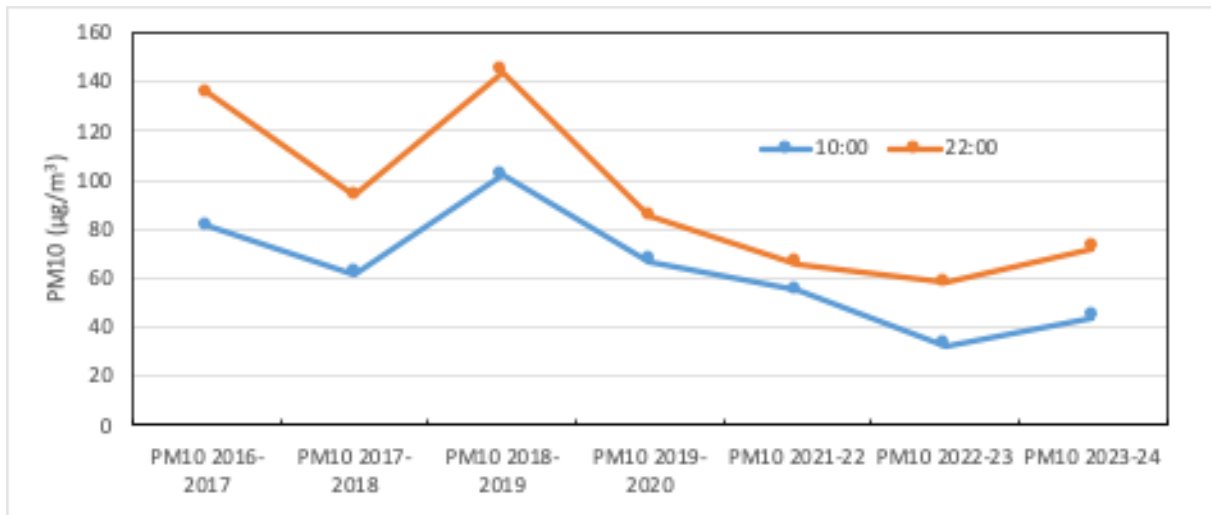


Figura 11. Promedios de niveles de PM10 horarios a 10h y 22h de diciembre y enero entre los años 2016 a 2024 en la estación de Villanueva del Arzobispo

4.2.- COMPOSICIÓN QUÍMICA

4.2.1. Distribución de los componentes químicos principales en PM10.

Se ha analizado un total de 181 filtros de PM10 entre los años 2021 a 2023, con una concentración media de 30.5 µg/m³ (Tabla 4).

Tabla 4. Composición química de PM10. Estación Villanueva del Arzobispo.

µg/m ³	Año 2021-2023			Año 2021	Año 2022	Año 2023
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Promedio	Promedio
nº filtros	181			62	59	60
PM10	30,5	103,1	4,5	33,4	30,8	27,1
Ctotal	7,3	55,2	0,5	8,2	6,5	7,2
OC	6,4	49,4	0,7	7,3	5,6	6,2
EC	1,2	5,8	<0.1	1,4	1,1	1,1
CO3=	4,1	30,3	0,2	4,4	4,6	3,4
SiO2	5,7	81,0	<0.1	5,3	6,6	5,1
Al ₂ O ₃	1,9	27,0	<0.1	1,8	2,2	1,7
Ca	2,0	13,6	<0.1	2,2	2,2	1,7
K	1,0	4,8	<0.1	1,1	1,0	0,9
Na	0,4	2,0	<0.1	0,5	0,5	0,3
Mg	0,5	4,0	<0.1	0,5	0,5	0,4
Fe	0,6	7,6	<0.1	0,6	0,7	0,4
PO ₄ ³⁻	0,1	0,3	<0.1	0,1	0,1	0,1
SO ₄ ²⁻	1,4	13,6	0,2	1,6	1,3	1,2
F-	0,0	0,1	<0.1	0,0	0,1	0,1
SO ₄ ^{2-ant}	1,3	13,4	0,2	1,5	1,2	1,1
SO ₄ ^{2-mar}	0,1	0,5	<0.1	0,1	0,1	0,1
NO ₃ ⁻	1,3	5,8	<0.1	1,4	1,5	1,2
Cl	0,4	3,1	<0.1	0,5	0,4	0,3
NH ₄ ⁺	0,2	4,1	<0.1	0,3	0,1	0,1
%						
Mineral	50,0					
Marino	6,8					
SIC	12,0					
OC	26,3					
EC	5,0					
ng/m³						
Li	0,6	4,8	0,0	0,6	0,6	0,6
Be	0,1	0,3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
B						
Sc	0,2	1,5	<0.1	0,2	0,2	0,2
Ti	51,2	522	<0.1	54,9	45,9	52,6
V	2,2	78,7	<0.1	1,9	1,8	3,1
Cr	1,8	12,9	<0.1	1,9	1,7	2,0
Mn	8,7	72,5	<0.1	10,4	7,5	8,0
Co	0,2	1,9	<0.1	0,2	0,2	0,2
Ni	1,8	20,3	<0.1	1,3	1,1	3,0
Cu	6,7	42,8	<0.1	7,3	7,3	5,6
Zn	17,0	140,5	<0.1	15,3	17,0	18,6
Ga	0,3	3,2	<0.1	0,3	0,3	0,3
Ge	0,2	1,6	<0.1	0,2	0,3	0,2
As	0,3	1,4	<0.1	0,3	0,3	0,3
Se	0,1	0,6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rb	1,5	8,6	<0.1	1,6	1,5	1,5
Sr	5,9	30,2	0,3	6,0	6,1	5,5
Y	0,5	3,8	<0.1	0,4	0,5	0,5
Zr	1,9	16,9	<0.1	1,0	2,1	2,7
Nb	0,2	2,0	<0.1	0,2	0,2	0,2
Mo	2,7	26,7	<0.1	1,7	2,2	4,3
Ag						
Cd	0,1	6,7	<0.1	0,2	0,2	<0.1
Sn	0,4	1,2	<0.1	0,4	0,4	0,4
Sb	0,3	3,7	<0.1	0,4	0,3	0,3
Cs	0,1	0,4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ba	10,5	67,4	<0.1	10,8	8,6	12,1
La	0,5	5,3	<0.1	0,5	0,5	0,5
Ce	1,0	11,1	<0.1	1,0	1,0	<0.1
Pr	0,1	1,2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Nd	0,4	4,5	<0.1	0,4	0,4	0,4
Sm	0,1	0,8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Eu	0,1	0,2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Gd	0,1	0,9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tb	0,0	0,1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Dy	0,1	0,7	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ho	0,0	0,1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Er	0,1	0,3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tm	0,0	0,1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Yb	0,1	0,3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Lu	0,0	0,1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Hf	0,1	0,4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ta	0,0	0,2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
W	0,2	3,4	<0.1	0,2	0,2	0,2
Tl	0,1	0,4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Pb	3,8	77,6	<0.1	4,4	4,6	2,4
Bi	0,3	43,4	<0.1	<0.1	0,8	<0.1
Th	0,2	1,4	<0.1	<0.1	0,2	0,2
U	0,1	0,8	<0.1	<0.1	<0.1	0,2

