

DOI: 10.24275/uama.6734.13560



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD  
AZCAPOTZALCO

Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales

**Determinación de  $^{14}\text{C}$  en aerosoles atmosféricos en el Puerto de Manzanillo  
Colima: Influencia de combustibles fósiles**

Tesis para obtener el grado de

**Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambientales**

**Presenta:**

Ing. Ana Karina Hernández Rangel

**Asesoras:**

Dra. María Elba Ortiz Romero Vargas

Dra. Corina Solís Rosales

Enero, 2026

## Agradecimientos

Al Dr. Javier Miranda Martín del Campo y al Fis. Juan Carlos Pineda Santamaría por la asesoría y los análisis realizados por fluorescencia de rayos X

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN107323 por el financiamiento otorgado para la realización del trabajo de campo.

Al Físico Arcadio Huerta y al Sr. Sergio Martínez y por su asistencia técnica.

Esta investigación fue parcialmente financiada por las becas SECIHTI

Apoyos LNC-2023-58.

A la Dra. María Elba Ortiz Romero Vargas por el apoyo recibido durante el trabajo de investigación y realización de esta tesis.

A la Dra. Corina Solís Rosales por permitirme llevar a cabo el proyecto en el IFUNAM y las aportaciones a esta tesis.

A los Dres. Harry Álvarez Ospina y Brenda Liz Valle Hernández por formar parte de mi comité tutorial, guiándome con sus recomendaciones y sugerencias.

Al Dr.

A la UAM por darme la oportunidad de continuar con mi formación durante estos años de maestría.

A todos los doctores y maestros que me enseñaron con paciencia en mi formación como maestra.

## Dedicatoria

*Para mis hijos Sarepta Zarahemla Alvarado Hernández y Omner Sadrac Alvarado Hernández que me apoyaron en este paso de mi formación académica siendo pacientes y comprensivos en las noches de desvelo.*

*Para mi hija adoptiva Evelin Cruz Martínez que sin su apoyo no habría logrado concluir esta maestría.*

*A mi madre María del Pilar Rangel Guerrero que siempre me impulso a obtener mayor conocimiento y preparación en esta vida, aunque ya no esté presente.*

## Contenido:

Agradecimientos .....	2
Dedicatoria .....	3
Contenido: .....	4
Índice de Figuras: .....	6
Resumen .....	8
1 Introducción .....	10
2 Marco teórico.....	12
2.1 Aerosoles carbonáceos .....	12
2.1.1 Composición y fuentes emisoras.....	14
2.1.2 PM <sub>2.5</sub> , efectos en la salud y el ambiente .....	16
2.2 Carbono moderno y carbono fósil.....	20
2.2.1 Relevancia del carbono en la atmósfera .....	20
2.2.2 Formación y reparto del <sup>14</sup> C .....	21
2.3 Espectrometría de masas con aceleradores y fluorescencia de rayos X.....	22
2.3.1 Espectrometría de masas con aceleradores .....	22
2.3.2 Fluorescencia de rayos X.....	25
2.4 Modelos de receptores .....	26
2.5 Puertos marítimos como fuentes de contaminación .....	30
2.6 Puerto de Manzanillo, Colima .....	31
3 Estado del arte .....	33
4 Justificación.....	37
5 Hipótesis .....	39
6 Objetivos .....	39
6.1 General.....	39
6.2 Particulares .....	39
7 Metodología.....	40
7.1 Metodología de muestreo de PM <sub>2.5</sub> .....	41
7.2 Protocolo de muestreo .....	42

7.3	CT en los aerosoles .....	44
7.4	Conversión del carbono a grafito para el análisis de <sup>14</sup> C.....	45
7.5	Análisis por AMS y cuantificación de <sup>14</sup> C.....	47
7.6	Fluorescencia de rayos X.....	49
7.7	Meteorología .....	50
7.8	Modelo de receptores .....	51
8	Resultados y análisis .....	52
8.1	Muestreo .....	52
8.2	Análisis meteorológico .....	54
8.3	PM <sub>2.5</sub> .....	54
8.4	Carbono Total .....	56
8.5	Carbono fósil y carbono biogénico.....	56
8.6	Comparación con otros puertos marítimos y zonas urbanas.....	59
8.7	Fluorescencia de rayos X.....	60
8.8	Modelo de receptores .....	67
9	Conclusiones.....	72
10	Referencias bibliográficas .....	75

## Índice de Figuras:

Figura 1. Procesos clave de los aerosoles carbonáceos durante su ciclo de permanencia en la atmósfera (Massabò y Prati, 2021). .....	12
Figura 2. Dinámica del comportamiento de los aerosoles en la atmósfera (izquierda) y distribución de acuerdo con el número de partícula por $\text{cm}^3$ (derecha) (Pryor et al., 2015). .....	13
Figura 3. a) Composición de un aerosol típico; b) composición promedio de aerosoles muestreados en Europa en verano; c) Composición promedio obtenida de los océanos Atlántico e Índico; d) composición de aerosoles muestreados en el centro industrial nacional de cerámica arquitectónica en el este de China .....	15
Figura 4. Entrada de $\text{PM}_{2.5}$ al tracto respiratorio y estación en los alveolos (Hu et al., 2023). .....	18
Figura 5. Alteraciones en los diferentes sistemas debido a las $\text{PM}_{2.5}$ (Chanda et al., 2024) .....	18
Figura 6. Diversas enfermedades cardiovasculares relacionadas con las $\text{PM}_{2.5}$ (Chanda et al., 2024). .....	19
Figura 7. Esquema general de un AMS (Jull y Burr, 2013). .....	23
Figura 8. Principio de fluorescencia de rayos X (Bruker, 2025). .....	25
Figura 9. Buque con carga de contenedores en el puerto de Manzanillo, Colima. Autoría propia. ..	32
Figura 10. Diagrama de la metodología a seguir (Elaboración Propia). .....	40
Figura 11. Muestreador de alto volumen (lado izquierdo) y muestreador ARA (lado derecho), utilizados en la recolección de muestras. Elaboración propia. .....	42
Figura 12. Ubicación del punto de muestreo y el puerto de Manzanillo, Colima. Elaboración propia. .....	43
Figura 13. Cambio de filtros de Hi-Vol (a y b) y ARA (c y d). Elaboración propia. .....	44
Figura 14. Analizador elemental (AE). Elaboración propia. .....	44
Figura 15. Esquema del proceso de obtención de $\text{CO}_2$ en el analizador de elementos (Aragón, 2014). .....	45
Figura 16. Grafitizador AGEIII (Instituto de Física de la UNAM). .....	46
Figura 17. Diagrama correspondiente al sistema de AMS HVEE 1MV (en el inciso a se muestra el esquema general del AMS y en el inciso b se observa la constitución física del AMS), Instituto de Física de la UNAM. .....	47
Figura 18. Del lado izquierdo se observa el prensador de las muestras de grafito para ser introducidas en el AMS. Del lado derecho se observan los cátodos y porta cátodos (elaboración propia). .....	48
Figura 19. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X, del laboratorio de aerosoles en el Instituto de Física de la UNAM. .....	50
Figura 20. Distancia entre el punto de muestreo, el puerto, la planta peletera y termoeléctrica de Manzanillo. Elaboración propia. .....	53
Figura 21. Rosa de vientos de Manzanillo, elaboración propia .....	53
Figura 22. Climatología de la dirección del viento a 10 m de altura, de los meses de mayo, junio y julio de los últimos 30 años (1993-2023) con base de datos de cada hora de ERA5, para Manzanillo. (Hernández et al, 2026). .....	54
Figura 23. Comportamiento de la concentración de la $\text{PM}_{2.5}$ en filtros de teflón durante los días de muestreo. Elaboración propia. .....	55
Figura 24. Rosa de vientos de los días 7 y 17 de junio de 2024. Elaboración propia. .....	58
Figura 25. Variación de carbono fósil y carbono moderno durante el muestreo. Elaboración propia .....	58
Figura 26. Concentraciones por día de los elementos presentes en los filtros de teflón. Elaboración propia. .....	65

Figura 27. Contribución en % de los elementos a cada uno de los 4 factores obtenidos en el modelo de receptores PMF. Donde el factor 1 es de color rojo, el factor 2 es verde, el factor 3 es azul y el factor 4 es amarillo. Fuente: elaboración propia..... 68

Figura 28. Porcentaje de influencia de cada factor obtenido en el modelo de receptores PMF. Elaboración propia. .... 69

## Resumen

La contaminación por partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) puede ser causada por la actividad portuaria llegando a representar una problemática tanto ambiental como de salud, por lo que es de suma importancia su estudio a nivel local, regional y global. Particularmente en el puerto de Manzanillo, Colima debido a que constituye una de las zonas con mayor actividad portuaria, ya que se considera uno de los puertos con mayor afluencia de cargueros que llegan de diversas partes de Asia, Estados Unidos y Canadá, aunado a las operaciones industriales que se llevan a cabo en la zona. En este contexto, la identificación de las fuentes de origen de los contaminantes es esencial para evaluar los impactos ambientales y de salud pública que están asociados a la misma.

Por medio de este estudio se buscó determinar la proporción de carbono fósil y biogénico presente en los aerosoles atmosféricos en el puerto de Manzanillo, por medio de la medición de la fracción de  $^{14}C$ . Esta determinación permite separar la contribución de carbono de origen antropogénico (como la quema de combustibles fósiles) y natural (biomasa), permitiendo obtener información relevante para la formulación de políticas ambientales y estrategias de control de emisiones en zonas portuarias de México.

La metodología empleada fue a través de un muestreo de aerosoles en la fracción  $PM_{2.5}$  llevado a cabo durante junio de 2024. Las muestras se recolectaron en filtros de teflón y cuarzo, usando un muestreador ARA y HI-Vol. Las muestras fueron analizadas mediante fluorescencia de rayos X (FRX), para la identificación de elementos traza, y espectrometría de masas con aceleradores (AMS) para la cuantificación del  $^{14}C$ . Posteriormente se aplicaron dos modelos de receptores (PCA y PMF) para identificar las posibles fuentes de origen de los contaminantes y su contribución relativa en la composición de las  $PM_{2.5}$ .

El promedio de las  $PM_{2.5}$  durante el mes de junio fue de  $10.61 \mu g/m^3$ ; en cuanto al carbono total (CT) estuvo en el rango de  $2.4$  y  $5.8 \mu g/m^3$ , mientras que la fracción de  $^{14}C$  ( $F^{14}C$ ) tuvo un promedio de  $0.62 \pm 0.01$ . El carbono biogénico varió entre  $45\%$  y el  $81\%$ , mientras que el carbono de origen fósil estuvo entre el  $19\%$  y  $55\%$ ; lo

cual indica que el sitio cuenta con mayor aportación de fuentes de origen biogénico. Los modelos de receptores permitieron determinar 4 fuentes de origen de los contaminantes; través del modelo PMF se obtuvieron las fuentes: arena, aerosoles marinos, quema de biomasa y combustibles fósiles. En el modelo PCA se obtuvieron: quema de biomasa, arena, quema de combustibles fósiles y procesos industriales.

Por lo antes mencionado, se puede concluir que el uso de  $^{14}\text{C}$  como trazador isotópico permitió diferenciar el origen del carbono de origen biogénico y fósil, dando una idea de las fuentes de contaminación en el puerto de Manzanillo. Mostrando que el sitio presenta mayor influencia de carbono de origen biogénico; sin embargo, debido a que el muestreo se llevó a cabo en la estación húmeda, se deben considerar muestreos en otras épocas del año.

# 1 Introducción

La contaminación por partículas atmosféricas (PM) debido al transporte marino es un problema ambiental significativo con diversas implicaciones. Para combatirla, se requiere un enfoque polifacético que involucre regulaciones estrictas, avances tecnológicos y cooperación internacional. Los barcos emiten PM principalmente a través de la quema de combustibles fósiles, especialmente el combustóleo y diésel pesado, que contienen altos niveles de azufre. Las emisiones de PM están constituidas en mayor medida por aerosoles carbonáceos, los cuales están compuestos principalmente por carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC). Estos componentes pueden encontrarse tanto en la fracción fina (PM<sub>2.5</sub>, partículas con un diámetro aerodinámico de 2.5 micrómetros o menos), como en la fracción gruesa (PM<sub>10</sub>, partículas con un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros o menos). Estas partículas también pueden estar constituidas por una mezcla de metales pesados, sulfatos, nitratos, carbono orgánico e inorgánico, dependiendo de las fuentes de emisión y procesos ocurridos en la atmósfera (Perron et al., 2010; SEMARNAT, 2024).

Los aerosoles atmosféricos cuentan con numerosos estudios globales, regionales y locales sobre el efecto que tienen las diferentes fuentes emisoras de PM, tales como las actividades industriales, de transporte, re-suspensión del suelo, etc. (Buseck y Schwartz, 2013). También existen modelos teóricos de emisión y de recepción a partir de la composición de las partículas suspendidas en la atmósfera que permiten modelar su dinámica y elucidar sus posibles fuentes de origen (Perron et al., 2010). Al analizar el carbono radiactivo (radiocarbono o <sup>14</sup>C, con una vida media  $t_{1/2}=5700 \pm 30$  años) en aerosoles se obtiene información sobre el origen de las partículas atmosféricas; permite hacer una separación entre fuentes de origen fósil y no fósil (contemporáneas o modernas). Esto se debe a que los aerosoles carbonáceos que son emitidos por fuentes fósiles no contienen <sup>14</sup>C; en cambio, los aerosoles biogénicos tienen una señal de <sup>14</sup>C semejante a la del CO<sub>2</sub> atmosférico (Major et al., 2021; Szidat et al., 2004). Por lo tanto, el <sup>14</sup>C constituye una herramienta ideal para

(Buseck y Schwartz, 2013) la determinación del aporte de las fuentes de aerosoles carbonáceos (Perron et al., 2010).

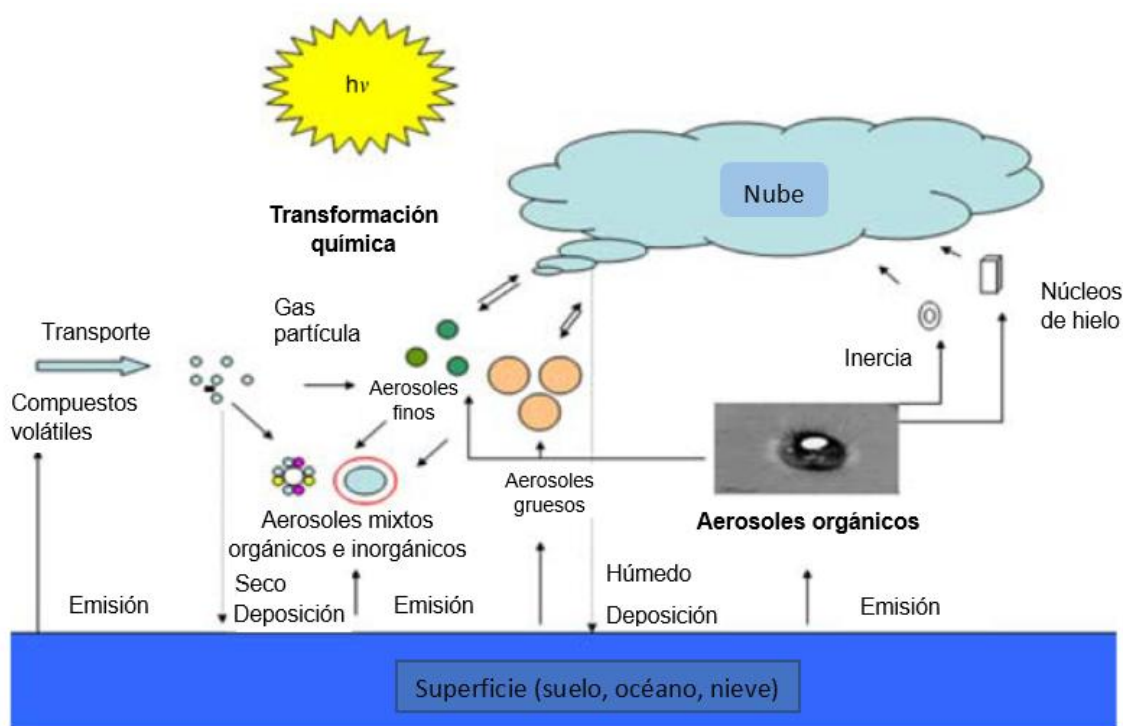
Los puertos marítimos pueden ser fuentes significativas de contaminación debido a diversas actividades asociadas con el transporte marítimo y las operaciones portuarias (IMO, 2011). Por lo antes mencionado, el puerto de Manzanillo en Colima debe su importancia a la gran actividad comercial, considerando que está posicionado como uno de los puertos más representativos a nivel nacional en cuanto a entrada de mercancías provenientes del extranjero, zonas centro y del Bajío en México, representando el 67 % del PIB (producto interno bruto) de la región. Se considera la principal entrada de contenedores en México, provenientes de Estados Unidos, Canadá, Guatemala, Colombia, Ecuador, Chile, Japón, China, Taiwán, Corea, Indonesia, Malasia, Singapur y Filipinas (ASIPONA, 2024).

El propósito de este estudio fue la determinación de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) por medio de la espectrometría de masas con aceleradores (AMS), presente en aerosoles atmosféricos provenientes de muestras tomadas en el puerto de Manzanillo. Mediante la abundancia de  $^{14}\text{C}$  se determinaron las fuentes de origen fósil o biogénico. Adicionalmente se determinaron otros parámetros que permitieron conocer la composición de los aerosoles y de ahí estudiar las fuentes de los compuestos contenidos en la fracción de partículas atmosféricas con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ) del puerto de Manzanillo. De igual forma, se caracterizó la composición elemental y orgánica de los aerosoles y estos datos se combinaron para aplicar un modelo de receptores y conocer el aporte relativo de las fuentes a los componentes de los aerosoles.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Aerosoles carbonáceos

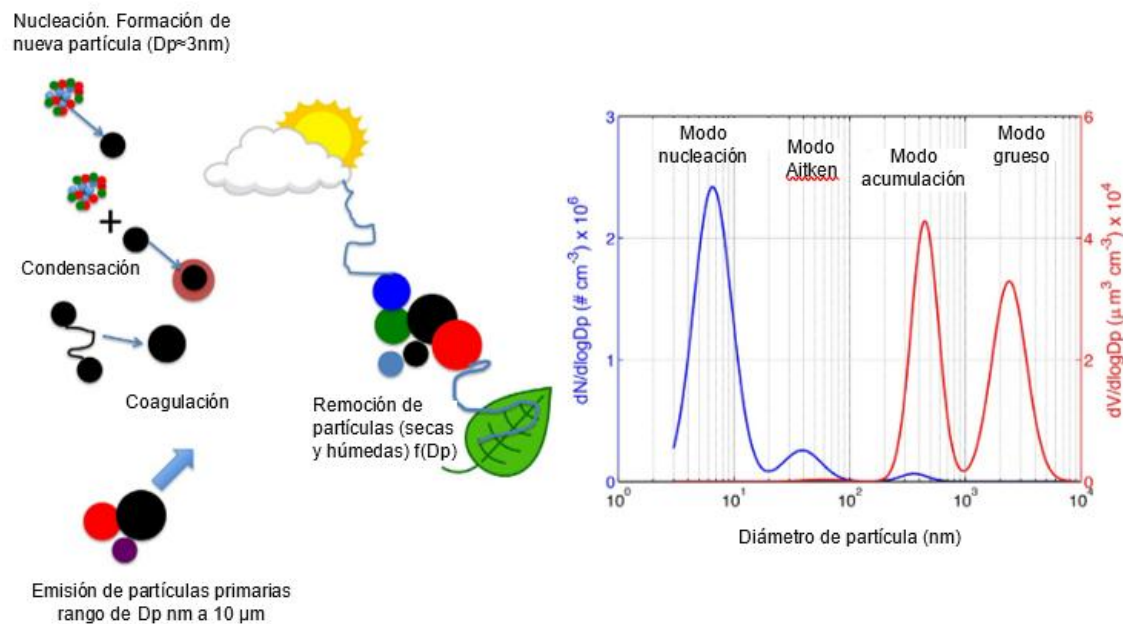
Se puede definir a los aerosoles como partículas sólidas o líquidas que son emitidas directamente a la atmósfera o convertidas a partir de precursores gaseosos (Buseck y Schwartz, 2013; Deshler, 2015). Las fuentes de emisión pueden ser tanto de origen natural como de las actividades humanas. Estos aerosoles afectan la visibilidad, la calidad del aire, la formación de nubes y el balance radiactivo del planeta y, en consecuencia, la temperatura, principalmente mediante la dispersión o absorción de la radiación solar incidente (Figura 1). La permanencia de los aerosoles en la troposfera es máxima de dos semanas antes de ser transformados químicamente y estos pueden ser transportados largas distancias (Pryor et al., 2015).



**Figura 1.** Procesos clave de los aerosoles carbonáceos durante su ciclo de permanencia en la atmósfera (Massabò y Prati, 2021).

Los aerosoles carbonáceos durante su ciclo de vida llegan a tener diversas transformaciones tales como evolución, transporte y remoción, siendo estas las que determinan su vida útil y el impacto en el clima (Liu et al., 2020).

De acuerdo con el tamaño y composición de las partículas de aerosoles, estas se distribuyen en forma trimodal: un modo Aitken que comprende partículas con diámetro inferior a  $0.1 \mu\text{m}$ ; un modo de acumulación que tiene un rango de partículas entre  $0.1 \mu\text{m}$  y  $1 \mu\text{m}$ , y un modo grueso conformado por partículas de diámetro superior a  $1 \mu\text{m}$ . Las partículas de menor tamaño se caracterizan por su alta movilidad y abundancia y crecen rápidamente debido a procesos de coagulación y condensación; debido a esto algunas partículas alcanzan tamaños que resultan relevantes para el clima (Figura 2). Estas pueden alterar el equilibrio radiactivo de la tierra, lo cual genera como consecuencia la dispersión o adsorción de la radiación que es emitida por el sol; esto influye en la formación de las nubes, así como en las propiedades de estas ya que actúan como núcleos de condensación de nubes (Pryor et al., 2015).