El componente principal es la materia mineral constituyendo el 50%, seguido por C orgánico (OC, 26%), compuestos inorgánicos secundarios (SIC, 12%), aerosol marino (7%) y C elemental (EC, 5%) (Figura 12). La máxima concentración de materia mineral ocurre en el año 2022 (52%), superior a los años 2021 y 2023 (49%) (Figura 12). Esto se debe a la mayor influencia de masas de aire norteafricanas que han impactado la zona de estudio durante el año 2022.

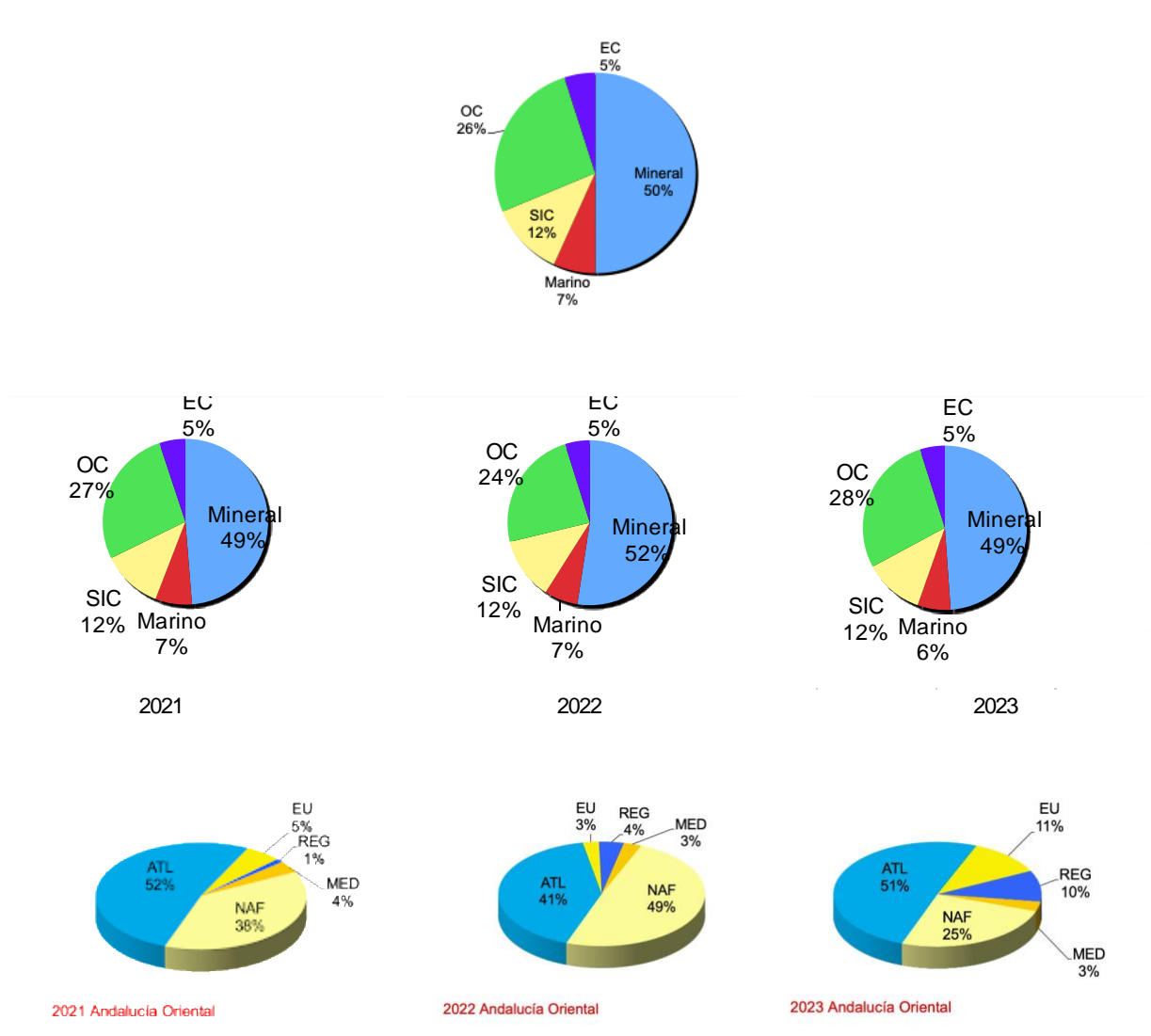


Figura 12. Promedio de la distribución de componentes químicos principales en PM10. Estación de Villanueva del Arzobispo. Distribución de componentes químicos principales en PM10 correspondientes a los años 2021, 2022 y 2023 respectivamente. Estación de Villanueva del Arzobispo. También se incluye la frecuencia de Intrusión de polvo sahariano en Villanueva del Arzobispo.

La materia mineral está formada por Al_2O_3 ($1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), K ($1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y PO_4^{3-} ($0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En los SIC, sulfato antropogénico ($1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) posee

una concentración igual al nitrato ($1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido por amonio ($0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En el aerosol marino se destaca Cl ($0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Na ($0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg ($0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y sulfato marino ($0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La relación Cl/Na es igual a 1.0, suponiendo un ligero exceso de Na. Carbono total posee una concentración de $7.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dominando C orgánico (OC, $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sobre C elemental (EC, $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Los elementos traza principales en PM10 son Cu ($6.7 \text{ ng}/\text{m}^3$), Zn ($17.0 \text{ ng}/\text{m}^3$), y Ti ($51.2 \text{ ng}/\text{m}^3$). Elementos considerados en la Directiva 2004/107/CE (Ni, As y Cd) poseen bajas concentraciones ($1.8 \text{ ng Ni}/\text{m}^3$, $0.3 \text{ ng As}/\text{m}^3$, $0.1 \text{ ng Cd}/\text{m}^3$), siendo inferiores a los límites objetivos descritos en la mencionada Directiva ($20 \text{ ng Ni}/\text{m}^3$, $6 \text{ ng As}/\text{m}^3$, $5 \text{ ng Cd}/\text{m}^3$). En relación a Pb, la concentración es baja ($3.8 \text{ ng Pb}/\text{m}^3$), y es inferior también al límite según la Directiva 2008/50/CE ($500 \text{ ng Pb}/\text{m}^3$) (Tabla 4).

En líneas generales se ha observado una leve disminución en la concentración media de PM10, pasando de $33.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2021 a $27.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023, pero esto no sugiere una mejora en la calidad del aire durante este período, ya que la diferencia es pequeña. En cuanto a la composición del PM10, la materia mineral es el componente predominante, representando aproximadamente el 50%. El carbono orgánico ocupa el segundo lugar, constituyendo entre el 26%, mientras que los compuestos inorgánicos secundarios (como sulfato, nitrato y amonio) representan alrededor del 12%. El aerosol marino, por su parte, constituye el 7%, y el carbono elemental el 5%.

A pesar de la leve reducción en la concentración total de PM10, la composición química relativa se ha mantenido estable a lo largo del tiempo, lo que indica que las principales fuentes de contaminación siguen siendo las mismas, aunque con una posible disminución en la intensidad de las emisiones. La presencia continua de compuestos inorgánicos secundarios, como sulfato y nitrato, señala la persistencia de las fuentes emisoras de estos contaminantes, los cuales suelen formarse a partir de reacciones químicas en la atmósfera, lo que implica que los precursores de estas sustancias siguen presentes en el aire.

Aunque el aerosol marino y el carbono elemental representan fracciones menores del PM10, su presencia constante sugiere fuentes estables de estos componentes. El aerosol marino podría estar vinculado a la ubicación geográfica, mientras que el carbono elemental suele asociarse con emisiones derivadas de procesos de combustión.

CO_3^-

SiO_2

4.2.2. Evolución temporal de los componentes químicos principales y traza de PM10.

El análisis de la evolución temporal de los componentes químicos en PM10 en Villanueva del Arzobispo revela patrones complejos, afectados tanto por factores ambientales como por actividades humanas (Figura 13).