**Figura 2.** Dinámica del comportamiento de los aerosoles en la atmósfera (izquierda) y distribución de acuerdo con el número de partícula por  $\text{cm}^3$  (derecha) (Pryor et al., 2015).

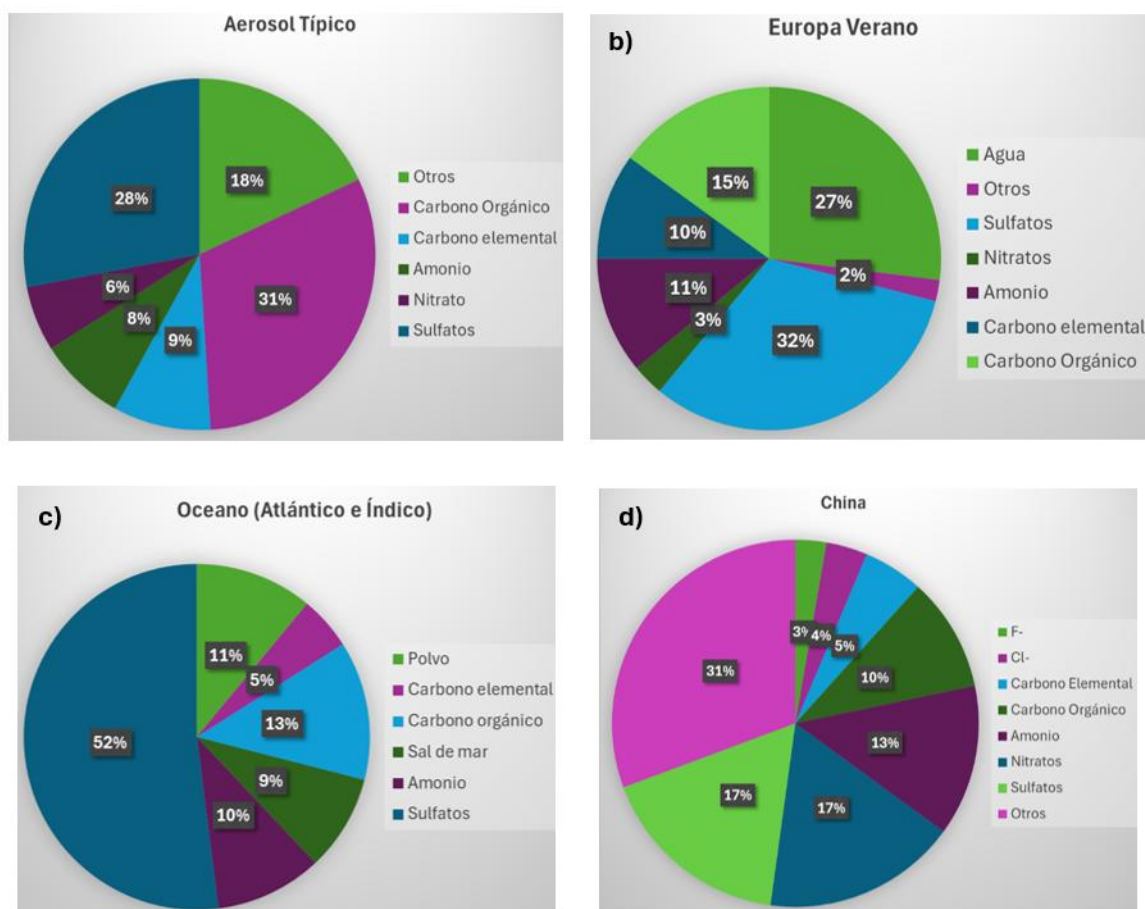
Dependiendo del tamaño de la partícula del aerosol dispersan o absorben la luz, en general, los emitidos por combustión contienen más carbono por lo que absorben una cantidad considerablemente de radiación electromagnética en el espectro visible, teniendo una mayor eficiencia en absorción de radiación solar (Massabò y Prati, 2021).

### 2.1.1 Composición y fuentes emisoras

Los aerosoles pueden variar de tamaño, el cual puede ir desde unos cuantos nanómetros, hasta decenas de micrómetros. La composición de los aerosoles en general cuenta con cientos de compuestos químicos, los cuales tienen origen biogénico o antropogénico (Pryor et al., 2015). Su composición depende principalmente del tipo de fuente de emisión, el tiempo que han pasado en la atmósfera y la reactividad química que presenten (Djikaev y Ruckenstein, 2019). Estos se dividen en aerosoles primarios y secundarios; en el caso de los aerosoles primarios se refiere a los que son emitidos directamente a la atmósfera desde fuente de origen natural como las erupciones volcánicas, aerosoles marinos, erosiones o bien de origen antropogénico como la quema de combustibles fósiles o procesos industriales. Mientras que los secundarios se refieren a los que se forman en la atmósfera por reacciones químicas, como la nucleación-condensación causada por los vapores emitidos a la atmósfera, o bien como resultado de la oxidación de especies orgánicas biogénicas o antropogénicas (Pryor et al., 2015; Djikaev y Ruckenstein, 2019;).

La composición química de los aerosoles es un factor que determina los efectos sobre la atmósfera. Debido a que existe una amplia diversidad de fuentes y procesos de emisiones, así como las transformaciones físicas y químicas que experimentan durante su permanencia en la atmósfera, hace que exista una alta variabilidad en su composición. En una partícula de aerosol se puede observar que las fracciones inorgánicas generalmente están compuestas por iones como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , entre otros, los cuales definen la acidez que presentará. Contiene una fracción carbonácea que proporciona el equilibrio

hidrofóbico/hidrofílico (Figura 3) (Heintzernberg, 2003; Valsaraj et al., 2015; Tu et al., 2022).



**Figura 3.** a) Composición de un aerosol típico; b) composición promedio de aerosoles muestreados en Europa en verano; c) Composición promedio obtenida de los océanos Atlántico e Índico; d) composición de aerosoles muestreados en el centro industrial nacional de cerámica arquitectónica en el este de China (Heintzernberg, 2003; Valsaraj et al., 2015; Tu et al., 2022).

Una gran proporción de los aerosoles presentes en la atmósfera provienen de fuentes naturales, como, por ejemplo:

- Erupciones volcánicas: éstas generan grandes cantidades de ceniza, liberando dióxido de azufre, aunado a otros gases, los cuales se transforman en partículas de sulfato.
- Incendios forestales: proporcionan partículas de carbono orgánico.

- Compuestos emitidos por las plantas: algunas plantas liberan compuestos orgánicos volátiles, los cuales reaccionan en la atmósfera dando lugar a los aerosoles secundarios.
- Polvo mineral y sal marina: generalmente se da por vientos y tormentas de arena que transportan polvo desde los desiertos, o bien por medio de oleajes y la acción del viento sobre los océanos levantan gotas de sal marina al aire.

En cuanto a los aerosoles de origen antropogénico, su presencia es menor en comparación con los aerosoles de origen natural; sin embargo, estos pueden llegar a ser predominantes en áreas cercanas a zonas industriales o ciudades, especialmente en la dirección del viento (Buseck y Schwartz, 2013; Quinn y Bates, 2013; Deshler, 2015; Valsaraj et al., 2015; Djikaev y Ruckenstein, 2019).

La quema de combustibles fósiles genera cantidades significativas de dióxido de azufre, transformándose en sulfatos y otros gases presentes en la atmósfera. La quema de biomasa libera compuestos de carbono orgánico. Las incineradoras, plantas de energía y fundiciones emiten grandes cantidades de sulfatos, nitratos y otros compuestos. En los hogares también se pueden generar aerosoles a través de fuentes como estufas, velas, chimeneas, entre otros (Buseck y Schwartz, 2013; Quinn y Bates, 2013; Deshler, 2015; Valsaraj et al., 2015; Djikaev y Ruckenstein, 2019).

### 2.1.2 PM<sub>2.5</sub>, efectos en la salud y el ambiente

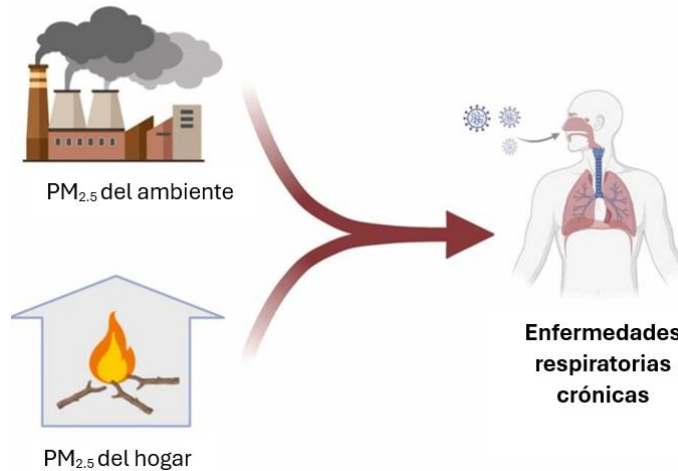
Uno de los principales problemas que han surgido a causa de la contaminación atmosférica se debe a las partículas, especialmente en la fracción de 2.5 micrómetros, ya que tienen la capacidad de penetrar en el tracto respiratorio generando enfermedades de distinta índole. Diversas investigaciones han dado como resultado una asociación entre las enfermedades cardiovasculares y las PM<sub>2.5</sub>, registrándose mayor cantidad de casos en centros urbanos (Liu et al., 2025; Ma et al., 2025).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud nueve de cada diez personas respiran contaminantes atmosféricos, lo cual representa aproximadamente siete millones de muertes prematuras a nivel mundial cada año (Ayoub et al., 2021). Los

efectos que se experimentan de forma inmediata al estar expuestos a las  $PM_{2.5}$  son picazón en los ojos, la nariz y garganta, sibilancias, tos, falta de aire, dolor de cabeza y pecho, en ocasiones náuseas, provoca infecciones respiratorias, agudiza el asma, entre otros síntomas (Rodríguez y Raúl, 2020; Cabello-Torres et al., 2024).

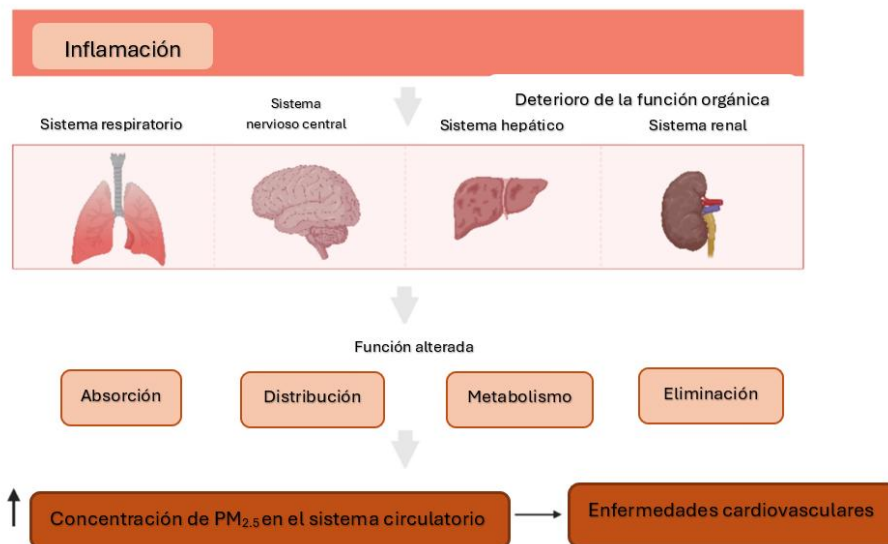
La prolongada exposición a las  $PM_{2.5}$  se ha convertido en un factor de riesgo que afecta la salud humana, agudizando los padecimientos crónicos entre los cuales se puede mencionar la diabetes y las enfermedades cardiovasculares. Al ser respiradas, producen respuestas inflamatorias, estrés oxidativo y alteraciones en el ADN. Los contaminantes atmosféricos están relacionados con enfermedades renales como la crónica y la terminal (Yi et al., 2024).

Las enfermedades respiratorias crónicas que se generan al estar expuestos a las  $PM_{2.5}$  dependen de la composición; se encontró una relación entre estas enfermedades y los  $NH_3^-$ , así como el carbono orgánico los cuales causaron un impacto significativo en la mortalidad respiratoria (Zhai et al., 2023). Estudios realizados recientemente indican que la exposición prolongada a las  $PM_{2.5}$  están relacionados con visitas más frecuentes a urgencias por enfermedades como bronquitis crónica, asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Yan et al., 2022). Condiciones como el asma, rinitis aguda y dermatitis atópica se agudizan debido a que las partículas penetran en el sistema respiratorio, alojándose en los alveolos y estas pueden entrar al torrente sanguíneo por medio de los capilares pulmonares provocando enfermedades sistémicas, como se muestra en la figura 4 (Hu et al., 2023; X. Wang et al., 2024).



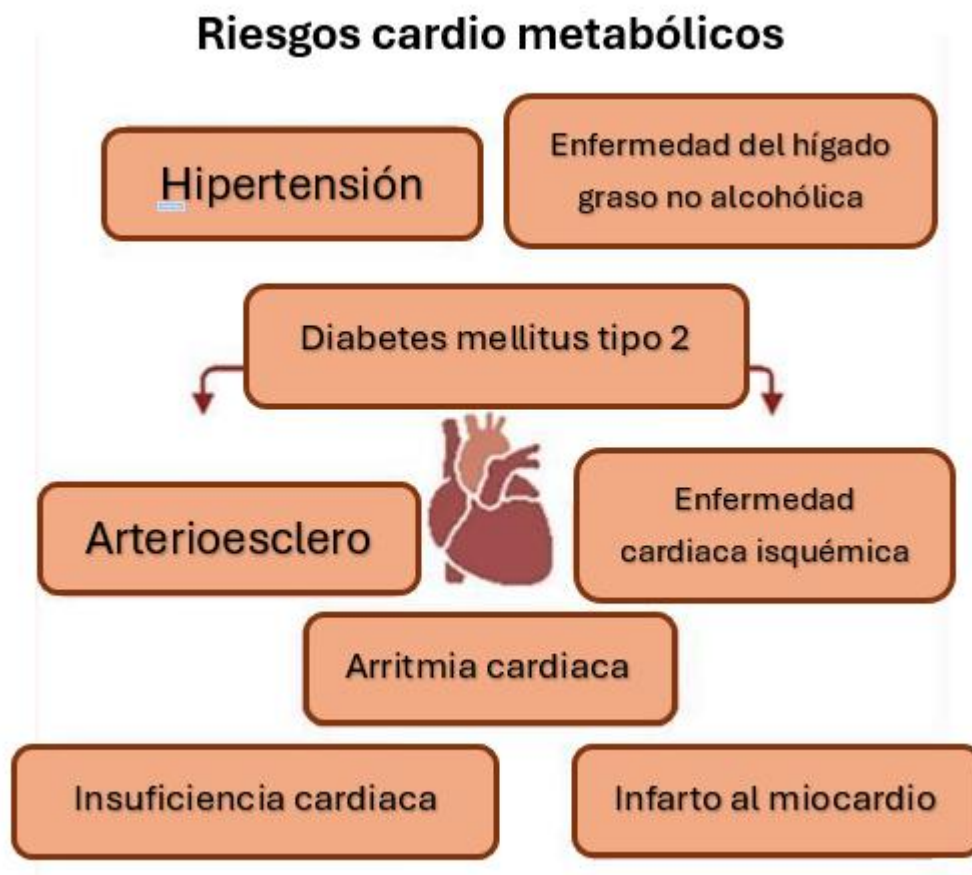
**Figura 4.** Entrada de PM<sub>2.5</sub> al tracto respiratorio y estación en los alveolos (Hu et al., 2023).

Las enfermedades cardiovasculares se ven agravadas debido a las PM<sub>2.5</sub>, ya que una vez que se encuentran en el torrente sanguíneo, generan respuestas inflamatorias y estrés oxidativo (Figura 5), lo cual puede llevar a anomalías hemostáticas, aumentando el riesgo de accidentes cerebrovasculares e infartos al miocardio. De igual forma, los sistemas se ven afectados en los procesos de absorción, distribución, metabolismo y eliminación de las sustancias contenidas en las partículas respiradas (Chanda et al., 2024; Lin et al., 2024).



**Figura 5.** Alteraciones en los diferentes sistemas debido a las PM<sub>2.5</sub> (Chanda et al., 2024)

Los metales como el Cu, Fe, Zn y Pb contenidos en las PM<sub>2.5</sub> generan radicales causando daño en las células al provocar alteraciones en el ADN. La respuesta inflamatoria que se genera daña los revestimientos de los vasos sanguíneos provocando estrechamiento y acumulación de placa, aumentando el riesgo de trombosis, arritmia cardíaca y fibrosis. Otra afectación que se presenta es la resistencia a la insulina debido al estrés oxidativo (Figura 6) (Krittanawong et al., 2023; J. Li et al., 2023; Chanda et al., 2024).



**Figura 6.** Diversas enfermedades cardiovasculares relacionadas con las PM<sub>2.5</sub> (Chanda et al., 2024).

## 2.2 Carbono moderno y carbono fósil

Los aerosoles carbonáceos, están constituidos por partículas de carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC) principalmente. El OC contiene carbono fósil emitido por la quema de combustibles fósiles. Además, el OC incluye carbono proveniente de aerosoles orgánicos primarios y secundarios. Los primarios son emitidos directamente a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles y biocombustibles, incendios forestales, y emisiones biogénicas (polen y esporas, suspensión de suelos y emisiones del mar). Los aerosoles secundarios provienen de reacciones químicas y conversión gas-partícula de compuestos orgánicos volátiles en fase gaseosa. El EC es una forma de carbono que se encuentra altamente condensado, presentado una estructura similar a la del grafito y es altamente refractario. Tanto el EC como el OC contienen carbono fósil (el cual corresponde a la fracción presente en los aerosoles que proviene de la quema de combustibles fósiles como el diésel, petróleo, gas natural, carbón, etc.) y carbono contemporáneo (carbono moderno o biogénico, procedente del ciclo biológico reciente relacionado con la biomasa), se considera que todo el carbono fósil es antropogénico (Levin y Hesshaimer, 2000; Szidat et al., 2004; Heal, 2014). El carbono negro, u hollín, que se genera durante la combustión, es una de las formas más conocidas del EC (Morino et al., 2015).

### 2.2.1 Relevancia del carbono en la atmósfera

El ciclo del carbono consiste en el intercambio de átomos de carbono entre el océano, el suelo y la atmósfera, a través de factores físicos y químicos, así como procesos biológicos. Pertenece a uno de los denominados ciclos biogeoquímicos. Sin embargo, éste se ha visto afectado por la actividad antropogénica a partir de la Revolución Industrial. Al utilizar el carbono fósil como fuente de energía se ha incrementado significativamente la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Grace, 2013).

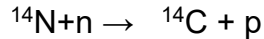
Algunos compuestos de carbono de los aerosoles influyen negativamente en el ciclo natural del carbono y, por ende, en el cambio climático ya que presentan las siguientes características:

- Absorben la luz en un amplio espectro. Al absorber luz en la región ultravioleta y longitudes de onda corta, contribuyen al forzamiento radiactivo (H. Li et al., 2021).
- Su forma no se altera a altas temperaturas.
- Son insolubles en agua.
- Solventes orgánicos y otros compuestos de aerosoles atmosféricos, afectan la fotoquímica de la atmósfera y las concentraciones de ozono troposférico.
- Contribuyen al enfriamiento de la Tierra al producir un efecto de apantallamiento de la luz.
- Tienen baja reactividad química en la atmósfera. Intervienen en el proceso de formación de nubes y, por tanto, en la lluvia y la nieve (Alam et al., 2011).

### 2.2.2 Formación y reparto del $^{14}\text{C}$

El  $^{14}\text{C}$  es un isótopo radiactivo natural del carbono, que se forma continuamente en la atmósfera superior, conteniendo en su núcleo 6 protones y 8 neutrones (con un total de 14 nucleones) a diferencia del  $^{12}\text{C}$  que es más estable y presenta 6 neutrones y 6 protones (Levin y Hesshaimer, 2000; Matsumoto et al., 2001).

El  $^{14}\text{C}$  entra a la biosfera como  $^{14}\text{CO}_2$ , mediante la fotosíntesis y la respiración y refleja un cociente de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  similar al de la atmósfera. El  $^{14}\text{C}$  se forma en la estratósfera por la interacción de los rayos cósmicos con el Nitrógeno, que constituye el 78 % del aire. Los rayos cósmicos, que en un 89 % están compuestos por protones, 9 % de partículas alfa, 1% electrones, inciden sobre la Tierra desde el espacio exterior a altas energías que van desde los 10 a 100 MeV (comparado con los 8 MeV de energía de enlace de los nucleones) (Ni et al., 2022; Yang et al., 2024). Las colisiones de los rayos cósmicos sobre los núcleos de los gases de la atmósfera se fragmentan generando un cúmulo de partículas secundarias, entre ellas neutrones. La interacción de estos neutrones con las moléculas de nitrógeno da lugar a la formación del  $^{14}\text{C}$ , mediante la siguiente reacción (Szidat et al., 2004):



El  $^{14}\text{C}$  en aerosoles nos proporciona información sobre el origen de las partículas atmosféricas; permite hacer una separación entre fuentes de origen fósil y no fósil (contemporáneas o modernas) (Szidat et al., 2004; Major et al., 2021). Esto es posible debido a que el  $^{14}\text{C}$  es absorbido por los organismos mientras están vivos, a través de los procesos metabólicos se mantiene constante la cantidad de radiocarbono; al morir sus funciones cesan y con esto dejan de absorber el  $^{14}\text{C}$ , por lo que se presenta pérdida por decaimiento. Ya que la vida media del  $^{14}\text{C}$  es aproximadamente de 5740 años, en el carbono de origen fósil no hay presencia de  $^{14}\text{C}$  y en el de origen biogénico se encuentra en proporciones similares al  $\text{CO}_2$  atmosférico actual (Levin y Hesshaimer, 2000; Perron et al., 2010; Kontul et al., 2024).

## 2.3 Espectrometría de masas con aceleradores y fluorescencia de rayos X

### 2.3.1 Espectrometría de masas con aceleradores

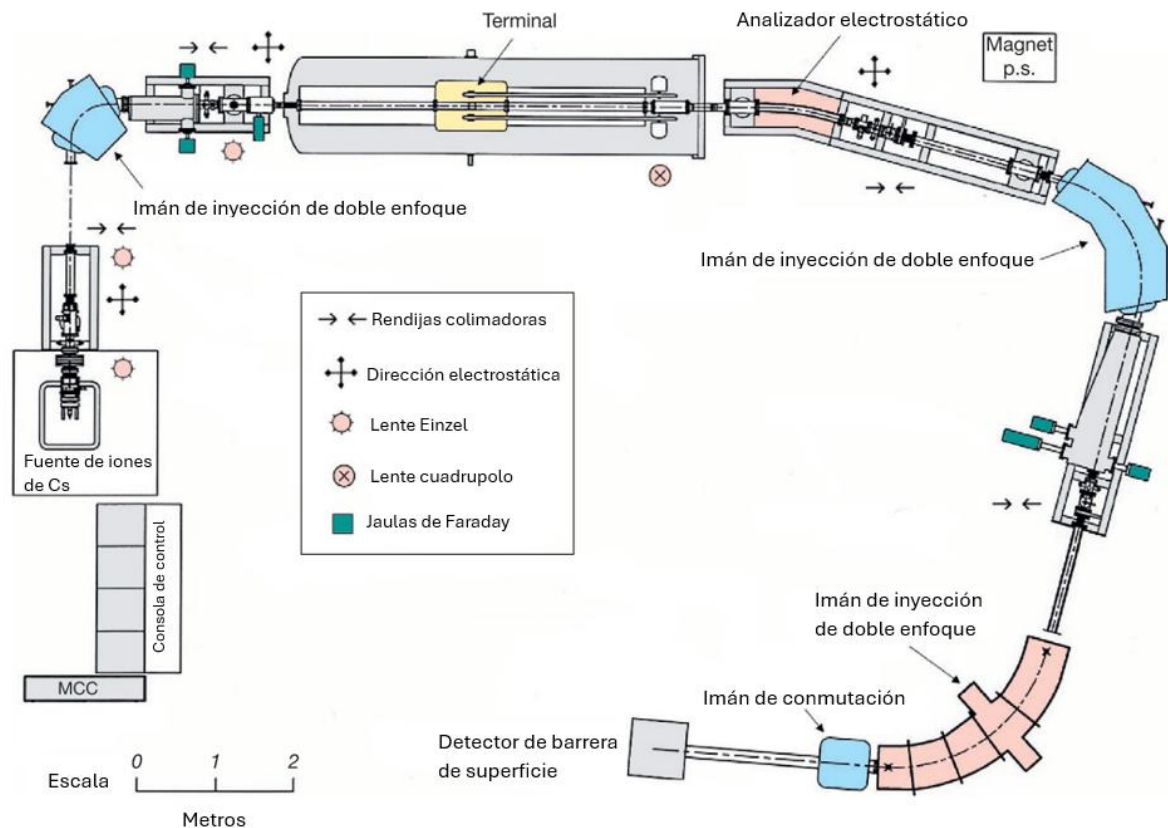
La técnica de espectrometría de masas con aceleradores (AMS, por sus siglas en inglés) es una técnica muy sensible que utiliza la espectrometría de masas y la aceleración de partículas, cargándolas de altas energías. Esta técnica se utiliza para identificación de isótopos radiactivos que están en proporciones mínimas en la naturaleza. Esta técnica fue desarrollada en 1977, con el fin de medir el  $^{14}\text{C}$ , sin embargo, actualmente se pueden medir más isótopos como el  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , etc. (Jull y Burr, 2013; Jeřkovský et al., 2020; Walther y Wendt, 2020).

Los componentes básicos de los cuales está constituido un AMS son:

- Fuente de iones.
- Imán de inyección y dispositivo de comunicación de picos electrostático.

- Acelerador y separador de partículas tándem.
- Analizadores de partículas de alta energía para dispersión magnética y electrostática.
- Detector de partículas.

En la figura 7 se muestra un esquema general de cómo está conformado el AMS. Los iones negativos, son generados en la fuente de iones, posteriormente son transformados en haces de partículas y se transportan por medio de un imán de inyección. Las partículas se aceleran hasta la terminal, donde se les extraen los electrones y las partículas positivas se aceleran más. Las trayectorias de estas partículas con analizadas con diversos filtros magnéticos y electrostáticos (Jull y Burr, 2013; Thakur, 2019).



**Figura 7.** Esquema general de un AMS (Jull y Burr, 2013).

La fuente de iones sirve para generar haces de iones con carga negativa, estos son extraídos posteriormente a energías de orden de decenas de keV. Generalmente se incluye un carrusel de muestras giratorio que facilita el análisis de las muestras. En las muestras para determinación de  $^{14}\text{C}$ , generalmente se usa grafito debido a que la pureza y naturaleza de este es relativamente inerte, se caracteriza por presentar corrientes de haz de  $^{14}\text{C}$  altas, es de fácil fabricación (Jull y Burr, 2013; Wacker et al., 2016; Walther y Wendt, 2020).

Una vez formado el haz, es dirigido a través de un imán de inyección que cuenta con un campo magnético para seleccionar los isótopos de interés por medio de la relación (masa/energía) / carga<sup>2</sup> de las partículas, aplicando el voltaje correcto. En el acelerador tipo tándem, los iones negativos se aceleran a altas energías donde los electrones son retirados. Se forma otro haz con iones positivos después de salir del acelerador, donde las partículas son seleccionadas de acuerdo con la (masa/energía) / carga<sup>2</sup>. Debido a este tipo de funcionamiento la técnica AMS proporciona una alta sensibilidad; al utilizar un ciclotrón las partículas son clasificadas en función de su masa/carga o bien debido a las características de resonancia (Jull y Burr, 2013; Wacker et al., 2016; Jeřkovský et al., 2020).

Para el procesamiento de una muestra por AMS, es necesario que esta se encuentre en forma de grafito y así poder medir el número de átomos de  $^{14}\text{C}$  contenidos en la misma (Reimer et al., 2020; Melquiades Z. et al., 2021).

La preparación de la muestra consta de dos fases:

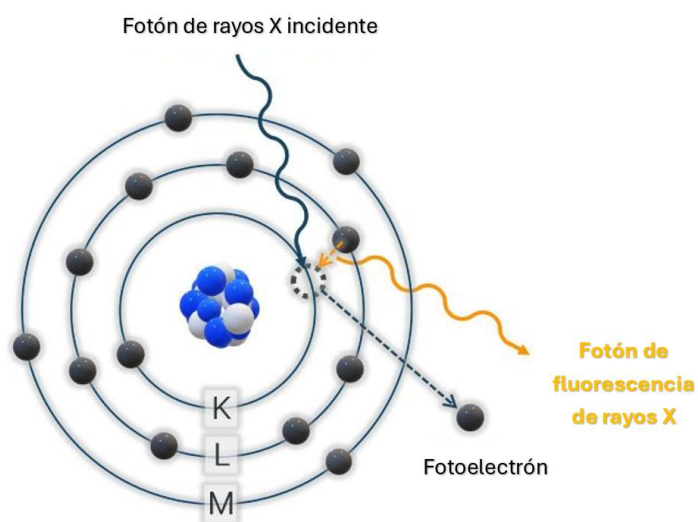
- Combustión. A través de un analizador de elementos se lleva a cabo la combustión en una atmósfera enriquecida con oxígeno, de forma automática. La temperatura a la cual se lleva la muestra va desde los 950°C hasta los 1050°C. Todo el carbono es convertido a  $\text{CO}_2$  de alta pureza (Rakowski, 2011; Melquiades Z. et al., 2021).
- Grafitización. El  $\text{CO}_2$  se reduce a grafito utilizando hidrógeno como agente reductor y hierro como catalizador (Melquiades Z. et al., 2021).

El grafito obtenido es prensado en cátodos y estos son introducidos en el AMS para la medición isotópica. Se incluye un estándar internacional (Oxalic acid I o II) que sirve para que las mediciones sean exactas, comparables y trazables. Los resultados se reportan como fracción moderna (fM), % de carbono moderno (pMC) o bien como fracción de carbono moderno ( $F^{14}\text{C}$ ) (Levin y Hesshaimer, 2000; Rakowski, 2011; Reimer et al., 2020; Melquiades Z. et al., 2021).

Una de las ventajas más destacadas de la técnica de AMS se debe al uso de muestras pequeñas del orden de mg y a que el tiempo de medición es corto en comparación con otras técnicas. Otra ventaja es la medición de isótopos de baja abundancia hasta un nivel de  $10^{-16}$ , por lo que se considera ultrasensible (Becker, 2012).

### 2.3.2 Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica no destructiva que sirve para determinar la composición elemental de sólidos, líquidos y polvos. Su fundamento se basa en la ionización fotoeléctrica inducida por rayos X, provocando que un electrón sea expulsado de una capa interna del átomo. Esta vacante es ocupada por un electrón de una capa de mayor energía, emitiendo la diferencia de energía entre ambos niveles en forma de fotón (Figura 8) (Lancaster et al., 2024).



**Figura 8.** Principio de fluorescencia de rayos X (Bruker, 2025).

La radiación que emiten los elementos es una especie de huella digital, que además es única, por medio de la cual se puede diferenciar entre la fluorescencia del cobre, del zinc y de otros elementos de la tabla periódica. Esto permite que la FRX sea una técnica útil para el análisis de elementos mayores, menores y trazas en diversas muestras (L'Annunziata, 2016).

## 2.4 Modelos de receptores

Para medir la calidad del aire existen diferentes modelos, los cuales pueden clasificarse, en general, en modelos de receptores y modelos de dispersión, los cuales difieren en los fundamentos teóricos, información requerida y tipo de resultados que proporcionan (Viana et al., 2008; Hopke, 2016).

Los modelos de dispersión describen el transporte, dispersión y transformación de los contaminantes desde el origen hasta donde es recibido, utilizan información meteorológica, topográfica y de emisiones. Para aplicar estos modelos es necesario conocer las fuentes, ya que simulan cómo los contaminantes se propagan en la atmósfera (Seinfeld, 2003).

En cuanto a la exactitud de los modelos de dispersión se ve condicionada con respecto a la precisión de los inventarios de emisiones y de los datos meteorológicos. Los errores asociados a las emisiones pueden estar por arriba del 50 %, lo cual afecta la confiabilidad de las simulaciones; esto hace que sean más adecuados para análisis predictivos (Russell y Dennis, 2000).

Los modelos de receptores son herramientas matemáticas o estadísticas que tienen por objeto determinar e interpretar las fuentes que generan contaminantes atmosféricos en puntos de muestreo específicos. A diferencia de otros modelos de dispersión o fotoquímicos, no requieren información de las emisiones, condiciones meteorológicas, ni procesos de transformación química para determinar las contribuciones de las fuentes en las concentraciones observadas en el sitio receptor (EPA, 2024).

Estos modelos presentan una confiabilidad elevada para la estimación de las contribuciones procedentes de las fuentes cuando se dispone de un conjunto de

muestras significativas. Algunos estudios han mostrado que explican entre el 70 y 95 % de la masa de  $PM_{2.5}$  con incertidumbres que oscilan entre 10-30 %, dependiendo de la cantidad de especies químicas y del periodo de muestreo (Russell y Dennis, 2000; Belis et al., 2013; Hopke, 2016).

Este tipo de modelos permiten conocer el grado de peligro potencial de contaminación de la fuente-receptor identificando cuales son las que tienen mayor aporte. Para el análisis de relación de la fuente y receptor se utilizan técnicas estadísticas combinadas con mediciones de la calidad del aire para la identificación de las fuentes. Los modelos más utilizados son: Balance químico de masa (CMB), análisis de componentes principales (PCA), factorización de matriz positiva (PMF) y UNMIX (Baklanov et al., 2011; EPA, 2024).

El balance químico de masa es un modelo desarrollado por la EPA, este se basa en utilizar perfiles de fuentes como datos ambientales detallados para determinar las fuentes de donde están siendo emitidos los contaminantes. Para calcular las contribuciones se basa en categorías de fuentes con características químicas diferenciadas (Vallero, 2014; EPA, 2024).

El CMB está basado en los siguientes puntos:

- Se toma como supuesto que la composición de las emisiones es constante durante todo el muestreo.
- Las especies químicas son sumadas linealmente (se considera que no reaccionan entre sí).
- Ya se cuenta con una base donde están identificadas todas las fuentes con potencial contribución al receptor.
- El número de fuentes es igual o menor al número de especies.
- Se consideran linealmente independientes a los perfiles de las fuentes.

Para que este modelo sea aplicado se requiere contar con una base de datos donde ya estén establecidos los perfiles de fuentes de contaminantes para ser asignados de acuerdo con las concentraciones de los receptores (Vallero, 2014; Watson y Chow, 2015; EPA, 2024).

El modelo PMF es multivariado, lo cual permite identificar y cuantificar las fuentes de contaminantes, empleando los datos obtenidos de diferentes momentos para estimar los perfiles y las fuentes, así como la contribución de estas en las concentraciones registradas. Esto se logra minimizando la diferencia entre las concentraciones observadas y las calculadas, por medio de una restricción asegurado que las contribuciones y los perfiles de las fuentes siempre presenten valores positivos. Las incertidumbres asociadas a las concentraciones permiten que se ajuste la influencia relativa de cada muestra. Con los factores obtenidos se hacen interpretaciones de posibles fuentes al compararlos con perfiles de emisiones reales (Watson y Chow, 2015; X. Li et al., 2020; F. Wang et al., 2021; EPA, 2024).

El PCA es una herramienta estadística que se utiliza para identificar patrones dentro de los datos obtenidos en muestreos atmosféricos. Esto permite reducir la cantidad de variables, relacionando los datos en un espacio de menor dimensión, sin que se pierda información importante. Este modelo de receptores se emplea principalmente con fines exploratorios, para encontrar relación entre posibles fuentes de emisión o agrupamiento de compuestos (F. Wang, 2009; Landis et al., 2012; Johnson et al., 2015; Syms, 2019).

Por medio del PCA las variables originales se transforman en un conjunto de componentes igual al de las variables iniciales, sin que se pierda la información. Los componentes que se generan tienen combinaciones lineales de los contaminantes medidos, presentando dos propiedades importantes:

- Son estadísticamente independientes uno de otro, lo cual evita que se genere multicolinealidad en futuros análisis.
- Los valores propios obtenidos indican cual es la proporción que contribuye cada componente a la variabilidad total de los datos.

Generalmente los primeros componentes que se obtienen son los que explican la mayor parte de la variación observada en los datos analizados, las relaciones obtenidas entre las muestras se pueden evaluar a través de un gráfico ya sea bidimensional o tridimensional, de los componentes principales obtenidos (F. Wang, 2009; Johnson et al., 2015; Syms, 2019).

El modelo UNMIX fue desarrollado por la EPA, principalmente se utiliza para reducir la cantidad de variables en un conjunto de datos complejos a tipo de fuente y contribuciones de estas. Los tipos de fuente se comparan con perfiles ya medidos para ser identificados; en cuanto a las contribuciones estas se utilizan para determinar cuánto aporte de la muestra hay en cada fuente (Landis et al., 2012; Syms, 2019).

Este modelo busca separar las concentraciones de compuestos químicos presentes en el aire; no requiere perfiles definidos, ya que son construidos directamente a partir de los datos obtenidos en el muestreo, por medio de una metodología similar al análisis factorial. UNMIX estima el número de fuentes presentes, la composición química de la masa y la cantidad que aporta cada una de las muestras analizadas (Vallero, 2014; Watson y Chow, 2015).

En la tabla 1 se muestra una comparación entre los 4 modelos de receptores que se utilizan para determinar las fuentes de origen de los contaminantes.

**Tabla 1.** Comparación de modelos de receptores.

Modelo	PMF	PCA	UNMIX	CMB
<b>Tipo</b>	Estadístico multivariado (factores positivos)	Estadístico (reducción de dimensiones)	Estadístico (análisis factorial no supervisado)	Determinístico (balance de masa lineal)
<b>Requiere perfiles de fuentes previos</b>	No	No	No	Sí
<b>Estima contribuciones de fuentes</b>	Sí	No	Sí	Sí
<b>Estima composición química</b>	Sí	No	Sí	No (se proporcionan como entrada)
<b>Maneja incertidumbres</b>	Incluye incertidumbres en los datos de entrada	No	Parcialmente	Limitado
<b>Valores negativos permitidos</b>	No	Sí	No	Sí

Modelo	PMF	PCA	UNMIX	CMB
Identificación automática de fuentes	Sí	No (requiere interpretación posterior)	Sí	No (se definen fuentes de forma manual)
Requiere un número determinado de fuentes como entrada	Sí	No	No (lo estima automáticamente)	Sí (implícitamente al definir perfiles)
Es de fácil interpretación	Moderada	Baja (requiere experiencia estadística)	Moderada	Alta (cuando se tienen buenos perfiles)
Se utiliza comúnmente en análisis atmosférico	Muy frecuente (PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> )	Como paso exploratorio	Usado en estudios EPA	Común en estudios con perfiles fuente disponibles

Elaboración propia basada en (Var et al., 1982; Esbensen et al., 2003; Querol et al., 2008; Wang, 2009; Landis et al., 2012; EPA, 2014; Johnson et al., 2015).

## 2.5 Puertos marítimos como fuentes de contaminación

Los puertos marítimos pueden ser fuentes importantes de contaminación debido a diversas actividades asociadas con el transporte marítimo y las operaciones portuarias. Algunos de los factores que contribuyen al nivel de contaminación en los puertos marítimos se mencionan en la tabla 2; desde las emisiones de buques hasta los residuos sólidos que son generados en el lugar donde embarcan, representan un gran impacto en el ambiente (IMO, 2011).

**Tabla 2.** Principales Factores que contribuyen a la contaminación en puertos marítimos debido a las actividades asociadas con transporte y operaciones portuarias.

Factor de Contaminación	Descripción
Emisiones de buques	Los buques emiten contaminantes atmosféricos como óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), partículas finas (PM <sub>2.5</sub> ), compuestos orgánicos volátiles (COV) y CO <sub>2</sub> .
Tráfico terrestre	El transporte terrestre dentro y alrededor de los puertos, como camiones y vehículos de transporte de pasajeros, contribuye con emisiones de escape de motores diésel y gasolina.

<b>Manipulación de carga</b>	Las operaciones de carga y descarga de mercancías pueden generar polvo y partículas en suspensión, especialmente en materiales a granel como carbón o mineral de hierro.
<b>Vertidos de aguas residuales</b>	Los puertos pueden verter aguas residuales de buques y otras actividades portuarias, lo que puede contaminar el agua circundante si no se trata adecuadamente.
<b>Residuos sólidos</b>	La generación de residuos sólidos en los puertos, como embalajes y desechos de carga, puede contribuir a la contaminación si no se manejan adecuadamente.

**Fuente:** (IMO, 2011).

En el caso de México, un estudio realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental de Norte América en 2011 dio como resultado que el 77 % de los gases de efecto invernadero emitidos provenían de diez puertos entre los cuales resaltan el de Cayo Arcas, seguido de Manzanillo, Veracruz y Altamira (SEMAR-WWF, 2023). Los puertos marítimos pueden ser fuentes importantes de contaminación debido a diversas actividades asociadas con el transporte marítimo y las operaciones portuarias. Algunos de los factores que contribuyen al nivel de contaminación en los puertos marítimos se mencionan en la tabla 1; desde las emisiones de buques hasta los residuos sólidos que son generados en el lugar donde embarcan, representan un gran impacto en el ambiente (IMO, 2011).

## 2.6 Puerto de Manzanillo, Colima

El puerto de Manzanillo en Colima, México, es un centro logístico crucial que desempeña un papel fundamental en el comercio internacional y la economía mexicana. Su infraestructura moderna, servicios integrales y compromiso con la sostenibilidad lo convierten en un puerto de clase mundial (ASIPONA, 2024). El Puerto de Manzanillo, situado en el estado de Colima y con coordenadas geográficas de 19°06'39"N 104°19'40"O, destaca como uno de los principales centros económicos en esta área. La ciudad y puerto de Manzanillo albergan una población de 159,853 habitantes según el XIV Censo del INEGI (ASIPONA, 2024).

En el municipio de Manzanillo se llevan a cabo diversas actividades entre las que destacan la portuaria y la turística. Además, se realiza extracción y procesamiento de minerales, generación de energía eléctrica, agricultura y pesca. Cuenta con un aeropuerto internacional, redes ferroviarias que sirven de conexión con la industria; tiene un muelle fiscal y una planta termoeléctrica de generación, que abastece a gran parte de la población (SEMAR-WWF, 2023).

El puerto abarca más de 437 hectáreas, destacando el movimiento de carga contenerizada (Figura 9). En 2022 se movilizaron 3.4 millones de TEU's (capacidad de carga de los contenedores estándar de 20 pies), ocupando el quinto lugar en puertos con mayor movimiento de contenedores en América Latina y el Caribe. Por lo antes mencionado, el puerto de Manzanillo en Colima debe su importancia a la gran actividad comercial, en cuanto a entrada de mercancías provenientes del extranjero, representando el 67 % del PIB (producto interno bruto) de la región. Es la principal entrada de contenedores en México, recibiendo mercancías de países como Estados Unidos, Canadá, Guatemala, Colombia, Ecuador, Chile, Japón, China, Taiwán, Corea, Indonesia, Malasia, Singapur y Filipinas (ASIPONA, 2024).



**Figura 9.** Buque con carga de contenedores en el puerto de Manzanillo, Colima. Autoría propia.

Esta gran actividad marítima y comercial, sin embargo, hace que Manzanillo sea uno de los municipios más contaminados del país por emisiones de  $SO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , de acuerdo con los informes de situación de Medio Ambiente de México (SEMAR-WWF, 2023).

### 3 Estado del arte

Durante la campaña Milagro en 2006, se emprendieron estudios de aerosoles atmosféricos en la CDMX empleando  $^{14}\text{C}$ , implementando nuevas metodologías con el objeto de obtener información sobre las características de las partículas atmosféricas contenidas en el aire. A partir de estos estudios se ha contribuido a la implementación de acciones apropiadas para el control de la fracción antropogénica (Stone et al., 2010; Martínez-Carrillo et al., 2010; Ortiz et al., 2011; Gómez et al., 2016).