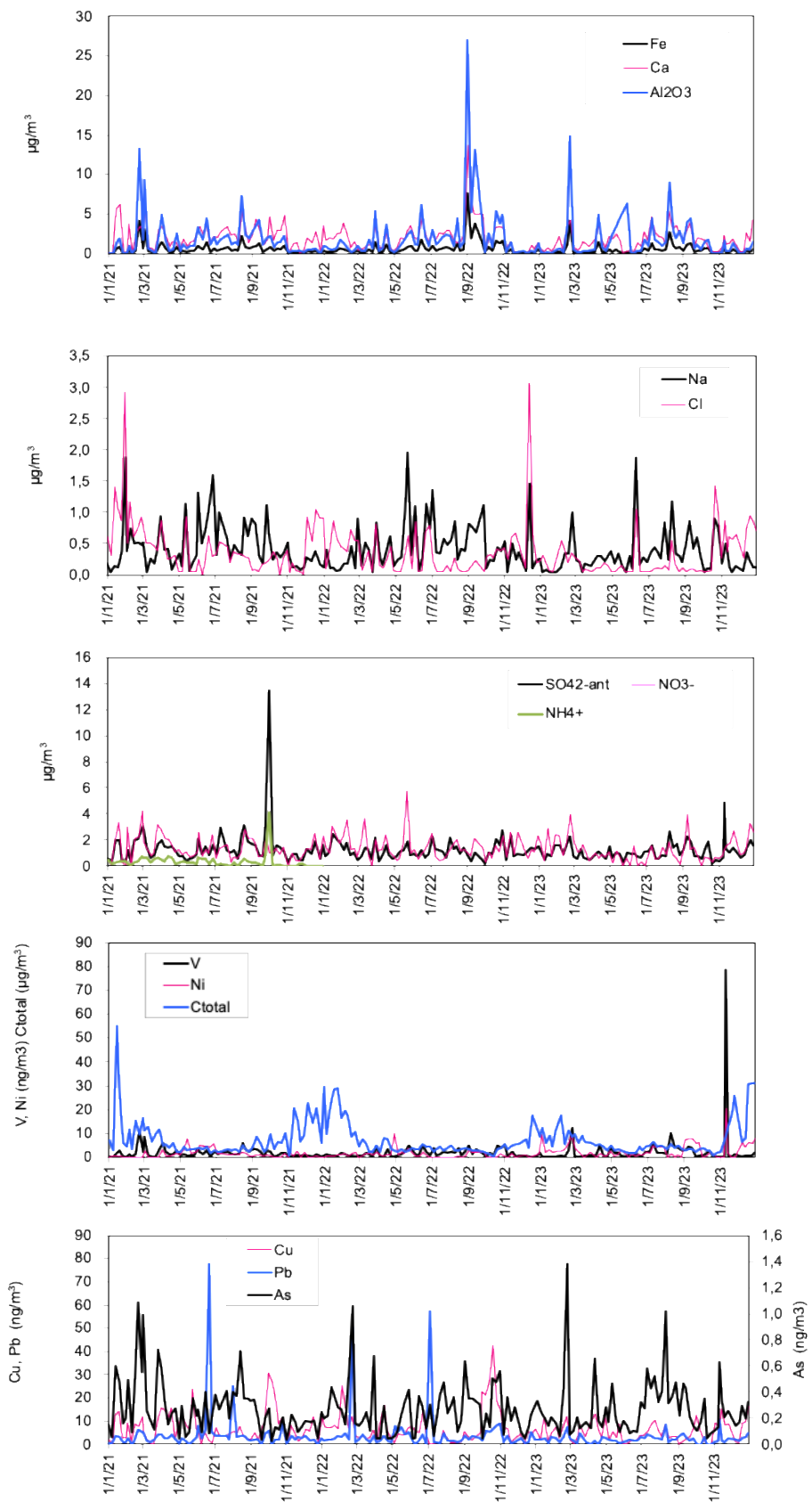


Figura 13. Evolución temporal de componentes químicos mayoritarios y traza en PM10. Estación Villanueva del Arzobispo.

La materia mineral, representado por hierro, calcio y óxido de aluminio, muestra una alta variabilidad. En 2021, estos componentes tuvieron picos esporádicos y variaciones significativas pero en el 2022 se observaron los mayores picos entre los meses de agosto y setiembre, alcanzando una máxima de 7.6 ug/ m³ para el hierro, 13.6 ug/ m³ para el calcio y 27.0 ug/ m³ para el óxido de aluminio. Estos picos de concentraciones podrían indicar la presencia de fuertes fuentes de emisión en ese periodo específico. En 2023, se observó una mayor estabilidad en sus concentraciones, aunque hubo incrementos notables en algunos meses.

Los componentes de aerosol marino, como el sodio y el cloro, muestran fluctuaciones estacionales, con picos en los meses de invierno y verano.

Los compuestos inorgánicos secundarios (SIC), como el sulfato, nitrato y amonio, también presentaron picos elevados en varios periodos, especialmente durante los meses fríos. En 2021, estos compuestos mostraron alta variabilidad, luego se observa algunas disminuciones en magnitud de los picos con un leve repunte en el 2023.

El carbono total presentó sus picos de máxima concentraciones en los meses de invierno, específicamente en enero. La máxima se dio en el 2021 con 55.2 ug/ m³. Este aumento de concentración en el mes de enero se observa también en los siguientes años pero con una leve disminución en magnitud.

Los metales traza, como el vanadio, níquel, cobre, plomo y arsénico, muestran variaciones significativas a lo largo de los años. El vanadio presenta picos notables en 2021 y 2023, alcanzando su concentración máxima en noviembre de 2023 con 80 ng/m³, lo cual podría considerarse un valor atípico. El níquel tiene picos menos frecuentes, alcanzando su máximo en noviembre de 2023 con 20.3 ng/m³, similar al vanadio. El cobre experimentó fluctuaciones abruptas, con su pico más alto en 2022, alcanzando 42.8 ng/m³. El plomo mostró picos esporádicos, con una concentración máxima de 77.6 ng/m³ en junio de 2021, seguido de una tendencia decreciente. El arsénico se mantuvo estable a lo largo del tiempo, con sus máximos observados en febrero y agosto durante los tres años.

En general, los datos de todos los componentes químicos en PM₁₀ revelan una considerable variabilidad anual, influenciada por factores estacionales, cambios en las fuentes de emisión y variaciones meteorológicas. Algunos componentes han mostrado una tendencia hacia la estabilización o una disminución en sus concentraciones máximas a lo largo de los tres años analizados. Los picos de concentración indican la presencia de fuentes de emisión intermitentes o episodios de contaminación específicos, lo que subraya la importancia de un monitoreo continuo y detallado.

La dinámica compleja de la contaminación en Villanueva del Arzobispo destaca la necesidad de estrategias efectivas de mitigación y control, basadas en una comprensión profunda de las tendencias y patrones de los contaminantes. Este

análisis subraya la relevancia del monitoreo detallado para desarrollar políticas ambientales y de salud pública que protejan a la comunidad local y al medio ambiente.

4.3. CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

Entre los años 2021 y 2023 se han identificado 5 fuentes principales de partículas en suspensión PM10 que se clasifican de la siguiente manera según su contribución y composición química (Figura 14).

1. Mineral 1: Al+Fe+Mn+Ti+fosfato+V+Rb+Sr+Ba.
2. Marino envejecido: Na+Ni+Zn+Ba+nitrato+Cl.
3. Combustión: K+Cu+Rb+Cl+OC+EC.
4. Regional: Na+fosfato+V+Zn+Pb+sulfato+ amonio.
5. Mineral 2: Ca+Mg+fosfato+Ba.

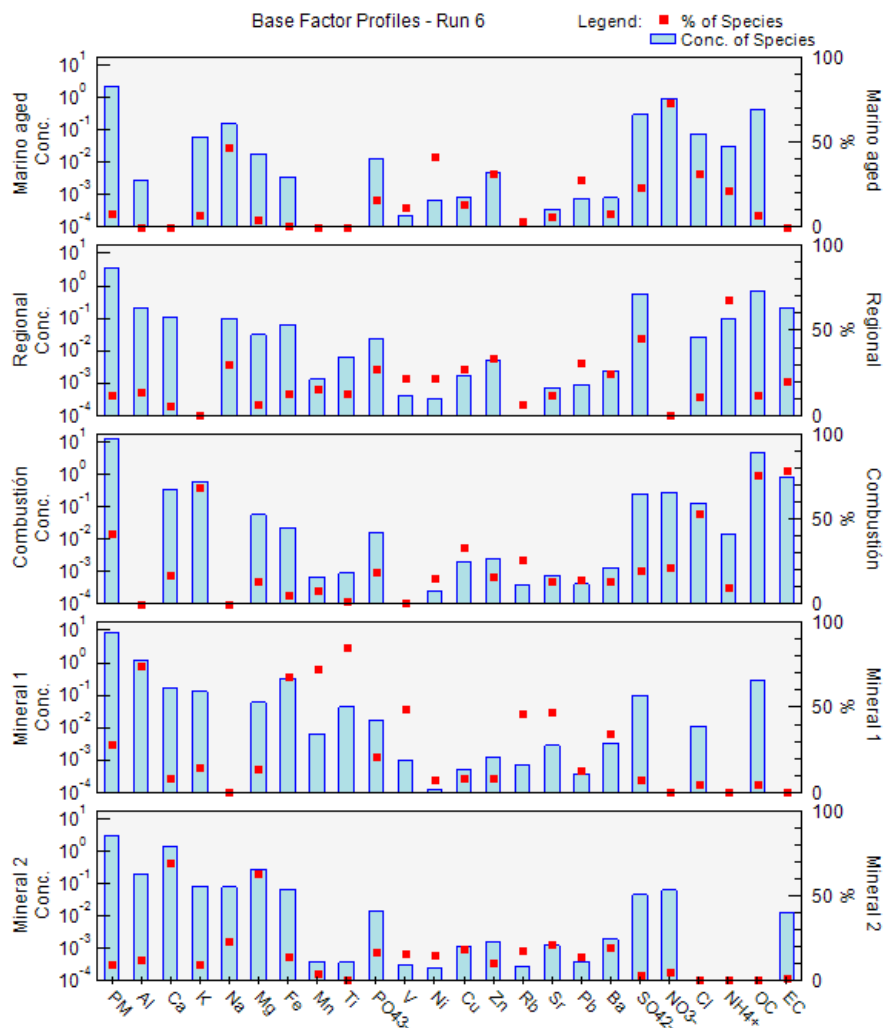


Figura 14. Perfil químico de las fuentes de PM10 (expresado como contribución de elementos mayores y traza en µg/m³)

La contribución media de cada una de estas fuentes en PM10 y evolución temporal se presenta en la Tabla 5 y Figura 15.