Con la instalación del laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) en el IFUNAM, en 2013, el análisis de  $^{14}\text{C}$  por AMS se incorporó al estudio de aerosoles atmosféricos, para determinar las proporciones de carbono proveniente de quema de combustibles fósiles (carbono fósil) y de quema de biomasa y emisiones biogénicas (carbono contemporáneo o carbono moderno). Se realizaron monitoreos de la fracción carbonosas en la región central de México, corroborando la utilidad del análisis del  $^{14}\text{C}$  para distinguir fuentes de carbono fósil de carbono proveniente de la quema de biomasa (Martínez-Carrillo et al., 2010; Stone et al., 2010; Ortiz et al., 2011; Gómez et al., 2016;). En la tabla 3 se presenta una revisión de estudios previos con respecto a carbono.

**Tabla 3.** Lista de referencias de estudios previos tanto nacional como internacionales con respecto al carbono.

Referencia	Sitio de estudio	Resultados
(Martínez-Carrillo et al., 2010)	Tlaxcoapan	A través de la emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE), se analizaron las muestras obtenidas para determinar las fuentes de origen de los contaminantes. Los resultados mostraron que las actividades industriales tenían un efecto negativo en Tlaxcoapan, al igual que los niveles elevados de S, V, Ni, mostraron una correlación positiva, indicando con esto que la refinería y termoeléctrica son las fuentes que

Referencia	Sitio de estudio	Resultados
		más influyen en generar estos elementos.
(Ortiz et al., 2011)	Tlaxcoapan	Con PIXE, fluorescencia de rayos X (FRX) y absorción atómica; se obtuvieron los componentes de las muestras, con los cuales se alimentaron los modelos de receptores UNMIX y PCFA. Con el modelo UNMIX se obtuvo que las principales fuentes contaminantes eran: el 30 % la industria, 40 % el suelo y 30 % refinerías. PCFA: asocia el 30 % a una fuente desconocida. Se encontró relación entre ambos modelos.
(Stone et al., 2010b)	Ciudad de México	Utilizando un análisis termoóptico se realizó la medición de aerosoles carbonáceos. Se obtuvo que el OC en los sitios estudiados represento una gran fracción de OC no primario. Se confirmó que el SOC estaba relacionado con la quema de biomasa.
(Morino et al., 2015)	Beijín	Se analizó la variación de aerosoles carbonáceos fósiles y no fósiles. Se obtuvo que el carbono orgánico secundario aumentó durante el día, indicando que su producción a partir de fuentes fósiles antropogénicas es de gran aporte en áreas urbanas.
(Genga et al., 2017)	Brindisi	Se aplicó la espectroscopía de absorción atómica en horno de grafito para evaluar la presencia de emisiones de quema de biomasa, de combustibles fósiles y de barcos. Se detectó que cuando los vientos soplaban desde las áreas urbano-industriales, las fracciones de aerosoles inorgánicos y orgánicos estaban presentes en mayor cantidad
(Szidat et al., 2004)	Zurich	Se realizó la medición de $^{14}\text{C}$ en aerosoles con AMS dando como resultado que la fracción de carbono

Referencia	Sitio de estudio	Resultados
		contemporáneo en OC contribuye de forma importante.
(Solís et al., 2017)	Ciudad de México y Cuernavaca	Se determinó el $^{14}\text{C}$ por AMS. Los resultados de la variación temporal en la Ciudad de México mostraron que las concentraciones de FC eran mayores o igual que BC. En Cuernavaca, BC siempre estuvo por encima del FC.
(Gómez-Chávez et al., 2017)	Ciudad de México	Se determinó el $^{14}\text{C}$ en muestras de carbono total en aerosoles (fracción $\text{PM}_{10}$ ), recolectados en la Ciudad de México. Los valores de la fracción de carbono moderno, $\text{F}^{14}\text{C}$ , variaron de 0.39 a 0.48 con un promedio de 0.43. Estos valores son ligeramente más bajos que los obtenidos en la campaña MILAGRO para $\text{PM}_{2.5}$ en 2006. Ambos estudios reflejan una alta contribución del $\text{CO}_2$ fósil en la materia carbonosa en los aerosoles de la Ciudad de México.
(Hernández-López et al., 2021)	CDMX	Con datos de 2015, 2016 y 2019 se realizó un estudio de composición elemental de muestras de $\text{PM}_{2.5}$ . Se aplicó el modelo de factorización matricial positiva (PMF), para identificar fuentes contaminantes y sus contribuciones a la masa total. Se identificaron cinco fuentes.
(Isley et al., 2018)	Suva y Kinoya	Se determinaron los porcentajes de FC y BC mediante análisis de $^{14}\text{C}$ por AMS. Se obtuvo que el total del carbono no carbonatado en Suva contiene un 81 % de carbono fósil, originado de vehículos, transporte marítimo, generación de energía e industria. En Kinoya el 30 % fue identificado como BC.
(Major et al., 2021)	Debrecen	Se analizó la concentración en masa y las proporciones de aerosoles en las $\text{PM}_{2.5}$ , así como la fracción de OC, EC y $^{14}\text{C}$ para determinar las posibles fuentes locales y regionales. Los

Referencia	Sitio de estudio	Resultados
		<p>resultados obtenidos indican que el promedio de carbono orgánico secundario fue de <math>4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> y la relación de OC/EC fue de 6.9 lo cual indica predominio de procesos de combustión en invierno. La fracción contemporánea de carbono fue de 0.77, indicando que la fuente corresponde a la quema de madera.</p>

Elaboración propia.

## 4 Justificación

Asociado a la quema de combustibles fósiles, ha surgido un interés en comprender cómo estas actividades influyen en el aumento de carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC), generando grandes cantidades de partículas con diversos contenidos que pueden afectar tanto el ambiente como la salud, además de contribuir al calentamiento global. La justificación para el muestreo y análisis de aerosoles atmosféricos con  $^{14}\text{C}$  en el puerto de Manzanillo, Colima, México, se basa en varios puntos críticos y relevantes para la investigación ambiental y climatológica. Debido a que el puerto de Manzanillo posee un ecosistema relacionado con la reserva de la Biosfera del Archipiélago de Revillagigedo que es sensible a los cambios en la calidad del aire. Entender la composición de los aerosoles, incluyendo fuentes de carbono, es vital para evaluar el impacto humano y natural en estos ecosistemas y para la conservación de la Biodiversidad; ya que con la información obtenida se pueden proponer planes para disminución de las emisiones a la atmósfera.

Los aerosoles juegan un papel significativo en el clima regional y global, impactando tanto en la radiación solar que llega a la Tierra como la formación de nubes. Analizar la proporción de carbono moderno y fósil, permite entender mejor su papel en el balance térmico y los patrones climáticos que se encuentran en el puerto.

La fracción  $\text{PM}_{2.5}$  de los aerosoles está asociada con problemas respiratorios y cardiovasculares en humanos. Considerando que el puerto de Manzanillo cuenta con gran actividad turística, al caracterizar estas partículas y sus fuentes, se pueden formular estrategias más efectivas para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública.

La información detallada sobre la composición y fuentes de los aerosoles es esencial para el desarrollo de políticas y regulaciones ambientales. Los resultados de este estudio pueden ayudar en la toma de decisiones informadas a nivel legislativo y de gestión ambiental a nivel local, regional y nacional.

El uso de AMS para el análisis de  $^{14}\text{C}$  en aerosoles es un avance científico que proporciona datos precisos sobre el ciclo del carbono. Esto enriquece la base de datos científicos disponibles y abre nuevas preguntas de investigación en el campo de la geoquímica atmosférica.

Este trabajo promueve investigación interdisciplinaria fomentando la colaboración entre instituciones académicas, alentando el intercambio de conocimientos y la formación de investigadores especializados en técnicas avanzadas de muestreo y análisis.

La metodología propuesta puede ser un modelo para futuros estudios en otras regiones, mejorando potencialmente las técnicas de muestreo y análisis de aerosoles atmosféricos.

## 5 Hipótesis

El  $^{14}\text{C}$  es una herramienta de análisis que permitirá cuantificar el aporte de carbono moderno y fósil a las emisiones en atmosfera del puerto de Manzanillo. El  $^{14}\text{C}$  en aerosoles atmosféricos puede contribuir a conocer el impacto de las actividades antropogénicas locales o regionales en la composición de los aerosoles de dicho puerto.

## 6 Objetivos

### 6.1 General

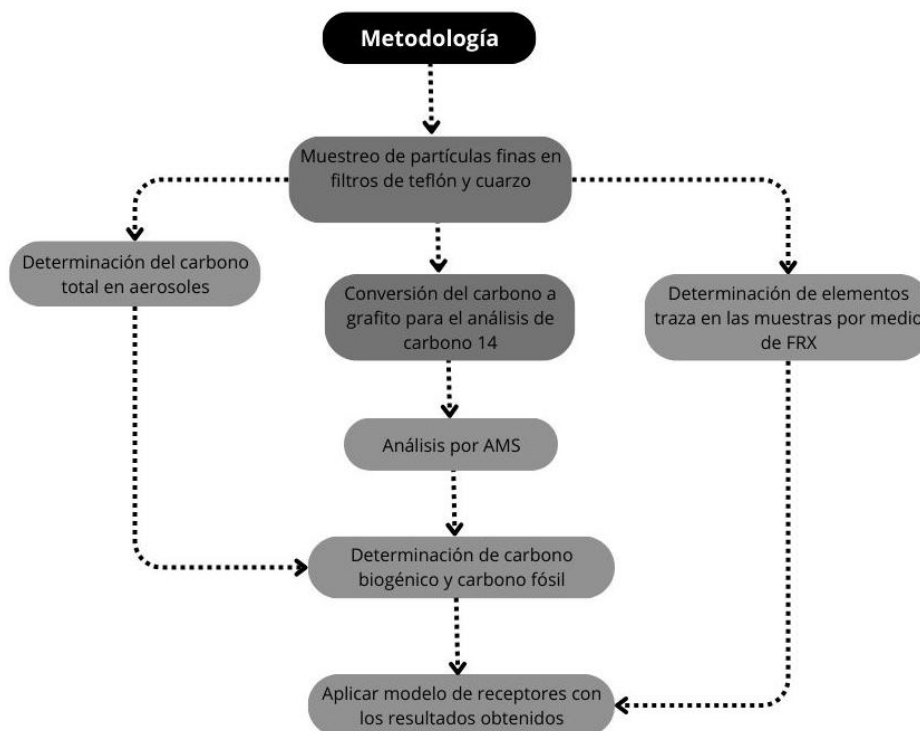
Determinar y cuantificar las contribuciones de fuentes biogénicas y fósiles a la contaminación atmosférica local del puerto de Manzanillo, Colima.

### 6.2 Particulares

- Realizar un muestreo de aerosoles, para estimar el carbono moderno y fósil en la fracción  $\text{PM}_{2.5}$  en aerosoles del puerto de Manzanillo Colima.
- Caracterizar la composición de  $^{14}\text{C}$  en aerosoles atmosféricos colectados en el puerto de Manzanillo, utilizando la técnica de AMS.
- Establecer los niveles de  $^{14}\text{C}$  en las muestras obtenidas y correlacionarlos con posibles fuentes de emisión locales y regionales.
- Determinar las concentraciones de los elementos: Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br y Pb en las muestras de  $\text{PM}_{2.5}$  mediante fluorescencia de rayos X.
- Cuantificar los niveles de carbono total, carbono biogénico y carbono fósil en las muestras, y determinar su relación con fuentes antropogénicas y naturales.
- Aplicar un modelo de receptores para identificar las fuentes emisoras de aerosoles y establecer el aporte relativo de cada fuente a la composición de la masa de  $\text{PM}_{2.5}$ .

## 7 Metodología

Como se muestra en la figura 10, en primer lugar, se realizó un muestreo de partículas finas en una sola campaña en el puerto de Manzanillo durante la estación húmeda-cálida (junio) de 2024.



**Figura 10.** Diagrama de la metodología a seguir (Elaboración Propia).

Con las muestras obtenidas de los filtros de cuarzo (tabla 4) se determinó la concentración de CT y  $^{14}\text{C}$ . Adicionalmente, los filtros de teflón se enviaron a análisis de fluorescencia de rayos X para determinar los elementos mayores y traza. El  $^{14}\text{C}$  se determinó con AMS. El CT se determinó por medio de combustión en el equipo analizador de elementos. Los resultados obtenidos de las muestras se analizaron con estadística básica. Posteriormente, se aplicó a los resultados un modelo de receptores para determinar las fuentes de contaminantes.

**Tabla 4.** Recolección de muestras PM<sub>2.5</sub> en el hotel Playa de Santiago de Manzanillo, Colima.

Muestra	Cantidad	Blancos	Duración del muestreo
Teflón	24	2	Se recolectaron durante 24 horas por un periodo de 24 días.
Cuarzo	13	1	Se recolectaron durante 48 horas por un periodo de 26 días.

Elaboración propia.

## 7.1 Metodología de muestreo de PM<sub>2.5</sub>

### Filtros de cuarzo:

Los filtros de cuarzo fueron acondicionados mediante tratamiento térmico, el cual consistió en colocarlos en una mufla a 600 °C durante 6 h con el fin de eliminar posibles contaminantes orgánicos presentes en el filtro y evitar interferencias en el análisis que se llevó a cabo posterior al muestreo. Después del tratamiento térmico, se mantuvieron en un desecador por 24 horas para ser pesados posteriormente. Los filtros se colocaron en papel aluminio después de ser pesados para evitar impurezas. Una vez que se utilizaron para la recolección de las muestras, nuevamente se colocaron en papel aluminio. Una vez en el laboratorio fueron colocados en desecador por 24 horas, para ser pesados posteriormente.

El muestreo se llevó a cabo utilizando un muestreador de alto volumen de PM<sub>2.5</sub> con un caudal de 1050 L/min, equipado con filtros de cuarzo Pallflex 2500 de 20 x 25 cm (QAT-UP; Pall Sciences, Ann Arbor, MI, EE. UU.) como se observa en la figura 11. Estos filtros fueron destinados para calcular el CT y <sup>14</sup>C en las muestras.

### Filtros de teflón:

Para garantizar que los filtros de teflón estuvieran libres de impurezas se realizó un tratamiento previo. Este consistió en un lavado con agua desionizada por ambos lados y colocarlos en una campana de flujo laminar, donde se dejaron secar para evitar deposición de partículas. Posterior a esto, fueron colocados en una cámara de acondicionamiento durante 24 horas a temperatura y humedad constantes, antes de ser pesados. Se colocaron en cajas Petri y fueron selladas con Parafilm, para conservar su integridad y se pudieran transportar. Después de ser usados para la

recolección de  $PM_{2.5}$ , nuevamente fueron colocados en cajas Petri y estas se sellaron con Parafilm. Ya que las muestras se encontraron en el laboratorio se sometieron nuevamente a la cámara de acondicionamiento durante 24 horas con la finalidad de repetir las condiciones iniciales de pesaje y determinar con exactitud la masa de las partículas.

Las muestras de  $PM_{2.5}$  se recolectaron utilizando muestreadores de aire portátiles tipo ARA (Figura 11), que operaron con un flujo de aire de 16.7 L/min, en filtros de teflón con un diámetro de 47 mm, con tamaño de poro de 2  $\mu m$  y con anillo de soporte. Estos filtros se emplearon para la determinación de la composición elemental mediante FRX.



**Figura 11.** Muestreador de alto volumen (lado izquierdo) y muestreador ARA (lado derecho), utilizados en la recolección de muestras. Elaboración propia.

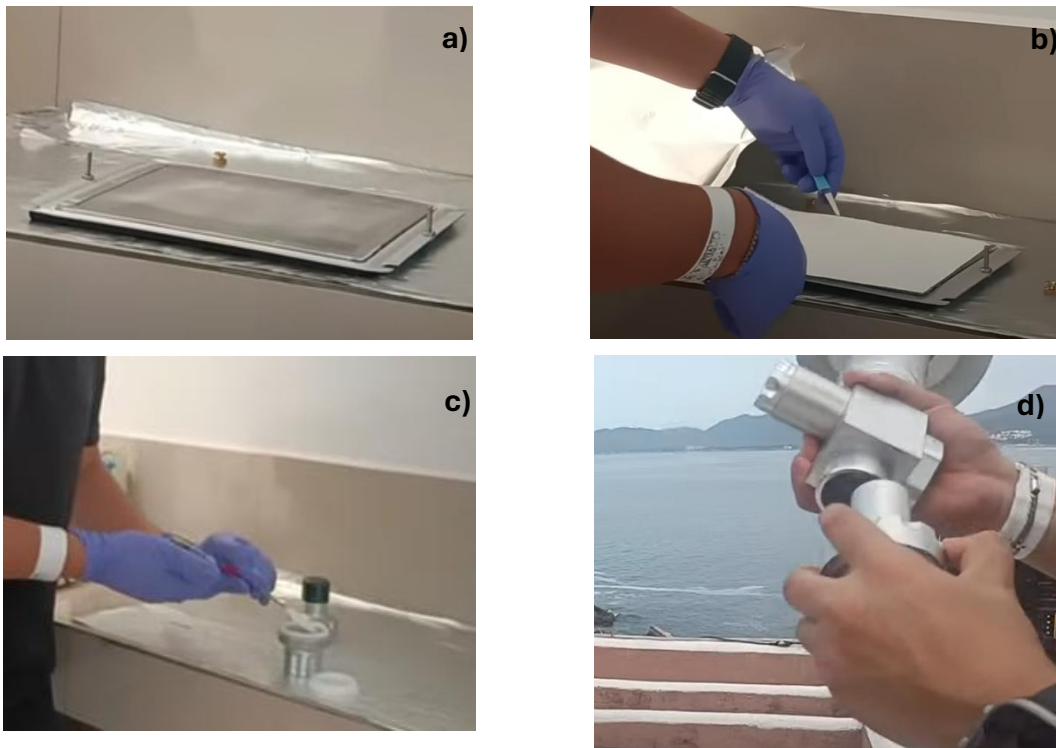
## 7.2 Protocolo de muestreo

Las muestras de los filtros de cuarzo se recogieron cada 48 horas durante un periodo de 26 días en junio de 2024, al norte del puerto comercial de Manzanillo Colima, en el hotel Playa de Santiago a 20 m de altura (coordenadas: 19°6'32" N, 104°21'3" O). Adicionalmente se colectaron 24 muestras de aerosoles durante 24 días en filtros de teflón para el análisis de elementos mediante FRX en la misma ubicación que los filtros de cuarzo. En la figura 12 se muestra donde se encuentra ubicado el puerto y el punto de muestreo.



**Figura 12.** Ubicación del punto de muestreo y el puerto de Manzanillo, Colima. Elaboración propia.

En la figura 13 se observa cómo se llevó a cabo el muestreo y que se tomaron las medidas necesarias para que no hubiera interferencias en los muestreos, evitando que estos se dañaran o contaminaran con agentes externos.



**Figura 13.** Cambio de filtros de Hi-Vol (a y b) y ARA (c y d). Elaboración propia.

### 7.3 CT en los aerosoles

Para obtener el CT de cada filtro de cuarzo, se tomó una pequeña muestra del filtro (aproximadamente  $1 \text{ cm}^2$ ) y se pesó en un crisol de estaño para posteriormente llevarla a combustión a  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  en presencia de oxígeno de alta pureza (99.999%), siendo este inyectado de forma controlada en el equipo analizador elemental (AE) (Vario Microcube), el cual se observa en la figura 14. Cada muestra se insertó en el horno de combustión, el cual ya se encontraba estabilizado a la temperatura mencionada, permitiendo que la oxidación se llevara a cabo de forma completa.



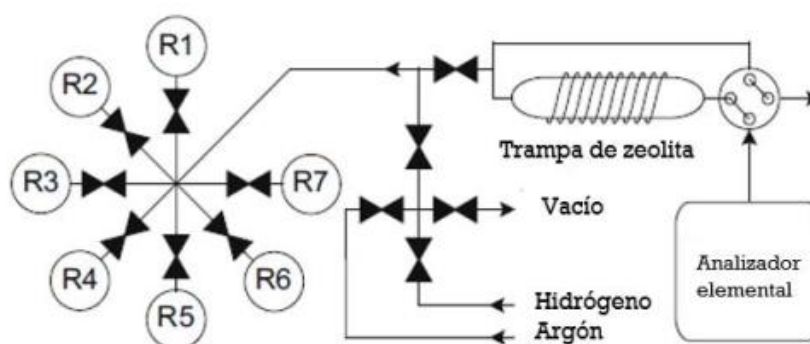
**Figura 14.** Analizador elemental (AE). Elaboración propia.

Después de la combustión los gases que se generaron se pasaron a un reactor de reducción, con una temperatura de  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ , compuesto por cobre metálico; los óxidos de nitrógeno que se produjeron fueron reducidos a nitrógeno molecular y el exceso de oxígeno fue eliminado.

De la reacción de combustión se obtuvieron diferentes gases los cuales fueron  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , al igual que  $\text{H}_2\text{O}$ . Se utilizó helio al 99.9999% de pureza como gas portador. La mezcla de gases se separó en una columna TDP (Temperature Programmed Desorption) con la finalidad de obtener el  $\text{CO}_2$  puro.

Los gases fueron detectados individualmente dentro de la columna TDP a través de la medición de la conductividad térmica que se realizó por medio de un termistor. Se usó una válvula que cuenta con 4 puertos automatizados, lo que permitió la detección del N<sub>2</sub> en primer lugar, para ser separado y adsorbido en una trampa de zeolita.

Posteriormente se aumentó la temperatura a 60 °C, para que el CO<sub>2</sub> fuera liberado del gas portador (He); se continuó aumentando la temperatura hasta los 100 °C donde es liberado el H<sub>2</sub>O, y finalmente al aumentar a 200 °C el SO<sub>2</sub> fue liberado (como se muestra en la figura 15). Todo el CO<sub>2</sub> obtenido fue contabilizado como CT.



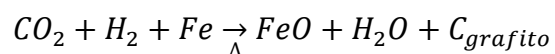
**Figura 15.** Esquema del proceso de obtención de CO<sub>2</sub> en el analizador de elementos (Aragón, 2014).

Ya que el CO<sub>2</sub> fue separado en la trampa de zeolita, fue inyectado a cada uno de los reactores del grafitizador, en condiciones de vacío, los cuales contenían hierro reducido.