Tabla 5. Resumen de contribución media de las fuentes identificadas a la concentración media de PM10 en la estación de Calidad del aire de Villanueva del Arzobispo en el año 2021-2023.

PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Villanueva del Arzobispo	Factor 1 Marino aged	Factor 2 Regional	Factor 3 Combustión	Factor 4 Mineral 1	Factor 5 Mineral 2	Total
Año 2021	2,4	4,3	14,0	9,2	3,0	33,0
Año 2022	2,8	3,2	10,5	7,8	3,5	27,8
Año 2023	2,0	3,1	11,8	8,0	2,1	27,0
Promedio 2021-2023	2,4	3,6	11,4	8,5	2,9	28,9

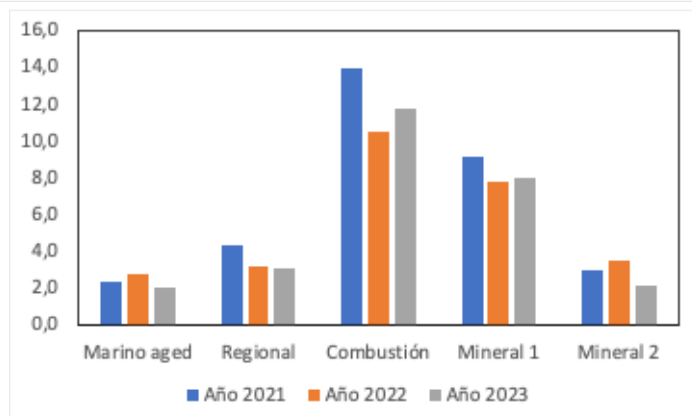
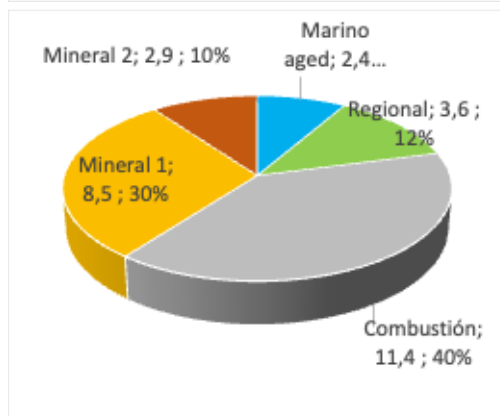
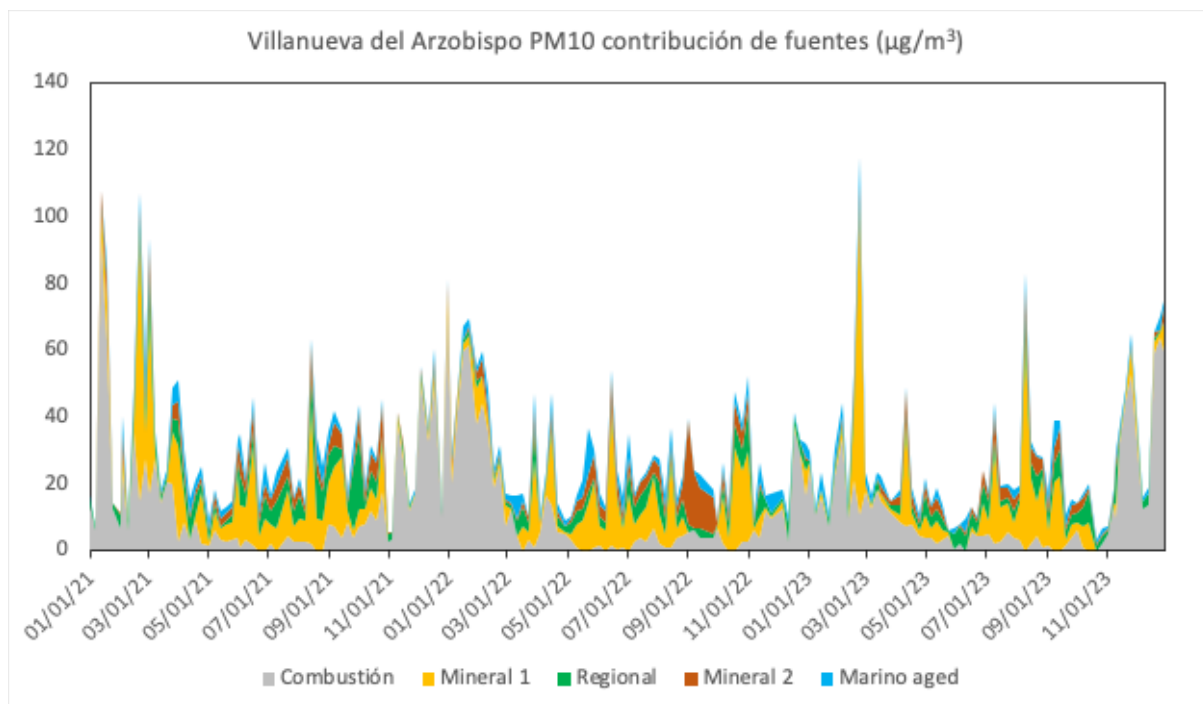


Figura 15. Contribución media de las fuentes identificadas a la concentración media de PM10 en la estación de Calidad del aire de Villanueva del Arzobispo en el año 2021-2023.