#### 7.4 Conversión del carbono a grafito para el análisis de <sup>14</sup>C

La conversión de carbono contenido en los filtros de aerosoles a grafito se realizó en un equipo automatizado de grafitización (AGE III Ion Plus). El CO<sub>2</sub> obtenido en el AE, se transportó mediante un flujo de helio hasta los reactores de grafitización AGE III (mostrado en la figura 16), totalmente controlado por la computadora a la que se encuentra conectado.

El grafitizador consta de 7 hornos, los cuales cuentan con una capacidad de 4.4 ml; el CO<sub>2</sub> llegó a cada tubo de los reactores a los que previamente se le añadieron 5 mg de hierro que funciona como catalizador de la reacción y se agregó hidrógeno. Una vez que todos los reactores contenían CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> correspondiente, se calentaron los reactores a una temperatura de 558 °C para producir la formación de grafito. El carbono en forma de grafito se depositó sobre el hierro catalizador y el agua formada fue atrapada en enfriadores tipo Peltier colocados en la parte superior de los reactores mediante la siguiente reacción:



Se obtuvo así carbono en forma de grafito, el cual fue prensado en un cátodo de aluminio para ser introducido al AMS.

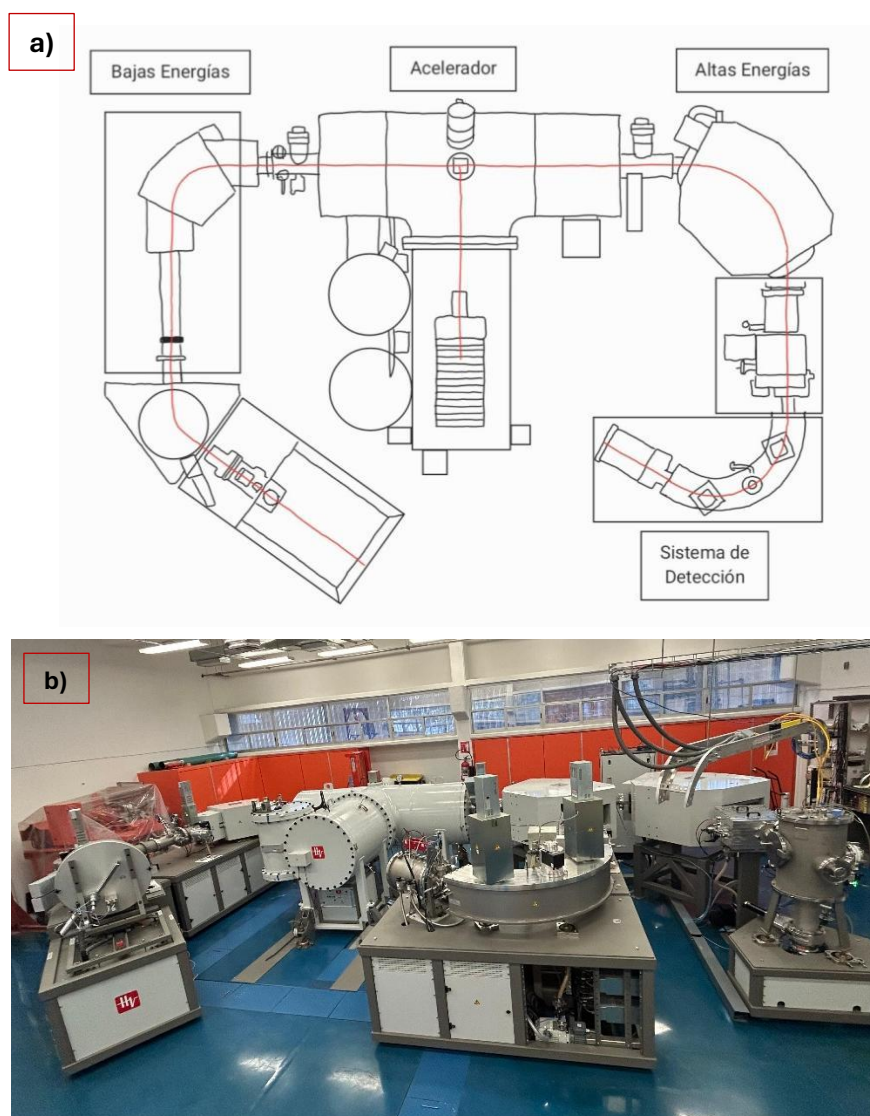


**Figura 16.** Grafitizador AGEIII (Instituto de Física de la UNAM).

La trampa de zeolita fue regenerada y limpiada entre cada proceso de inyección de CO<sub>2</sub>, mediante aplicación de calor, con el fin de evitar efectos de memoria que el sistema pueda tener en la muestra.

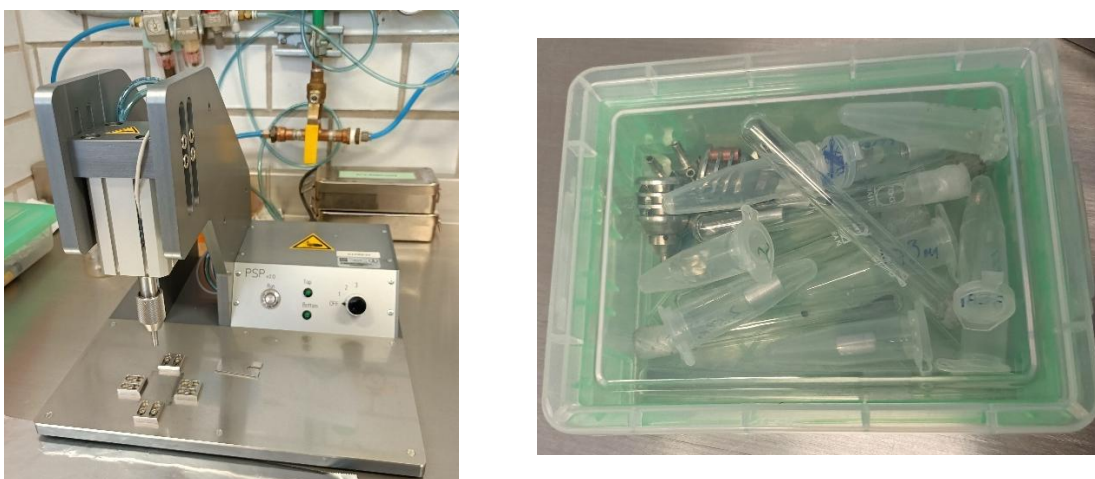
## 7.5 Análisis por AMS y cuantificación de $^{14}\text{C}$

El análisis de AMS y la cuantificación del  $^{14}\text{C}$  se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores del Instituto de Física de la UNAM en un acelerador del tipo Tandem de 1 MV de la empresa High Voltage Engineering Europe (figura 17), siendo el único que existe en México.



**Figura 17.** Diagrama correspondiente al sistema de AMS HVEE 1MV (en el inciso a se muestra el esquema general del AMS y en el inciso b se observa la constitución física del AMS), Instituto de Física de la UNAM.

Una vez que se obtuvo el carbono en forma de grafito, este fue prensado (Figura 18) en cátodos de aluminio y estos fueron colocados en portacátodos, los cuales se introdujeron en la rueda del carrusel del AMS.



**Figura 18.** Del lado izquierdo se observa el prensador de las muestras de grafito para ser introducidas en el AMS. Del lado derecho se observan los cátodos y porta cátodos (elaboración propia).

Para el análisis de AMS, se realizó una medición directa de los cocientes  $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de las muestras en forma de grafito. En el carrusel de 50 posiciones, se introdujeron:

- i. 4 cátodos del estándar primario (ácido oxálico HOx-II NIST SRM 4990C) cuya concentración absoluta se conoce).
- ii. 2 o 3 estándares secundarios de concentración de  $^{14}\text{C}$  conocida que se prepararon junto con las muestras desconocidas.
- iii. Blancos (que no contienen  $^{14}\text{C}$ ).
- iv. Las muestras de grafito obtenidas.

A partir de los cocientes  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  se calculó la Fracción Moderna ( $F_m$  o  $F^{14}\text{C}$ ), que mide la desviación del cociente  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de una muestra del valor

"Moderno" (el valor moderno corresponde al cociente  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de una muestra en el año 1950 de nuestra Era).

El porcentaje de carbono moderno (pMC) es  $F_m \times 100$  expresado en %. El valor del pMC en aerosoles refleja el tipo de emisiones de un sitio. La fracción de carbono biogénico y fósil contenido en los aerosoles se puede conocer utilizando el propio pMC, CT y un factor de corrección  $f$ :

$$\text{Carbono Biogénico (BC)} = (\text{pMC}_{\text{muestra}}/100 \times \text{CT}) \times f$$

$$\text{Carbono Fósil (FC)} = \text{CT} - \text{BC}$$

Donde  $f = 1/\text{pMC}_{\text{biósfera}}$  de la biósfera en el año en que se efectúa la medida y es necesario para estimar el carbono de la biomasa (Takahashi et al., 2007).

## 7.6 Fluorescencia de rayos X

Este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de aerosoles del Instituto de Física de la UNAM y la información proporcionada se usó para el análisis con modelos de receptores.

Los elementos se determinaron a través de un espectrómetro FRX, compuesto por un tubo de rayos X Oxford con ánodo de Rodio y detector RX-100CR Si-PIN Amptek (Bedford, MA, USA), con resolución de 180 eV a 5.9 KeV (Figura 19). En el equipo se introdujo un recorte del filtro con medidas de 1.5 x 2.5 cm. A través del paquete ORTEC ADC se obtuvo el espectro y se combinó con el código QXAS-AXIL para medir las concentraciones de los elementos contenidos en el filtro. A través del equipo se emitió un haz de alta energía sobre las muestras, lo que hizo que los átomos contenidos se excitarán y desplazarán los electrones de las capas internas, provocando vacancias dentro del átomo las cuales fueron cubiertas por electrones de capas externas, liberando energía.

Esta energía y la cantidad de rayos X emitidos por la muestra fueron detectados por el software antes mencionado, cada pico emitido permitió

identificar el elemento presente, la intensidad del pico determinó la concentración del elemento. El laboratorio utilizó estándares certificados con curvas de calibración para obtener los valores cuantitativos de las concentraciones encontradas.



**Figura 19.** Espectrómetro de fluorescencia de rayos X, del laboratorio de aerosoles en el Instituto de Física de la UNAM.

## 7.7 Meteorología

El análisis climatológico del viento se derivó utilizando el conjunto de datos de reanálisis ERA5, proporcionado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (CEPMPM). ERA5 ofrece datos horarios globales con una resolución horizontal de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  y combina datos del modelo con observaciones. Para este estudio, se usaron datos de viento de 10 metros que abarcan un período de 30 años, de 1993 a 2023, centrados en los meses de verano de mayo, junio y julio. Se empleó el coeficiente de variación (CV) para evaluar la variabilidad de la dirección del viento en el punto de muestreo. El CV se define como la relación entre la desviación estándar y la media de la dirección del viento,

expresada como porcentaje, y proporciona una medida normalizada de dispersión que permite realizar comparaciones entre puntos con diferentes condiciones de viento promedio. Este enfoque permite una caracterización robusta de los patrones de viento y su variabilidad en la región de estudio.

Para la rosa de vientos se utilizó el software WRPlot, el cual se utiliza para crear rosas de vientos a partir de los datos meteorológicos registrados en el sitio de muestreo. En el software se cargó la base de datos con información de la velocidad del viento y la dirección, para posteriormente generar la rosa de vientos, una vez que esta fue generada se exportó a Google earth para ser proyectada en el sitio de muestreo por medio de las coordenadas geográficas.

## 7.8 Modelo de receptores

Con los resultados obtenidos del CT, FC y BC; así como con los resultados de los elementos obtenidos por FRX, se buscó un modelo de receptores que se ajustara a los datos, para determinar las fuentes de origen de los contaminantes. Los modelos considerados fueron: PCA, CMB, PMF y UNMIX.

Debido a que el modelo de balance químico de masas (CMB) requiere perfiles de fuentes previos del sitio de muestreo, organizados en una base de datos y como no se contaba con esta información se descartó.

En cuanto al modelo UNMIX requiere un mínimo de muestras alrededor de 100 a 150, en este caso en el muestreo se obtuvieron 24 muestras por lo que de igual forma no se utilizó.

Los modelos seleccionados para aplicar fueron el PCA y el PMF para obtener la relación que existe entre los elementos determinados por medio del FRX y el AMS y de esta manera obtener las fuentes de origen de los contaminantes.

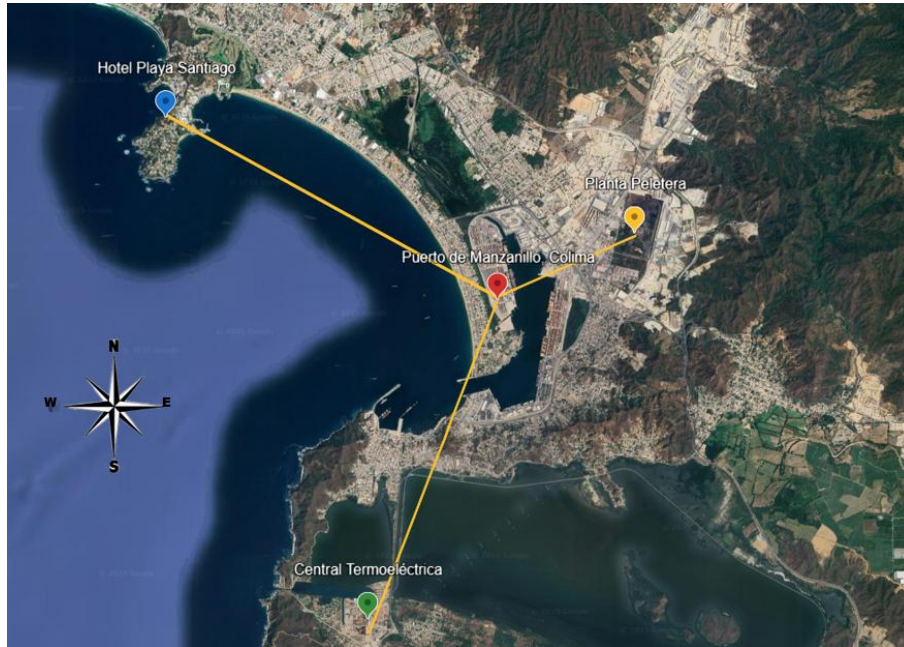
## 8 Resultados y análisis

El muestreo se llevó a cabo en el puerto de Manzanillo, Colima, obteniendo 24 filtros de teflón y 13 filtros de cuarzo, los cuales fueron utilizados para aplicar las técnicas de caracterización correspondientes. En el caso de los filtros de cuarzo, se determinó el carbono total, así como las  $PM_{2.5}$ , para posteriormente aplicar el análisis por AMS y obtener la fracción de  $^{14}C$  en las muestras, lo cual permite determinar el carbono fósil y carbono biogénico. En el caso de los filtros de teflón se obtuvieron los elementos mayores y traza mediante FRX, para aplicar el modelo de receptores.

### 8.1 Muestreo

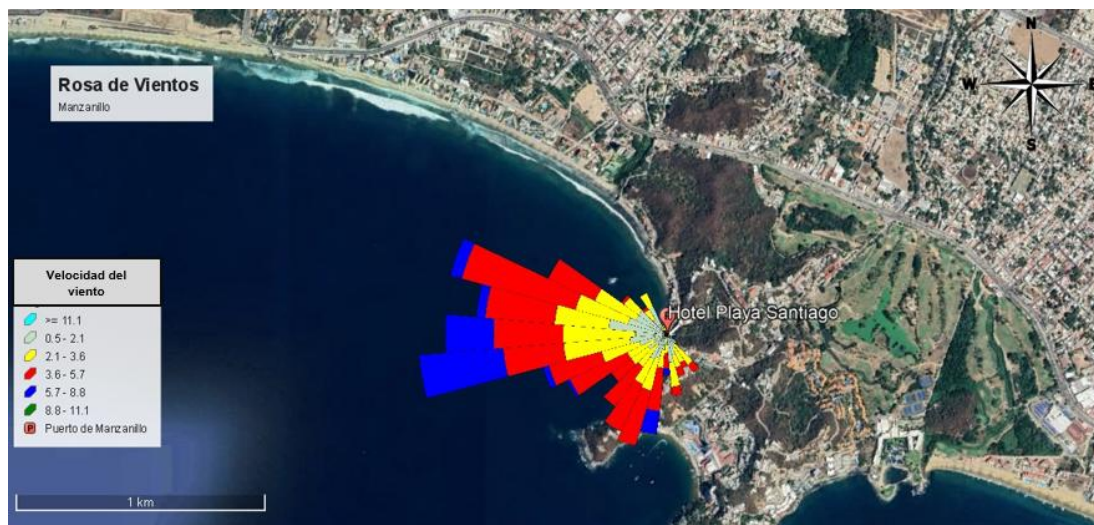
Una vez que se acudió a realizar el muestreo se observó que frente al sitio seleccionado se encontraba la costa, hacia el sur; con un flujo vehicular bajo, limitado principalmente al tránsito local. El puerto de Manzanillo estaba situado aproximadamente a 6 km al sureste del punto de muestreo. A 1 km del puerto, en dirección noreste, se encontró que existe una planta llamada Peña Colorada Pelletizing Plant dedicada al procesamiento de hierro para diferentes industrias siderúrgicas. Además, a 6 km al suroeste del puerto, se ubicó una planta termoeléctrica. (Figura 20).

Desde el punto de muestreo se observaron los barcos cargueros esperando ser recibidos. Dependiendo del día, podían contabilizarse hasta ocho embarcaciones en fila para ingresar y descargar mercancías. Se registró una alta afluencia de arcos, con tiempos de espera de hasta dos horas antes de ser atendidos.



**Figura 20.** Distancia entre el punto de muestreo, el puerto, la planta peletera y termoeléctrica de Manzanillo. Elaboración propia.

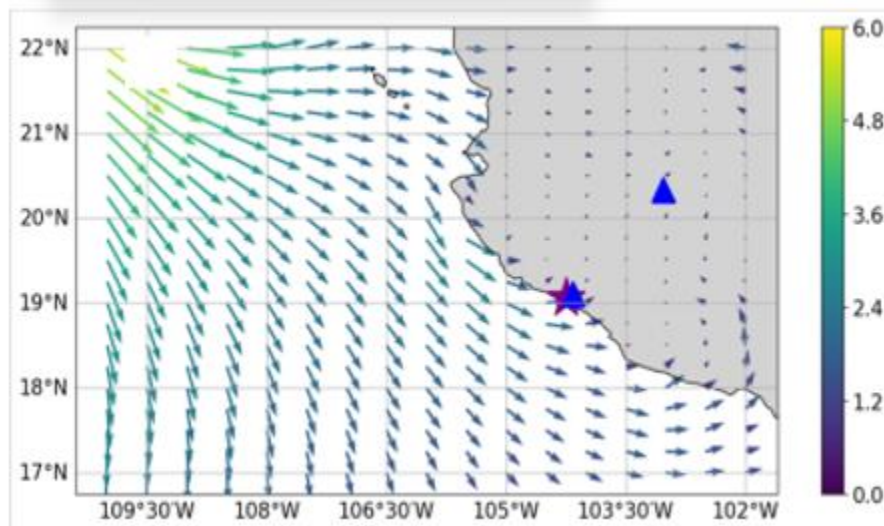
En la rosa de los vientos mostrada en la figura 21 se observa el patrón de las corrientes de aire, que se desplazan desde el mar hacia el continente. Este flujo incide directamente en la cantidad de  $PM_{2.5}$  capturada en los filtros empleados. Dado que los vientos predominan con dirección de noroeste a este, la mayor parte de las partículas transportadas tiene su origen en la costa y el mar.



**Figura 21.** Rosa de vientos de Manzanillo, elaboración propia.

## 8.2 Análisis meteorológico

La figura 22 muestra la climatología de la dirección y velocidad del viento cerca del sitio de muestreo de Manzanillo. Durante el verano, la alta presión del Pacífico Norte se desplaza hacia el noroeste, lo que provoca una inversión de los vientos a lo largo del Golfo de California debido al desarrollo de una baja térmica en el noroeste de México. Este proceso también debilita los fuertes vientos del sur a lo largo de la costa mexicana (Badan-Dangon et al., 1991).



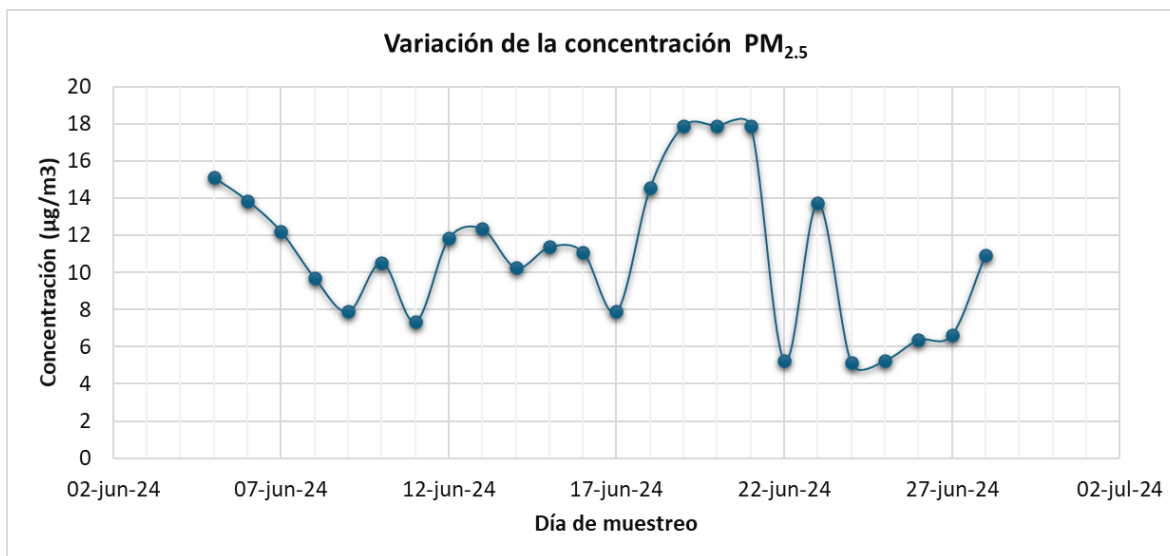
**Figura 22.** Climatología de la dirección del viento a 10 m de altura, de los meses de mayo, junio y julio de los últimos 30 años (1993-2023) con base de datos de cada hora de ERA5, para Manzanillo. (Hernández et al, 2026).