A continuación se describen las características más sobresalientes de cada fuente:

-Combustión: es el factor que más contribuye a la concentración de PM10 en todos los años, con un promedio de 11.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque ha disminuido de 14.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2021 a 10.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022 y 11.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023, sigue siendo una fuente significativa de PM10.

El factor de combustión identificado en el análisis de PM10 en Villanueva del Arzobispo se compone de varios elementos y compuestos que son indicadores claros de procesos de combustión. Los principales componentes de este factor son:

- **Potasio (K):** Elemento comúnmente asociado con la quema de biomasa. Su presencia en altos niveles indica la combustión de materia orgánica, como madera y restos vegetales.
- **Cobre (Cu):** Usualmente relacionado con la combustión de materiales que contienen cobre, como ciertos combustibles fósiles y residuos industriales.
- **Rubidio (Rb):** Un elemento traza que también puede estar presente en la biomasa y su combustión.
- **Cloro (Cl):** Indicativo de procesos de combustión, especialmente en áreas cercanas al mar donde el cloro puede ser transportado por aerosoles marinos y luego incorporarse en procesos de combustión.
- **Carbono Orgánico (OC) y Carbono Elemental (EC):** Estos compuestos son productos directos de la combustión incompleta de materia orgánica y combustibles fósiles. OC se refiere a partículas orgánicas, mientras que EC, a menudo denominado negro de carbono, es un marcador específico de la quema de combustibles fósiles y biomasa.

Se observaron varios picos de concentración durante los meses de invierno, sobre todo en el mes de enero, lo que sugiere un aumento en la quema de biomasa para calefacción durante estos periodos. Las concentraciones más altas en invierno estando relacionadas con el uso intensivo de sistemas de calefacción domésticos.

-Mineral: En conjunto contribuye un promedio del 40%, igualando así al factor combustión. El promedio de ambos factores fue de 11.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque hay variaciones anuales, su contribución combinada sigue siendo considerable.

Fuente Mineral 1: Compuesta por elementos como aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn), titanio (Ti), fosfato, vanadio (V), rubidio (Rb), estroncio (Sr) y bario (Ba). Esta fuente está asociada principalmente con materia mineral y presenta contribuciones significativas de estos elementos, sugiriendo una

fuerte influencia por la entrada de masas de aire norteafricanas con importante concentración de partículas en suspensión y la resuspensión de polvo mineral.

Fuente Mineral 2: Caracterizada por calcio (Ca), magnesio (Mg), fosfato y bario (Ba). Similar a la Fuente Mineral 1, esta fuente está dominada por elementos típicos de la composición del suelo de la zona de estudio (Subbética).

-Marino: Contribuye en promedio $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al PM10. Es un factor que se muestra bastante constante y es el más bajo de todos, sin embargo, su análisis es relevante debido a lo siguiente:

Compuesto por sodio (Na), níquel (Ni), zinc (Zn), bario (Ba), nitrato (NO_3^-) y cloro (Cl). Estos elementos del aerosol marino presentan interferencias con compuestos antropogénicos, reflejando la influencia de la brisa marina que transporta sal y otras partículas desde el mar, combinada con la contaminación de origen humano.

Los picos de este factor suelen coincidir con condiciones meteorológicas que favorecen el transporte de aerosoles marinos hacia el interior, como vientos fuertes provenientes del mar.

-Regional: Compuesto por sodio (Na), fosfato, vanadio (V), zinc (Zn), plomo (Pb), sulfato y amonio. Esta fuente aporta un promedio total de $3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al PM10 y refleja una mezcla compuestos inorgánicos secundarios (sulfato y amonio) procedentes de grandes centros de combustión (centrales térmicas y refinerías de petróleo) situadas a larga distancia.

La suma de contribuciones es $28.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, muy lejos de por lo tanto, para alcanzar el objetivo según la futura directiva. Teniendo en cuenta que la carga neta por material particulado de origen sahariano fue en el periodo de estudio de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sería necesario reducir $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la fuente de combustión para el cumplimiento del límite anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, suponiendo el 25% de esta fuente.

En la actualidad se desarrolla el Plan de Calidad de Villanueva del Arzobispo de la Junta de Andalucía, en el cual se tiene en cuenta distintas medidas relacionadas con la fuente de combustión, destacándose la optimización del combustible empleado en las estufas (biomasa certificada), prohibición de chimeneas tradicionales y quema de rastrojos, uso de estufas homologadas y aplicación de alternativas a la combustión de biomasa a través de estufas eléctricas y de gas. Todas estas medidas siguen siendo eficaces para reducir las emisiones relacionadas con la combustión de la biomasa y alcanzar el objetivo de la directiva europea del 2030.