Cerca de Manzanillo, el contraste térmico tierra-mar provoca que el viento fluya tierra adentro, y el coeficiente de variación de la dirección del viento en este sitio de muestreo es del 5.81 %. Como resultado, las emisiones de combustibles fósiles capturadas en este sitio son mínimas, a pesar de que Manzanillo es una de las ciudades portuarias más importantes del país.

## 8.3 PM<sub>2.5</sub>

En la figura 23 se observa la variación de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> durante el muestreo en filtros de teflón, que van de 5 a 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con un promedio de 10.61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los días que presentaron mayor cantidad de partículas atmosféricas fueron

19, 20 y 21 de junio con una concentración de  $17.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para los tres días, previo a que se presentaran las primeras lluvias; los días en los cuales hubo menor concentración de partículas atmosféricas fueron el 22, 24 y 25 de junio, con 5.26, 5.12,  $5.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Durante el muestreo se presentaron lloviznas los días 22, 24 y 25, siendo estos días los que presentaron menor concentración de partículas, por lo que la lluvia influyó en la recolección de estas durante el muestreo.



**Figura 23.** Comportamiento de la concentración de la  $\text{PM}_{2.5}$  en filtros de teflón durante los días de muestreo. Elaboración propia.

De acuerdo con la NOM-025-SSA1-2021 los límites máximos permisibles para una exposición de 24 horas referente a  $\text{PM}_{2.5}$  es de una concentración de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En el muestreo los valores máximos reportados fueron de  $17.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , manteniéndose dentro de la norma.

En cuanto a la exposición prolongada (promedio anual) la norma indica que el valor debe estar dentro de los  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el promedio obtenido durante el periodo de muestreo se mantuvo dentro del límite ( $10.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); sin embargo, si se considera redondear los valores como se menciona en la norma, el promedio del periodo de muestreo llega a  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual ya supera el límite, aunque de manera muy moderada.

## 8.4 Carbono Total

En los filtros de cuarzo se detectó el carbono total teniendo como resultado las siguientes concentraciones que se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.** Resultados del Carbono total obtenido en los filtros de cuarzo.

Filtro	CT ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
05/06/2024	5.8
07/06/2024	4.5
09/06/2024	2.4
11/06/2024	3.9
13/06/2024	3.9
15/06/2024	2.9
17/06/2024	3.8
19/06/2024	3.2
21/06/2024	3.1
23/06/2024	2.6
25/06/2024	2.5
27/06/2024	2.5
Blanco	0

En los días 5, 11, 13 y 21 se encontró la mayor proporción de carbono total con respecto a los doce filtros obtenidos en el muestreo, esto es de importancia debido a que el carbono contenido permite determinar el  $^{14}\text{C}$  en las muestras de aerosoles obtenidos, ya que por cada átomo de  $^{14}\text{C}$  existen en promedio  $1 \times 10^{12}$  átomos de  $^{12}\text{C}$  y para que el análisis por AMS se pueda llevar a cabo se requiere una muestra de 1 mg aproximadamente.

## 8.5 Carbono fósil y carbono biogénico

Para el cálculo de la fracción de  $^{14}\text{C}$  se utilizaron las ecuaciones mencionadas en la metodología. El carbono total se toma como el grafito obtenido después de la grafitización, y el factor de corrección  $f$  se calcula con base en la ecuación:

$$f = \frac{100}{pMC_{\text{biósfera}}} = \frac{100}{101.65} = 0.984$$

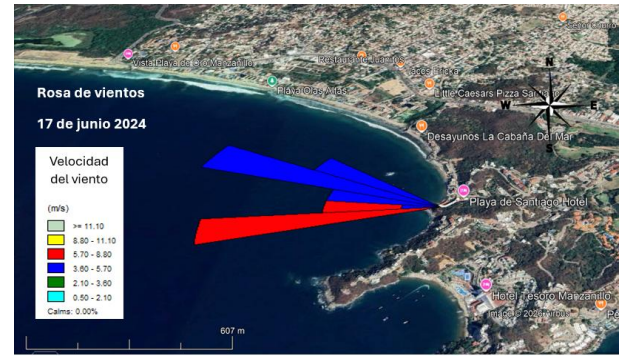
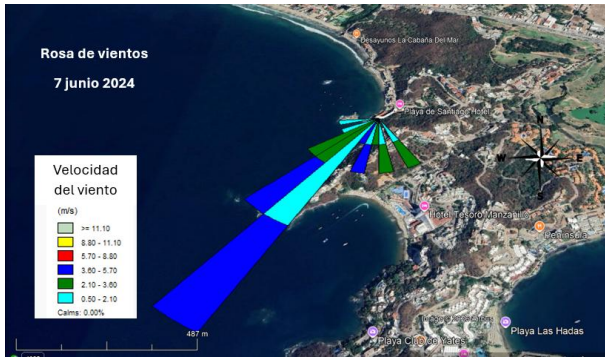
Donde el valor de  $pMC_{\text{biósfera}}$  esta reportado como 101.65, obtenido para granos de café colectadas en varios estados de la república mexicana de 2019 a 2024 (Hernández et al, 2025).

En la tabla 6 se muestran los porcentajes obtenidos de carbono moderno, carbono biogénico y carbono fósil.

**Tabla 6.** Porcentajes de carbono obtenidos en la muestra de grafito.

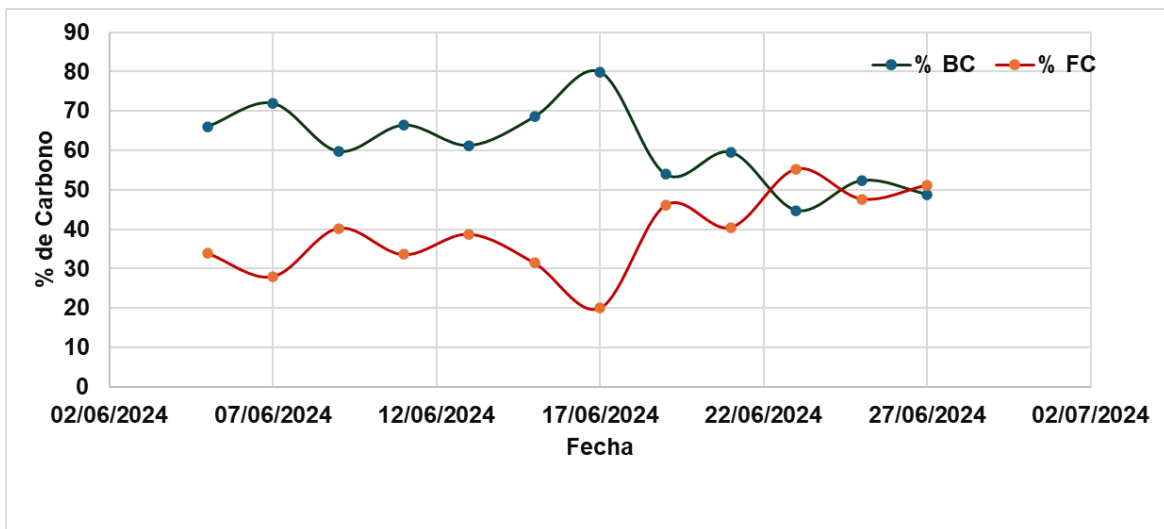
Filtro	pMC	%BC	%FC
05/06/2024	67.12	66	34
07/06/2024	73.15	72	28
09/06/2024	60.75	60	40
11/06/2024	67.52	66	34
13/06/2024	62.26	61	39
15/06/2024	69.72	69	31
17/06/2024	81.24	80	20
19/06/2024	54.82	54	46
21/06/2024	60.52	60	40
23/06/2024	45.50	45	55
25/06/2024	53.22	52	48
27/06/2024	49.61	49	51

Los porcentajes obtenidos de carbono moderno cambiaron significativamente en los días del muestreo. Se observa que en los días 7 y 17 de junio se presentó el mayor porcentaje de carbono moderno con 73.15 y 81.24 %, obteniendo mayor aportación de carbono biogénico lo que indica que esos días el aporte de combustibles fósiles fue mínimo y se considera que esos días fueron los menos contaminados del muestreo.



**Figura 24.** Rosa de vientos de los días 7 y 17 de junio de 2024. Elaboración propia.

En estos días la actividad portuaria fue menor en comparación con los demás días del muestreo. La velocidad del viento para el día 7 de junio fue de entre los 1.2 y 4.7 m/s, mientras que para el día 17 se encontró en el rango de 4.2 y 7.2 m/s, como se muestra en la figura 24. Las velocidades presentadas el día 17 de junio influyeron al momento de recolectar las  $PM_{2.5}$  ya que ese día se registró una concentración de  $7.9 \mu g/m^3$ .



**Figura 25.** Variación de carbono fósil y carbono moderno durante el muestreo. Elaboración propia.

La variación durante el muestreo de carbono fósil y carbono biogénico se muestra en la figura 25, donde se observa que el carbono de origen

biogénico es el que presenta mayor porcentaje en los primeros días de muestreo, es decir los primeros días de muestreo mostraron una posible mayor influencia relativa asociada a emisiones biogénicas naturales o procesos de formación secundaria de aerosoles orgánicos.

A partir del día 19 de junio se observa que las proporciones de carbono fósil aumentan, viéndose reflejado mayormente en el día 23 de junio donde el porcentaje de este fue de 55 %, indicando que ese día fue el que tuvo mayor influencia relativa de fuentes antropogénicas las cuales están asociadas a combustibles fósiles, como emisiones vehiculares, actividades industriales o portuarias.

Pese a que se presentaron lluvias, en la figura 24 se observa como al inicio del muestreo la influencia de combustibles fósiles fue mínima, pero después de iniciadas las primeras lluvias se observa mayor aportación, esto se puede deber a la deposición húmeda que arrastro mayor cantidad de aerosoles carbonoso de origen fósil.

## 8.6 Comparación con otros puertos marítimos y zonas urbanas

En la tabla 7 se muestra una comparación de la fracción de carbono moderno ( $F^{14}C$ ) en diferentes sitios en México y Cuba, en diferentes periodos.

**Tabla 7.** Fracción de carbono moderno en  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en diferentes sitios.

Sitio	PM	Estación del año	Año de la campaña	$F^{14}C$	Referencia
Manzanillo, Col.	$PM_{2.5}$	caliente-húmeda	2024	$0.62 \pm 0.01$	Este trabajo
CDMX	$PM_{10}$	Seca-fría	2017	$0.43 \pm 0.05$	Chávez, 2017
Cuernavaca, Mor.	$PM_{10}$	Seca-fría	2012	$0.67 \pm 0.06$	Solís, 2014
La Habana, Cuba	$PM_{10}$	Caliente-seca	2023	$0.44 \pm 0.04$	Hernández, 2025
CDMX	$PM_{2.5}$	Caliente-seca	2017	$0.44 \pm 0.05$	Chávez, 2017
Veracruz, Ver.	$PM_{2.5}$	Caliente-seca	2023	$0.46 \pm 0.07$	Hernández, 2025

La menor concentración de  $F^{14}C$  (la mayor contribución de carbono fósil) en aerosoles de  $PM_{2.5}$  se observó en los aerosoles recolectados en la Ciudad de México, seguida de Veracruz. Manzanillo presentó la menor contribución de combustibles de origen fósil, a pesar de ser un puerto con alta actividad comercial y contar con una planta termoeléctrica.

Los aerosoles de  $PM_{10}$  recolectados en la Ciudad de México y el puerto marítimo de La Habana mostraron valores bajos de  $F^{14}C$ , lo que indica una contribución significativa de las emisiones de combustibles fósiles. En contraste, Cuernavaca presentó valores altos de  $F^{14}C$ , lo que refleja un predominio de fuentes modernas de carbono, como la quema de biomasa o las emisiones biogénicas. Esta comparación destaca la influencia de las actividades urbanas e industriales en la composición isotópica de carbono de los aerosoles, ya que Cuernavaca está menos industrializada que la Ciudad de México y La Habana, que se caracterizan por un mayor consumo de combustibles fósiles.

## 8.7 Fluorescencia de rayos X

Las muestras obtenidas de los filtros de teflón fueron enviadas al laboratorio de aerosoles ubicado en el Instituto de Física de la UNAM, donde se realizó la fluorescencia de rayos X obteniéndose concentraciones de los elementos Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br y Pb, los resultados se muestran en las tablas 8, 9 y 10.

**Tabla 8.** Concentraciones de Mg, Al, Si, S y Cl detectadas en los filtros de teflón.

Fecha	Concentración ( $\mu g/m^3$ )				
	Mg	Al	Si	S	Cl
05/06/2024	0.1123	0.0888	0.2520	1.1166	0.5580
06/06/2024	0.2105	0.0837	0.1860	1.1249	0.3221
07/06/2024		0.0761	0.1696	0.9830	0.3043
08/06/2024		0.0761	0.1696	0.9830	0.3043
09/06/2024		0.0634	0.1178	0.9999	0.3732
10/06/2024	0.1824	0.0330	0.1308	0.9881	0.7551
11/06/2024	0.1965	0.1496	0.1396	0.9162	0.3625
12/06/2024	0.4070		0.1437	1.1727	0.2629

13/06/2024		0.0964	0.2193	1.1663	0.4079
14/06/2024	0.2386	0.0862	0.1131	1.1441	0.4353
15/06/2024		0.0634	0.1131	1.0078	0.4525
16/06/2024		0.0482	0.0858	1.0282	0.7057
17/06/2024	0.1263		0.0388	0.7517	0.3965
18/06/2024	0.2105		0.0436	0.7534	0.3960
19/06/2024	0.1965	0.1192	0.1369	0.9670	2.6187
20/06/2024		0.1623	0.1083	1.2497	1.6378
21/06/2024	0.2666	0.0913	0.0940	1.0789	1.6942
22/06/2024			0.0300	0.5667	0.6346
23/06/2024	0.2105	0.0710	0.0654	0.7749	1.5401
24/06/2024	0.2666	0.0330	0.0654	0.5880	0.5231
25/06/2024	0.3929	0.1192	0.0232	0.2955	0.2324
26/06/2024	0.1965	0.0330	0.0545	0.5724	0.2791
27/06/2024	0.1965	0.0482	0.0381	0.8425	0.5539
28/06/2024			0.0613	0.7254	0.6825

**Tabla 9.** Concentraciones de K, Ca, Ti, V, Cr y Mn detectadas en los filtros de teflón.

Fecha	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )					
	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn
05/06/2024	0.1783	0.1080	0.0053		0.0031	0.0108
06/06/2024	0.1363	0.0680	0.0071		0.0115	0.0037
07/06/2024	0.2129	0.0764	0.0051	0.0052	0.0129	0.0057
08/06/2024	0.2129	0.0764	0.0051	0.0051	0.0127	0.0056
09/06/2024	0.1126	0.0596			0.0084	0.0071
10/06/2024	0.1608	0.1045			0.0090	0.0053
11/06/2024	0.1416	0.0671	0.0111	0.0052	0.0060	0.0019
12/06/2024	0.1685	0.0525	0.0040		0.0088	0.0028
13/06/2024	0.1664	0.0823	0.0087		0.0035	0.0010
14/06/2024	0.1633	0.0831	0.0056		0.0127	0.0056
15/06/2024	0.1940	0.0761	0.0031		0.0048	0.0059
16/06/2024	0.1272	0.0688			0.0075	0.0126
17/06/2024	0.1199	0.0493	0.0087		0.0138	0.0069
18/06/2024	0.1189	0.0506	0.0093		0.0137	0.0068
19/06/2024	0.1860	0.1375	0.0044		0.0117	0.0031
20/06/2024	0.1856	0.1105		0.0039	0.0063	0.0091

21/06/2024	0.2622	0.0994	0.0024	0.0120	0.0127	0.0096
22/06/2024	0.0891	0.0422	0.0038		0.0028	0.0156
23/06/2024	0.1189	0.0745			0.0083	0.0097
24/06/2024	0.0860	0.0482	0.0100		0.0125	0.0086
25/06/2024	0.0759	0.0569	0.0133		0.0125	0.0044
26/06/2024	0.0933	0.0471	0.0115	0.0049	0.0110	0.0062
27/06/2024	0.0912	0.0525			0.0029	0.0061
28/06/2024	0.1108	0.0750	0.0022		0.0094	0.0079

**Tabla 10.** Concentraciones de Fe, Ni, Cu, Zn, Br y Pb detectadas en los filtros de teflón.

Fecha	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )					
	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Pb
05/06/2024	0.1518		0.0077	0.0047	0.0093	0.0195
06/06/2024	0.1302		0.0052	0.0012		0.0177
07/06/2024	0.1051	0.0020	0.0072	0.0073		0.0195
08/06/2024	0.1049	0.0020	0.0072	0.0073		0.0198
09/06/2024	0.0570				0.0045	0.0159
10/06/2024	0.0493		0.0072	0.0030	0.0024	0.0204
11/06/2024	0.1296		0.0040	0.0049		0.0105
12/06/2024	0.0825		0.0109		0.0088	0.0186
13/06/2024	0.1238		0.0066	0.0041	0.0053	0.0213
14/06/2024	0.0768	0.0008	0.0106		0.0102	0.0135
15/06/2024	0.0768		0.0011	0.0017	0.0069	0.0219
16/06/2024	0.0537		0.0059		0.0092	0.0251
17/06/2024	0.0410		0.0073		0.0033	0.0183
18/06/2024	0.0409		0.0076		0.0039	0.0186
19/06/2024	0.0592	0.0039	0.0071		0.0020	0.0195
20/06/2024	0.1048	0.0035	0.0064	0.0038	0.0161	0.0183
21/06/2024	0.0582	0.0011	0.0046	0.0012	0.0089	0.0254
22/06/2024	0.0436		0.0036		0.0020	0.0144
23/06/2024	0.0372		0.0029	0.0010	0.0036	0.0114
24/06/2024	0.0840		0.0058	0.0052		0.0156
25/06/2024	0.0398		0.0053		0.0034	0.0141
26/06/2024	0.1038		0.0056	0.0047	0.0078	0.0129
27/06/2024	0.0553		0.0026		0.0056	0.0099
28/06/2024	0.1023		0.0051	0.0018	0.0055	0.0147

El fósforo tuvo concentraciones indetectables por lo que no se reporta en la caracterización de fluorescencia de rayos X. El índice de detección del fósforo se encuentra arriba de  $0.01\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

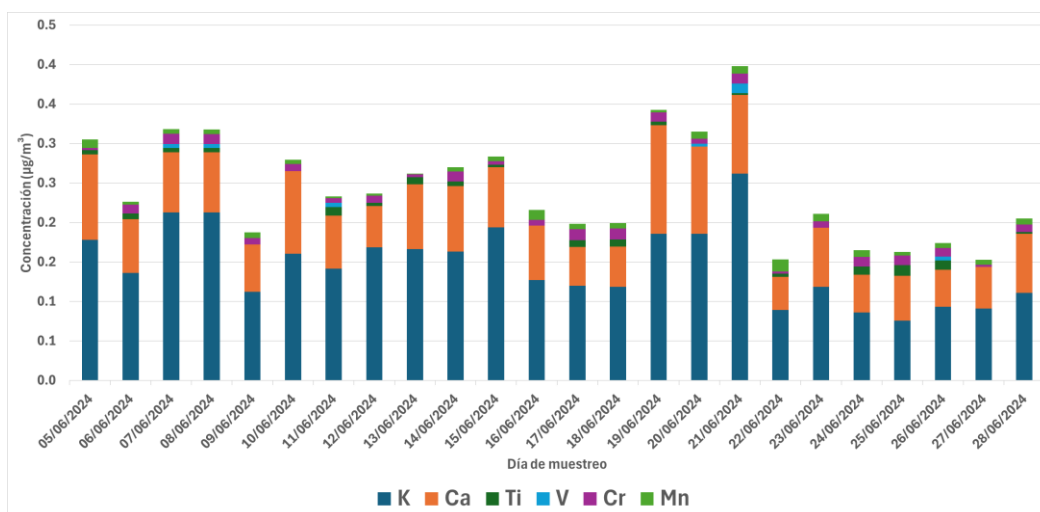
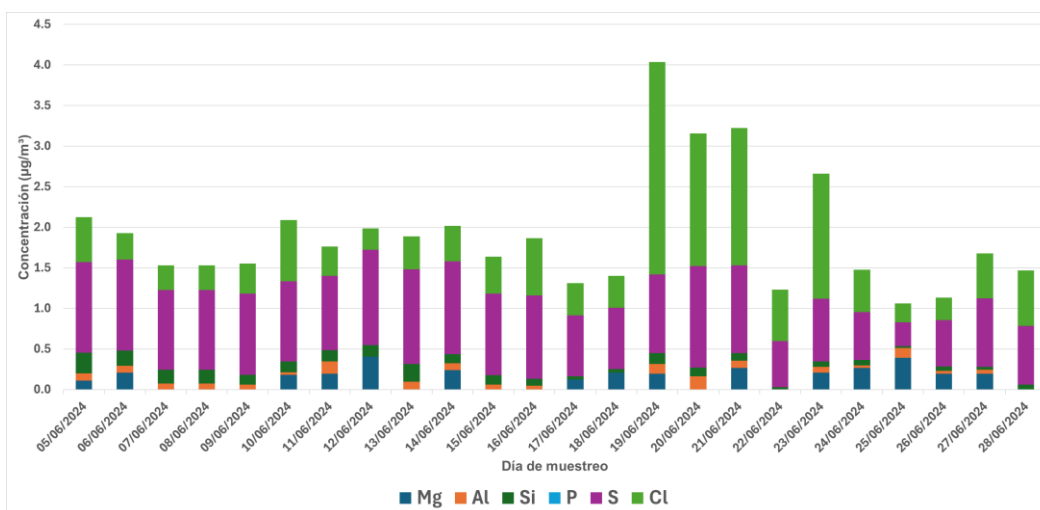
**Tabla 11.** Estadística básica de los elementos detectados en FRX