5.- CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Master se ha puesto de manifiesto la importante contribución de fuentes de la combustión de biomasa derivada de estufas domésticas en el Municipio de Villanueva del Arzobispo.

Aunque en los últimos años no se ha incumplido el límite anual y valor límite diario según la Directiva Europea 2008/50/CE, el valor promedio anual de PM10 obtenido entre los años 2021 a 2023 ($28.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se superará en la futura directiva del 2030.

El estudio de contribución de fuentes aplicando PMF5 de US-EPA a la composición química de PM10 proponer una reducción del 25% de la contribución de quema de biomasa.

Se recomienda mantener las medidas reflejadas en el Plan de Calidad del Aire de Villanueva del Arzobispo hasta el año 2030, las cuales tienen en cuenta la optimización del combustible empleado en las estufas (biomasa certificada), prohibición de chimeneas tradicionales y quema de rastrojos, uso de estufas homologadas y aplicación de alternativas a la combustión de biomasa a través de estufas eléctricas y de gas.

6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMA. (2024) Europe's air quality status 2024. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024>

Agencia Andaluza de la Energía (2020) La bioenergía en Andalucía. 55pp. https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/3_2_006_8_20_LA_BIOENERGIA_EN_ANDALUCIA.PDF

Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Perez, N., and Hopke, P. K.: Quantifying Road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2, Atmos. Environ., 43, 2770–2780, 2009.

Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (2021) Plan municipal de mejora de la calidad del aire en Villanueva del Arzobispo: Propuesta de contenidos elaborada por el Servicio de Calidad del Aire de la Dirección General de Calidad Ambiental y Cambio Climático, a petición del Excmo. Ayuntamiento de Villanueva del Arzobispo (Jaén). Junta de Andalucía. 91 pp <https://villanuevadelarzobispo.es/wp-content/uploads/2021/04/Plan-municipal-de-mejora-de-la-calidad-del-aire-en-Villanueva-del-Arzo.pdf>

Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural (2023) Primera Estrategia andaluza para el sector del olivar 2023- 2027. 53 pp. https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2023-11/Doc_resumen_%2016112023.pdf

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2016). Caracterización de material particulado atmosférico en Villanueva del Arzobispo (Jaén): niveles, composición química y origen. Informe Técnico. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/atmosfera/planes_mejora/pca_villanueva/INFORME_%20MATERIAL_PARTICULADO_VILLANUEVA_ARZOBISPO2016.pdf

EU (2011) Commission staff working paper establishing guidelines for demonstration and subtraction of exceedances attributable to natural sources under the Directive 2008/50/CE on ambient air quality and cleaner air for Europe. 37 pp. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Directrices%20Comisión-SEC%202008%20final-en_tcm30-186523.pdf

EU (2024) The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. <https://ec.europa.eu/newsroom/know4pol/items/664852>

IDAEA-CSIC et al. (2013) PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE EPISODIOS NATURALES DE PM10 Y PM2,5, Y LA DEMOSTRACIÓN DE CAUSA EN LO REFERENTE A LAS SUPERACIONES DEL VALOR LÍMITE DIARIO DE PM10

40 pp. <https://mediambient.gva.es/documents/20549779/92789116/40539-6000-Metodolog%C3%ADa+para+episodios+naturales-rev+final+enero+2010/f2f11305-c3d9-4d47-adc4-6b15c55f73e3>

IECA (2024) Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (s.f.). Ficha del municipio: Villanueva de Arzobispo. Junta de Andalucía. Web link 3.09.2024 , de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/ficha.htm?mun=23097>

OMS (2005) OMS Guías de Calidad del Aire. Actualización Mundial 2005. 29pp. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/52697/OMSGuia2005_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

OMS (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 273 pp. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>

Paatero, P., & Tapper, U. (1994). Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics*, 5(2), 111-126.

Parlamento Europeo (2023). Resolution on air quality in the European Union (TA-9-2023-0318). Web link: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0318_EN.html

Pérez-Pastor R, Salvador P, García Alonso S, Alastuey A, García dos Santos S, Querol X, Artíñano B (2020) Characterization of organic aerosol at a rural site influenced by olive waste biomass burning. *Chemosphere* 248:125896,

Polissar, A. V., Hopke, P. K., Paatero, P., Malm, W. C., & Sisler, J. F. (1998). Atmospheric aerosol over Alaska: 2. Elemental composition and sources. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D15), 19045-19057.

Querol X, Alastuey A, de la Rosa JD, Sánchez de la Campa A, Plana F, Ruiz CR 2002. Source apportionment analysis of atmospheric particulates in an industrialised urban site in southwestern Spain *Atmospheric Environment* 36, 3113-3125.

Salvador, P., Artíñano, B., Becerril-Valle, M., Coz, E., García-Alonso, S., & Pérez-Pastor, R. (2016). Caracterización de material particulado atmosférico en Villanueva del Arzobispo (Jaén): niveles, composición química y origen

Sánchez de la Campa A, Salvador P, Fernández-Camacho R, Artíñano B, Coz E, Márquez G, Sánchez Rodas D, de la Rosa JD (2018) Characterization of biomass burning from olive grove areas: a major source of organic aerosol in PM₁₀ of Southwest Europe. *Atmospheric Research* 199: 1-13.