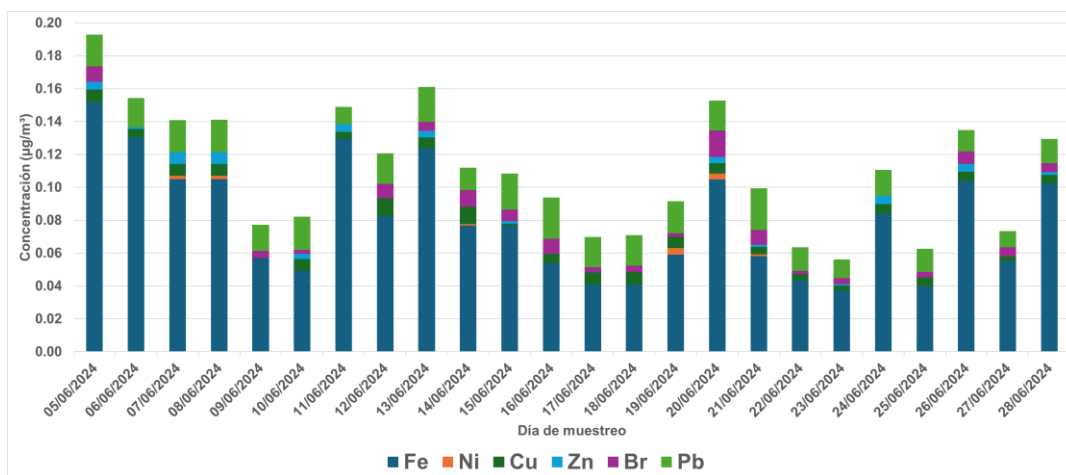
Elemento	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Media ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Varianza	Desviación estándar	Rango	Coefficiente de variación
Mg	0.11	0.41	0.23	0.01	0.08	0.29	36
Al	0.03	0.16	0.08	0.001	0.04	0.13	45
Si	0.02	0.25	0.11	0.004	0.06	0.23	57
S	0.30	1.25	0.91	0.06	0.24	0.95	26
Cl	0.23	2.62	0.68	0.35	0.59	2.39	86
K	0.08	0.26	0.15	0.002	0.05	0.19	33
Ca	0.04	0.14	0.07	0.001	0.02	0.10	33
Ti	0.002	0.01	0.01	0.00001	0.003	0.01	50
V	0.004	0.01	0.01	0.00001	0.003	0.01	49
Cr	0.003	0.01	0.01	0.00001	0.004	0.01	41
Mn	0.001	0.02	0.01	0.00001	0.003	0.01	50
Fe	0.037	0.15	0.08	0.001	0.034	0.11	43
Ni	0.001	0.004	0.002	0.000002	0.001	0.003	56
Cu	0.001	0.011	0.006	0.000005	0.002	0.010	39
Zn	0.001	0.007	0.004	0.000005	0.002	0.006	58
Br	0.002	0.016	0.006	0.000013	0.004	0.014	57
Pb	0.010	0.025	0.017	0.000017	0.004	0.016	24
PM <sub>2.5</sub>	5.1	17.9	11.0	15.9	4.0	12.8	36

En la tabla 11 se encuentran los máximos y mínimos, así como el promedio obtenido de los elementos detectados en el FRX; la varianza y la desviación estándar que se obtuvo para cada uno de ellos. De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis estadístico no se observan valores atípicos extremos, el Cl fue el elemento que presentó mayor variabilidad (desviación estándar de 0.590), lo cual indica que se presentaron fluctuaciones asociadas posiblemente a cambios meteorológicos como la dirección y velocidad del viento como se observa en la figura 21, donde se presentan las variaciones durante todo el mes. Los metales traza como el V y Ni presentaron concentraciones bajas y escasa variabilidad, los cuales están

asociados a combustibles fósiles, esto quiere decir que el sitio tiene mayor influencia biogénica coincidiendo con la F<sup>14</sup>C.

Se observa que el coeficiente de variación indica que la mayoría de los elementos presentan una dispersión moderada ya que su valor es menor al 40 %, esto permite considerar que la media sea representativa de la tendencia central. La distribución se muestra moderada para el S y heterogénea para el Cl, siendo este último el que tuvo la mayor variabilidad (86 % de coeficiente de variación).





**Figura 26.** Concentraciones por día de los elementos presentes en los filtros de teflón. Elaboración propia.

Tanto en las tablas de la 8 a la 11 y en la figura 26 se muestran los elementos que fueron detectados durante el muestreo; los que estuvieron presentes en todos los días de muestreo fueron el Si, S, Cl, K, Ca, Cr, Mn, Fe y Pb; los elementos que presentaron mayores concentraciones durante el muestreo fueron el Cl con 2.6187  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  el 19 de junio y el S con 1.2497  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  el 20 de junio. El V y el Ni se detectaron en concentraciones mínimas y en pocos días del muestreo. Entre los días 20 y 23 de junio se incrementaron las concentraciones de S, Si y Fe, posiblemente por el aumento en la actividad portuaria y material crustal. El S mostro una predominancia durante todo el muestreo, lo cual sugiere contribuciones significativas de combustión fósil y formación secundaria de sulfatos.

Estos elementos son de gran importancia al momento de aplicar los modelos de receptores ya que algunos son trazadores que se encuentran asociados a diferentes fuentes emisoras. El Cl considerado un trazador; presentó una alta desviación estándar y valores mínimo y máximo extremos durante el muestreo. Esto indica procedencia de fuentes puntuales como los aerosoles marinos.

El Si se encuentra asociado a la arena, considerando que el punto de muestreo estaba junto a la playa. En el caso del V y el Ni están asociados a combustión residual de buques, lo cual está relacionado con la actividad portuaria de Manzanillo, sin embargo, estos elementos se encontraron en trazas durante el muestreo,

detectándose solo en 6 días. La quema de biomasa está asociada a elementos como el K y el Cl, elementos que se detectaron en mayor cantidad durante el muestreo. El Zn, Pb, Fe, y Cu están relacionados con quema de combustibles fósiles. El Ti tuvo una media y dispersión bajas y su presencia fue de trazas en el muestreo lo cual puede indicar que se origina del suelo, rocas o polvo.

Los elementos que mostraron mayor variabilidad fueron el Cl, S, K, Zn y Br por lo que su procedencia podría deberse a fuentes móviles como la quema, tránsito local o emisiones industriales. Las PM<sub>2.5</sub> presentaron una dispersión similar a la de varios metales, lo cual se relaciona con las fuentes asociadas a estos.

En la tabla 12 se muestra la matriz de correlación de Pearson, donde se observa qué elementos están asociados, siendo esto de interés para conocer el origen de las fuentes de donde están siendo emitidos.

**Tabla 12.** Matriz de Correlación de Pearson obtenida en los elementos determinados con FRX.

Mg	1.000																		
Al	0.076	1.000																	
Si	-0.229	0.199	1.000																
S	-0.243	0.205	0.732	1.000															
Cl	-0.124	0.344	-0.035	0.196	1.000														
K	-0.072	0.274	0.609	0.717	0.350	1.000													
Ca	-0.254	0.388	0.528	0.557	0.715	0.669	1.000												
Ti	0.060	0.116	-0.212	-0.472	-0.378	-0.526	-0.381	1.000											
Cr	0.231	-0.129	-0.212	-0.214	0.017	0.100	-0.057	0.186	1.000										
Mn	-0.246	-0.169	-0.363	-0.209	0.169	-0.164	-0.112	-0.326	-0.210	1.000									
Fe	-0.175	0.237	0.744	0.431	-0.237	0.302	0.226	0.047	-0.234	-0.297	1.000								
Cu	0.146	0.017	0.339	0.348	-0.128	0.210	0.151	0.029	0.411	-0.247	0.131	1.000							
Zn	-0.130	-0.027	0.216	0.001	-0.438	0.029	-0.221	0.232	0.062	-0.041	0.264	0.415	1.000						
Br	-0.007	0.262	0.273	0.572	0.052	0.400	0.249	-0.122	-0.121	0.119	0.459	0.223	0.066	1.000					
Pb	-0.088	-0.059	0.387	0.486	0.201	0.655	0.421	-0.363	0.122	0.097	0.022	0.203	-0.097	0.219	1.000				
PM <sub>2.5</sub>	-0.174	0.355	0.449	0.655	0.651	0.700	0.755	-0.468	0.061	-0.030	0.178	0.180	-0.378	0.397	0.548	1.000			
	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Br	Pb	PM <sub>2.5</sub>			

Los elementos que presentan una fuerte correlación con las PM<sub>2.5</sub> son: Ca (0.755) el cual está relacionado con polvo mineral o suelo (Gaonkar et al., 2020; Visser et

al., 2015; Zhi et al., 2021); K (0.699) que se relaciona con posible quema de biomasa, combustión o fuentes marinas (Alghamdi et al., 2015; Gaonkar et al., 2020; Visser et al., 2015; Zhi et al., 2021); S (0.655) y Cl (0.651) asociándose con fuentes secundarias, reacciones atmosféricas o influencia marina (Gaonkar et al., 2020; Visser et al., 2015; Zhi et al., 2021); Pb (0.548) y Si (0.449) relacionados con origen industrial, polvo mineral o arena (Alghamdi et al., 2015; Zhi et al., 2021).

Se identificaron correlaciones negativas entre las  $PM_{2.5}$  y el Ti (-0.468), lo que sugiere una baja movilidad de este elemento o bien un origen diferente al de las partículas finas. En el caso del Zn, la correlación negativa encontrada (-0.378), aunque baja, podría señalar un origen industrial, pero con una contribución limitada a las  $PM_{2.5}$  (Gaonkar et al., 2020).

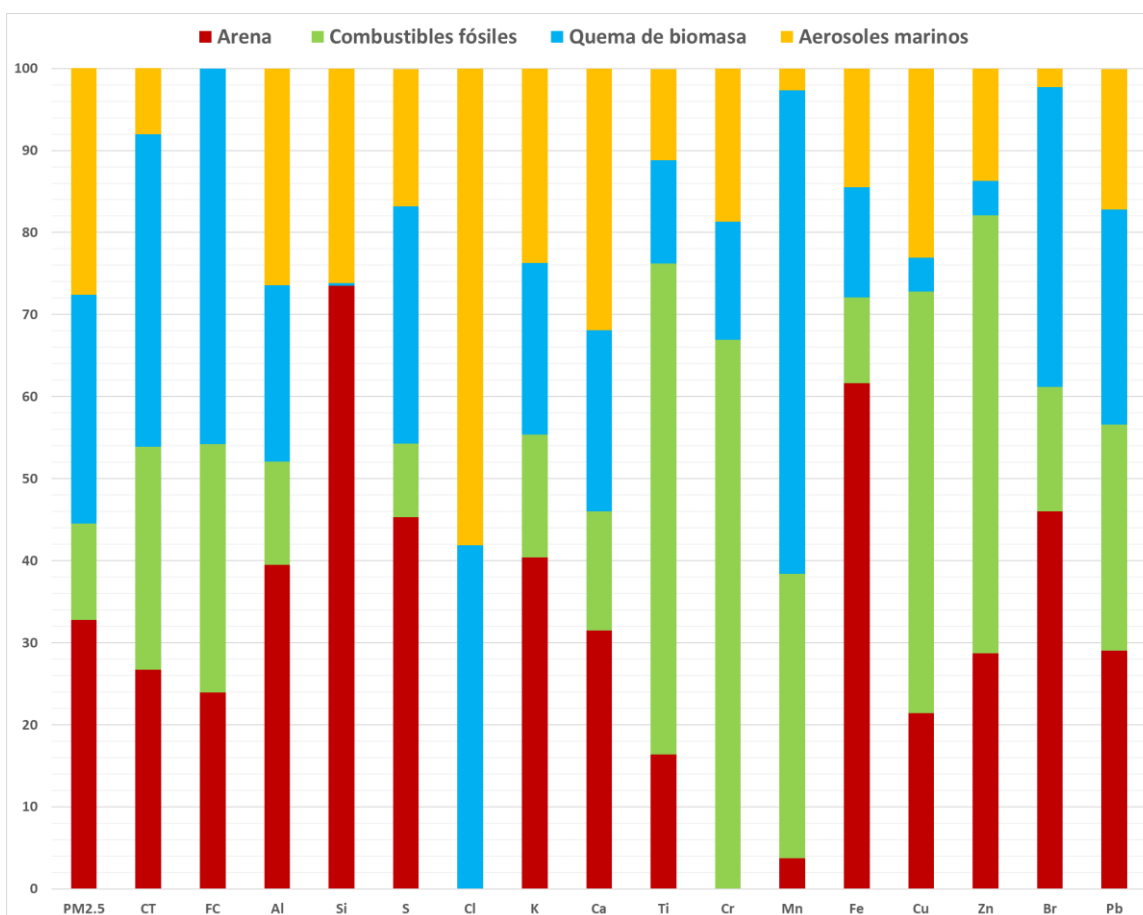
Los elementos que se relacionaron de forma relevante y que tienen perfiles similares son: Si-S (0.732), Si-K (0.609), Si-Ca (0.528) los cuales se encuentran como componentes en forma de minerales en el suelo, arena o polvos o resuspensión de suelo (Alghamdi et al., 2015). El Cu-Cr (0.411), Cu-Pb (0.203) y Zn-Cu (0.415) indican que su relación se puede deber a un origen industrial o metálico (Zhi et al., 2021). Con respecto al Br-S (0.572) y Br-Fe (0.459) están presentes en la combustión o bien en fuentes móviles (Alghamdi et al., 2015; Visser et al., 2015; Zhi et al., 2021).

## 8.8 Modelo de receptores

Con los resultados obtenidos a través de la Fluorescencia de rayos X y la espectrometría de masas con aceleradores se procedió a elegir un modelo de receptores. Los modelos aplicados fueron PMF y PCA, ya que ambos permiten conocer la relación que existe entre los diferentes elementos obtenidos en el muestreo para determinar las fuentes de origen de los contaminantes.

En el caso del PMF se obtuvo que el mejor Qrobust, fue para 4 fuentes de origen: arena, combustibles fósiles, quema de biomasa y aerosoles marinos. El porcentaje de contribución de cada elemento a cada factor se muestra en la figura 27. A través

de perfiles obtenidos en la base de datos SPECIATE, proporcionada por la EPA, se obtuvo la correlación de las fuentes.



**Figura 27.** Contribución en % de los elementos a cada uno de los 4 factores obtenidos en el modelo de receptores PMF. Donde el factor 1 es de color rojo, el factor 2 es verde, el factor 3 es azul y el factor 4 es amarillo. Fuente: elaboración propia.

La asignación de las fuentes se llevó a cabo de acuerdo con los elementos considerados trazadores y que fueron correlacionados en los factores obtenidos en el modelo PMF, los resultados se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13.** Elementos asociados con las fuentes de origen de emisión de contaminantes.

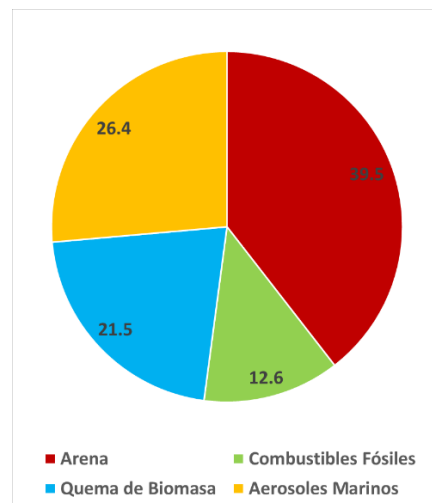
Factor	Elementos	Fuente de aerosol asociada
1	Si, Fe, K, Al, Ca	Arena
2	Zn, Cu, FC, Pb	Combustibles fósiles
3	Cl, CT, S, K	Quema de biomasa

Elaboración propia.

Para hacer la asignación de las fuentes se tomó en cuenta los porcentajes más elevados de los trazadores mostrados en la relación de las fuentes obtenidas, de tal forma que para la arena los elementos que más contribuyen en el factor 1 son el Si, con 73.5 %, Fe con 61.6 %, K con 40.4%, Al con 39.5 % y Ca con 31.5 %, los cuales tienen alta relación con la arena.

En el factor 2 los elementos con mayor porcentaje fueron Zn con 53.4 %, Cu con 51.4 %, FC con 30.3 % y Pb con 27.6 %, los cuales se relacionan con quema de combustibles fósiles. En el factor 3 los elementos que presentaron mayor porcentaje fueron Cl con 41.9 %, CT con 38.1 %, S con 28.9 y K 20.9 % que se asocian con quema de biomasa. En el factor 4 los elementos trazadores con mayor porcentaje fueron Cl con 58.1 %, Ca con 31.9, Al con 26.4 % y S con 16.7 % los cuales tienen relación con aerosoles marinos.

En cuanto a la aplicación del modelo PMF, permite conocer el porcentaje de aporte de cada uno de los trazadores a los factores y cuáles son los que más influyeron en el muestreo realizado en el sitio. En la figura 28 se muestran estas proporciones en porcentajes.



**Figura 28.** Porcentaje de influencia de cada factor obtenido en el modelo de receptores PMF.  
Elaboración propia.

En la figura 27 se observa que el mayor aporte es por parte de la arena, seguido por los aerosoles marinos y la fuente que menor proporción tiene es la de combustible fósiles, lo cual coincide con la  $F^{14}C$  obtenida que fue de 0.62. Ambos resultados indican que el sitio de muestreo presenta baja influencia de combustibles fósiles, por lo que se considera poco contaminado.

Cabe destacar que para que el modelo de receptores PMF sea válido debe tener un  $Q_{true}/Q_{exp}$  aproximado entre el rango de 1 y 1.5 (EPA, 2014), lo cual indicaría que el modelo se ajusta a los datos con los que fue alimentado. Sin embargo, se obtuvo un resultado de  $Q_{true}/Q_{exp}$  de 2.67 indicando que se tienen datos insuficientes o los datos son inconsistentes para la correcta aplicación del modelo o bien la variación de los datos obtenidos en el muestreo es mayor a la esperada, por lo que aun cuando los resultados son parecidos a los obtenidos en la  $F^{14}C$ , se debe considerar la incertidumbre obtenida en el mismo.

Para el modelo de PCA se obtuvo la matriz rotada que se muestra en la tabla 14, donde se consideraron los valores de cargas altas (valores absolutos mayores a 0.5) para identificar los elementos clave que definen cada componente.

**Tabla 14.** Matriz Rotada (Varimax) obtenida con el modelo de receptores PCA.

Elemento	Componente			
	1	2	3	4
Al	-0.11711	-0.24964	-0.67351	0.016718
Si	-0.44986	-0.66972	-0.08548	-0.41451
S	-0.69414	-0.56158	-0.04384	-0.1942
Cl	-0.57741	0.269291	-0.53291	0.43483
K	-0.85799	-0.21249	-0.03432	-0.21319
Ca	-0.74767	-0.11606	-0.48485	0.034123
Ti	0.674265	0.111155	-0.28113	-0.35597
Cr	-0.153	0.683392	-0.05226	-0.50348
Mn	-0.05511	0.051719	0.375395	0.577804
Fe	-0.03059	-0.76909	-0.19126	-0.3797
Cu	-0.25787	0.024408	-0.04117	-0.73337
Zn	0.211067	-0.10743	0.274929	-0.66838
Br	-0.31525	-0.48756	-0.14642	-0.13038
Pb	-0.77417	-0.03943	0.297902	-0.08432
PM <sub>2.5</sub>	-0.84572	-0.12183	-0.36413	0.085865
CT	-0.13082	-0.67565	-0.10498	0.208411
FC	0.10869	-0.11047	-0.83917	-0.11243

<b>Acumulado</b>	4.362432289	2.765874458	2.277652628	2.375853785
------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Elaboración propia.

Para el componente 1 se tiene la presencia de K (-0.86), PM<sub>2.5</sub> (-0.85), Ca (-0.75), S (-0.69), Cl (-0.58) y Pb (-0.77); los trazadores K, Cl, Pb y S comúnmente encontrados en la quema de leña y residuos domésticos o agrícolas, por lo que el componente 1 está relacionado con la quema de biomasa.

En el componente 2 los elementos que tienen mayor relevancia son Fe (-0.77), Si (-0.67), S (-0.56), CT (-0.68), Cr (0.68) y Cl (0.27); el Fe y el Si son componentes característicos del suelo, considerando que el muestreo se llevó a cabo en una costa a orillas del mar, este se asocia con arena.

El componente 3 presentó una carga dominante en FC (-0.84), Al (-0.67), Cl (-0.53) y Ca (-0.48); debido a que este componente presenta la mayor aportación de carbono fósil sugiere que su origen es de quema de combustibles fósiles, con menor proporción de mezcla de suelo o arena.

En el caso del componente 4 las mayores aportaciones fueron de Cu (-0.73), Zn (-0.67), Cr (-0.50) y Mn (0.58), siendo estos metales traza relacionados con fuentes de procesos o residuos industriales. Considerando que en el puerto de Manzanillo existe una importante actividad minera e industrial, este componente se considera relacionado con procesos industriales.

Para que se considere que el modelo de receptores PCA se ajusta a los datos, debe tener un valor mayor a 60 % de la varianza total esperada (Esbensen et al., 2003). En la tabla 15 se muestran los valores acumulados al momento de aplicar el modelo.

**Tabla 15.** Varianza explicada, varianza acumulada y eigenvalores que se obtuvieron en el modelo de receptores PCA.

Componente	Eigenvalores %	% Varianza explicada	% Acumulada
PC1	5.285483	31.09%	31.09%
PC2	2.630267	15.47%	46.56%
PC3	2.024354	11.91%	58.47%
PC4	1.841709	10.83%	69.30%

Elaboración propia.

La varianza esperada para los datos que alimentaron el modelo fue de 17 debido a que se utilizaron datos estandarizados, esto quiere decir que cada variable tiene una varianza de 1. Haciendo la suma de los acumulados y dividiendo entre la varianza esperada se obtiene:

$$\text{porcentaje total de varianza explicada} = \left( \frac{(4.362432289 + 2.765874458 + 2.277652628 + 2.375853785)}{17} \right) \times 100 = 69.31\%$$

Coincidiendo con los valores obtenidos que se observan en la tabla 13, donde se observa que la varianza acumulada es de 69.31 %, esto indica que el modelo explica el comportamiento y correlación de los datos analizados, lo cual lo hace válido para describir las fuentes de origen de los contaminantes.

De los dos modelos aplicados para conocer las fuentes de origen, el que se ajustó mejor a los datos fue el PCA, ya que se cumplieron con los requisitos mínimos para ser aceptado para la descripción de las correlaciones. En el caso del PMF se obtuvo una variabilidad mayor, debido a la falta de datos para alimentar el modelo, por lo que se toman los resultados obtenidos en el modelo PCA como los que se acercan más a la descripción de cómo se comportan las fuentes de emisión en el sitio de muestreo.

## 9 Conclusiones

La aplicación de la técnica de AMS permitió determinar la fracción moderna del carbono ( $F^{14}C$ ) en las muestras de aerosoles de  $PM_{2.5}$ , lo cual hizo posible cuantificar el porcentaje de carbono fósil y el carbono biogénico en el sitio de muestreo, dando como resultado un mayor aporte de carbono de origen biogénico, al obtener un valor de 0.62 en la fracción de  $^{14}C$ .

Este resultado sugiere que el sitio tuvo menor influencia de combustibles fósiles, al comparar con otros sitios como la CDMX que presentó valores de  $F^{14}C$  de 0.44 o bien el puerto de Veracruz que mostró un valor de  $F^{14}C$  de 0.46, se observa que en el puerto de Manzanillo presenta una menor contribución relativa carbono fósil.

Elementos como el V y el Ni asociados a la combustión de combustibles fósiles (petróleo, carbón), o a la producción de cemento se detectaron en pocos días de

muestreo y en trazas por lo que la contribución de estos procesos no fue significativa en el muestreo.

El modelo PCA permitió caracterizar cuatro fuentes de origen de los contaminantes que contribuyeron al  $PM_{2.5}$ : quema de biomasa, quema de combustibles fósiles, arena y procesos industriales. Estas cuatro fuentes obtenidas coinciden con la  $F^{14}C$  obtenida, confirmando que el sitio se ve mayormente influenciado por carbono biogénico.

Los resultados evidencian que la composición isotópica del carbono en aerosoles atmosféricos varía significativamente según el grado de urbanización y la actividad industrial de cada región. Las concentraciones más bajas de  $F^{14}C$  en la Ciudad de México, Veracruz y La Habana reflejan una mayor influencia de fuentes fósiles, asociadas principalmente a la quema de combustibles fósiles y las actividades industriales. Por el contrario, en ciudades con menor industrialización, como Cuernavaca, predomina el aporte de fuentes modernas de carbono, ligadas a procesos biogénicos o la quema de biomasa. En conjunto, estos hallazgos subrayan el papel que juegan el desarrollo urbano y el tipo de actividad económica en la composición y origen del material particulado atmosférico.

Se puede decir que la determinación de  $^{14}C$  es una herramienta útil al momento de cuantificar los aportes de carbono fósil y carbono biogénico siendo la técnica de AMS ideal para esta determinación por sus características de ultrasensibilidad ya que permite detectar y cuantificar radioisótopos en las proporciones de 1 partícula por  $10^{15}$  con respecto a los isotopos estables; a diferencia de la espectrometría de masas convencional o la desintegración radiactiva, la AMS hace un recuento de los átomos de manera individual, lo que la hace altamente confiable. Con la aplicación del modelo de receptores adecuado, se pudieron identificar razonablemente las fuentes que aportan al carbono fósil y al carbono biogénico del sitio y que permiten una asignación detallada de las contribuciones relativas.

Los resultados arrojados por el análisis de  $^{14}C$  y luego de la aplicación de los modelos de receptores, fueron consistentes con el patrón de la corriente de viento en los meses de junio, la cual se desplaza desde el mar hacia el continente (de

---

noroeste a este), de manera que las partículas que se arrastran provienen en su mayoría de la costa y del mar.

Este tipo de estudios es ideal para conocer cómo se comportan los aerosoles atmosféricos y las  $PM_{2.5}$ , ofreciendo una base de conocimiento que permite diseñar y aplicar políticas ambientales adecuadas que busquen proteger la salud y los ecosistemas que puedan ser afectados debido a las actividades portuarias.

## 10 Referencias bibliográficas

- Alam, K., Trautmann, T., & Blaschke, T. (2011). Aerosol optical properties and radiative forcing over mega-city Karachi. *Atmospheric Research*, 101(3), 773–782. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.05.007>
- Alghamdi, M. A., Almazroui, M., Shamy, M., Redal, M. A., Alkhalaf, A. K., Hussein, M. A., & Khoder, M. I. (2015). Characterization and elemental composition of atmospheric aerosol loads during springtime dust storm in western Saudi Arabia. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(2), 440–453. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.06.0110>
- ASIPONA. (2024). *Puerto de Manzanillo: Ubicación y Zona de influencia*. <https://www.puertomanzanillo.com.mx/esps/0020202/Ubicacion-y-Zona-de-Influencia.html>.
- Ayoub Meo, S., Adnan Abukhalaf, A., Sami, W., & Hoang, T. D. (2021). Effect of environmental pollution PM2.5, carbon monoxide, and ozone on the incidence and mortality due to SARS-CoV-2 infection in London, United Kingdom. *Journal of King Saud University - Science*, 33(3). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101373>
- Baklanov, A., Aloyan, A., Mahura, A., Arutyunyan, V., & Luzan, P. (2011). Evaluation of source-receptor relationship for atmospheric pollutants using approaches of trajectory modelling, cluster, probability fields analyses and adjoint equations. *Atmospheric Pollution Research*, 2(4), 400–408. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.045>
- Becker, J. S. (2012). Inorganic Mass Spectrometry of Radionuclides. In *Handbook of Radioactivity Analysis* (pp. 833–870). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384873-4.00013-X>
- Belis, C. A., Karagulian, F., Larsen, B. R., & Hopke, P. K. (2013). Critical review and meta-analysis of ambient particulate matter source apportionment using receptor models in Europe. In *Atmospheric Environment* (Vol. 69, pp. 94–108). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.009>
- Bruker. (2025). *Expectrometría de Fluorescencia de rayos X*. <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/elemental-analyzers/xrf-spectrometers/how-does-xrf-work.html>
- Buseck, P. R., & Schwartz, S. E. (2013). Tropospheric Aerosols. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Vol. 5, pp. 95–137). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00404-6>

- Cabello-Torres, R. J., Carbo-Bustinza, N., Romero-Cabello, E. A., Ureta Tolentino, J. M., Torres Armas, E. A., Turpo-Chaparro, J. E., Canas Rodrigues, P., & López-Gonzales, J. L. (2024). An exploratory analysis of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio during spring 2016–2018 in Metropolitan Lima. *Scientific Reports*, *14*(1), 9285. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59831-9>
- Chanda, F., Lin, K. xuan, Chaurembo, A. I., Huang, J. yuan, Zhang, H. juan, Deng, W. hui, Xu, Y. jing, Li, Y., Fu, L. dan, Cui, H. dong, Shu, C., Chen, Y., Xing, N., & Lin, H. bin. (2024). PM<sub>2.5</sub>-mediated cardiovascular disease in aging: Cardiometabolic risks, molecular mechanisms and potential interventions. In *Science of the Total Environment* (Vol. 954). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176255>
- Deshler, T. (2015). Chemistry of the Atmosphere: Observations for Chemistry (In Situ): Particles. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition* (pp. 379–386). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00264-4>
- Djikaev, Y. S., & Ruckenstein, E. (2019). Formation and evolution of aqueous organic aerosols via concurrent condensation and chemical aging. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 265, pp. 45–67). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.01.001>
- EPA. (2014). EPA. <https://www.epa.gov/air-research/positive-matrix-factorization-model-environmental-data-analyses>
- EPA. (2024). *Modelado de receptores de contaminantes del aire*. 2024. <https://www.epa.gov/scram/air-pollutant-receptor-modeling>
- Esbensen, K., Rodionov, O., Pomerantsev, A., Startsev, O., & Kucheryavski, S. (2003). Second Russian Winter School on Chemometrics (WSC-2), Feb. 28–March 06, Barnaul and Belokuriha, Altai, Russia. *Journal of Chemometrics*, *17*(7), 422–423. <https://doi.org/10.1002/cem.806>
- Gaonkar, C. V., Kumar, A., Matta, V. M., & Kurian, S. (2020). Assessment of crustal element and trace metal concentrations in atmospheric particulate matter over a coastal city in the Eastern Arabian Sea. *Journal of the Air and Waste Management Association*, *70*(1), 78–92. <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1680458>
- Gasca, J., Ortiz, E., Castillo, H., Jaimes, J. L., & González, U. (2004). The impact of liquefied petroleum gas usage on air quality in Mexico City. *Atmospheric Environment*, *38*(21), 3517–3527. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.12.042>
- Genga, A., Ielpo, P., Siciliano, T., & Siciliano, M. (2017). Carbonaceous particles and aerosol mass closure in PM<sub>2.5</sub> collected in a port city. *Atmospheric Research*, *183*, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.022>

Gómez, V., Solís, C., Chávez, E., Andrade, E., Ortiz, M. E., Huerta, A., Aragón, J., Rodríguez-Ceja, M., Martínez, M. A., & Ortiz, E. (2016). 14C content in aerosols in Mexico City. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 371, 365–369.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.10.003>

Gómez-Chávez, S., Solís, C., Gazzola, J., Chávez-Lomelí, E. R., Mondragón, M. A., Rodríguez-Ceja, M., & Martínez-Carrillo, M. A. (2017). Ams14C dating of materials recovered from the tunnel under the temple of the feathered serpent in Teotihuacan, Mexico. *Radiocarbon*, 59(2), 545–557. <https://doi.org/10.1017/RDC.2016.77>

Grace, J. (2013). Carbon Cycle. In *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition* (pp. 674–684). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00306-3>

Heal, M. R. (2014). The application of carbon-14 analyses to the source apportionment of atmospheric carbonaceous particulate matter: A review. In *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (Vol. 406, Number 1, pp. 81–98). Springer Verlag.  
<https://doi.org/10.1007/s00216-013-7404-1>

Heintzernberg, J. (2003). *Physics and Chemistry of Aerosols*. 34–40.

Hernández-López, A. E., Martín Del Campo, J. M., Mugica Álvarez, V., Valle-Hernández, B. L., Mejía-Ponce, L. V., Pineda-Santamaría, J. C., Reynoso-Cruces, S., Mendoza-Flores, J. A., & Rozanes-Valenzuela, D. (2021). A study of PM2.5 elemental composition in southwest Mexico city and development of receptor models with positive matrix factorization. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 37, 67–88.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.54066>

Hopke, P. K. (2016). Review of receptor modeling methods for source apportionment. In *Journal of the Air and Waste Management Association* (Vol. 66, Number 3, pp. 237–259). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1140693>

Hu, J., Zhou, R., Ding, R., Ye, D. W., & Su, Y. (2023). Effect of PM2.5 air pollution on the global burden of lower respiratory infections, 1990–2019: A systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *Journal of Hazardous Materials*, 459.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132215>

IMO. (2011). *Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por los protocolos de 1978 y 1997*.  
<https://www.imo.org/En/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/MARPOL-Annex-VI.aspx>.

- Isley, C. F., Nelson, P. F., Taylor, M. P., Williams, A. A., & Jacobsen, G. E. (2018). Radiocarbon determination of fossil and contemporary carbon contribution to aerosol in the Pacific Islands. *Science of the Total Environment*, *643*, 183–192.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.182>
- Jeřkovský, M., Kaizer, J., Kontuší, I., Lujaniené, G., Müllerová, M., & Povinec, P. P. (2020). Analysis of environmental radionuclides. In *Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 2: Radioanalytical Applications* (pp. 137–261). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814395-7.00003-9>
- Johnson, G. W., Ehrlich, R., Full, W., & Ramos, S. (2015). Principal Components Analysis and Receptor Models in Environmental Forensics. In *Introduction to Environmental Forensics: Third Edition* (pp. 609–653). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404696-2.00018-7>
- Jull, A. J. T., & Burr, G. S. (2013). Accelerator Mass Spectrometry. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Vol. 15, pp. 375–383). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01429-7>
- Kontul, I., Cherkinsky, A., Jeřkovský, M., Kaizer, J., Povinec, P. P., Sučák, K., & Zeman, J. (2024). Contributions of fossil and non-fossil fractions to total carbon in urban aerosols in Bratislava (Slovakia). *Journal of Environmental Radioactivity*, *278*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107512>
- Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Thurston, G. D., Virani, S., & Lavie, C. J. (2023). PM2.5 and cardiovascular diseases: State-of-the-Art review. In *International Journal of Cardiology: Cardiovascular Risk and Prevention* (Vol. 19). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijcrp.2023.200217>
- Lancaster, S. T., Sahlin, E., Oelze, M., Ostermann, M., Vogl, J., Laperche, V., Touze, S., Ghestem, J. P., Dalencourt, C., Gendre, R., Stammeier, J., Klein, O., Pröfrock, D., Kořarac, G., Jotanovic, A., Bergamaschi, L., Di Luzio, M., D'Agostino, G., Jaćimović, R., ... Irrgeher, J. (2024). Evaluation of X-ray fluorescence for analysing critical elements in three electronic waste matrices: A comprehensive comparison of analytical techniques. *Waste Management*, *190*, 496–505.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.015>
- Landis, M. S., Pancras, J. P., Graney, J. R., Stevens, R. K., Percy, K. E., & Krupa, S. (2012a). Receptor Modeling of Epiphytic Lichens to Elucidate the Sources and Spatial Distribution of Inorganic Air Pollution in the Athabasca Oil Sands Region. In *Developments in Environmental Science* (Vol. 11, pp. 427–467). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097760-7.00018-4>

- Landis, M. S., Pancras, J. P., Graney, J. R., Stevens, R. K., Percy, K. E., & Krupa, S. (2012b). Receptor Modeling of Epiphytic Lichens to Elucidate the Sources and Spatial Distribution of Inorganic Air Pollution in the Athabasca Oil Sands Region. In *Developments in Environmental Science* (Vol. 11, pp. 427–467). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097760-7.00018-4>
- L'Annunziata, M. F. (2016). Radioactivity and Our Well-Being. In *Radioactivity* (pp. 1–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63489-4.00001-0>
- Levin, I., & Hesshaimer, V. (2000). Radiocarbon - A unique tracer of global carbon cycle dynamics. In *Radiocarbon* (Vol. 42, Number 1, pp. 69–80). University of Arizona. <https://doi.org/10.1017/S0033822200053066>
- Li, H., Zhang, M., Wang, L., Ma, Y., Qin, W., & Gong, W. (2021). The effect of aerosol on downward diffuse radiation during winter haze in Wuhan, China. *Atmospheric Environment*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118714>
- Li, J., Tang, W., Li, S., He, C., Dai, Y., Feng, S., Zeng, C., Yang, T., Meng, Q., Meng, J., Pan, Y., Deji, S., Zhang, J., Xie, L., Guo, B., Lin, H., & Zhao, X. (2023). Ambient PM2.5 and its components associated with 10-year atherosclerotic cardiovascular disease risk in Chinese adults. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115371>
- Li, X., Zhang, C., Liu, P., Liu, J., Zhang, Y., Liu, C., & Mu, Y. (2020). Significant influence of the intensive agricultural activities on atmospheric PM2.5 during autumn harvest seasons in a rural area of the North China Plain. In *Atmospheric Environment* (Vol. 241). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117844>
- Lin, C. H., Liu, W. S., Wan, C., & Wang, H. H. (2024). PPAR $\gamma$  activation ameliorates PM2.5-induced renal tubular injury by inhibiting ferroptosis and epithelial–mesenchymal transition. *Current Research in Toxicology*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.crttox.2024.100189>
- Liu, D., He, C., Schwarz, J. P., & Wang, X. (2020). Lifecycle of light-absorbing carbonaceous aerosols in the atmosphere. In *npj Climate and Atmospheric Science* (Vol. 3, Number 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-00145-8>
- Liu, Q., Zhang, D., Liang, F., Liu, F., Xiao, L., An, X., Chen, X., & Liang, X. (2025). Air pollution and hypertension in rural versus urban children: Lipidomic insights into PM2.5 impacts. *Environmental Research*, 278, 121715. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121715>
- Ma, Z., Du, X., Zhao, C., Sun, Y., Jia, Y., Liang, X., Yu, X., & Gao, Y. (2025). Protective role of RGS2 in PM2.5-induced ovarian injury in rats: Modulation of Gq/11 signaling to

maintain granulosa cell [Ca<sup>2+</sup> + ]i stability. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118537>

Major, I., Furu, E., Varga, T., Horváth, A., Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Líztes-Szabó, Z., Jull, A. J. T., Kertész, Z., & Molnár, M. (2021a). Source identification of PM<sub>2.5</sub> carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary. *Science of the Total Environment*, 782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>

Major, I., Furu, E., Varga, T., Horváth, A., Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Líztes-Szabó, Z., Jull, A. J. T., Kertész, Z., & Molnár, M. (2021b). Source identification of PM<sub>2.5</sub> carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary. *Science of the Total Environment*, 782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>

Martínez-Carrillo, M. Á., Solís, C., Isaac-Olive, K., Andrade, E., Beltrán-Hernández, R. I., Martínez-Reséndiz, G., Ramírez-Reyes, A., Rivera, C. I. C., & Lucho-Constantino, C. A. (2010). Atmospheric elemental concentration determined by Particle-Induced X-ray Emission at Tlaxcoapan in central Mexico, and its relation to Tula industrial-corridor emissions. *Microchemical Journal*, 94(1), 48–52. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.08.011>

Massabò, D., & Prati, P. (2021a). An overview of optical and thermal methods for the characterization of carbonaceous aerosol. In *Rivista del Nuovo Cimento* (Vol. 44, Number 3, pp. 145–192). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40766-021-00017-8>

Massabò, D., & Prati, P. (2021b). An overview of optical and thermal methods for the characterization of carbonaceous aerosol. In *Rivista del Nuovo Cimento* (Vol. 44, Number 3, pp. 145–192). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40766-021-00017-8>

Matsumoto, K., Kawamura, K., Uchida, M., Shibata, Y., & Yoneda, M. (2001). Compound specific radiocarbon and  $\delta^{13}\text{C}$  measurements of fatty acids in a continental aerosol sample. *Geophysical Research Letters*, 28(24), 4587–4590. <https://doi.org/10.1029/2001GL013599>

Melquiades Z., M., Romero Vargas María Elba, O., Solís Rosales, C., & Chávez Violeta, G. (2021). Uso del isótopo <sup>14</sup>C como trazador de fuentes de emisión de CO<sub>2</sub>. In *Universidad Autónoma Metropolitana Revista tediq* (Vol. 7, Number 7).

- Morino, Y., Ohara, T., Xu, J., Hasegawa, S., Zhao, B., Fushimi, A., Tanabe, K., Kondo, M., Uchida, M., Yamaji, K., Yang, L., Song, S., Dong, W., Wu, Y., Wang, S., & Hao, J. (2015). Diurnal variations of fossil and nonfossil carbonaceous aerosols in Beijing. *Atmospheric Environment*, *122*, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.055>
- Ni, H., Huang, R. J., Yao, P., Cosijn, M. M., Kairys, N., Zhong, H., & Dusek, U. (2022). Organic aerosol formation and aging processes in Beijing constrained by size-resolved measurements of radiocarbon and stable isotopic  $^{13}\text{C}$ . *Environment International*, *158*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106890>
- Ortiz, E., Solís, C., Vivier-Bunge, A., Martínez Carrillo, M. A., Iuga, C., Lucho Constantino, C. A., & Beltrán-Hernández, R. I. (2011). Identificación de las fuentes emisoras de PM<sub>10</sub> en Tlaxcoapan, Hidalgo: Estudio de caso. *Capítulo 9 En El Libro: Contaminación Atmosférica y Tecnologías de Cero Emisiones de Carbón. Editado Por Leopoldo García Colín y Juan Rubén Varela Ham Universidad Autónoma Metropolitana, México*, (ISBN 978-607-477-504-4), 173–196.
- Perron, N., Szidat, S., Fahrni, S., Ruff, M., Wacker, L., Prévôt, A. S. H., & Baltensperger, U. (2010). Towards on-line  $^{14}\text{C}$  analysis of carbonaceous aerosol fractions. *Radiocarbon*, *52*(2), 761–768. <https://doi.org/10.1017/S003382220004577X>
- Pryor, S. C., Crippa, P., & Sullivan, R. C. (2015). Atmospheric Chemistry. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09177-6>
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M. M., Castillo, S., Pey, J., Rodríguez, S., Artiñano, B., Salvador, P., Sánchez, M., Garcia Dos Santos, S., Herce Garraleta, M. D., Fernandez-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M. C., Monfort, E., Sanz, M. J., Palomo-Marín, R., ... Sánchez de la Campa, A. (2008). Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) across Spain 1999–2005. *Atmospheric Environment*, *42*(17), 3964–3979. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.071>
- Quinn, P. K., & Bates, T. S. (2013). Ocean-Derived Aerosol and Its Climate Impacts. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Vol. 5, pp. 317–330). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00416-2>
- Rakowski, A. Z. (2011). Radiocarbon method in monitoring of fossil fuel emission. *Geochronometria*, *38*(4), 314–324. <https://doi.org/10.2478/s13386-011-0044-3>
- Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton,

- T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., ... Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rodríguez, H., & Raúl, M. (2020). *Contaminación por partículas PM 2.5*. [www.freepik.com](http://www.freepik.com)
- Russell, A., & Dennis, R. (2000). *NARSTO critical review of photochemical models and modeling*. 34, 2283–2324.
- Seinfeld, J. H. (2003). *TROPOSPHERIC CHEMISTRY AND COMPOSITION Contents*  
*Aerosols/Particles Aliphatic Hydrocarbons Ammonia and Ammonium Aromatic*  
*Hydrocarbons Biogenic Hydrocarbons (inc. isoprene) Carbon Monoxide H 2 Hydroxyl*  
*Radical Mercury Oxidizing Capacity PAN Sulfur Chemistry, Organic VOCs Overview*  
*Aerosols/Particles.*
- SEMARNAT. (2024). *Se cuida la salud de las personas y se protege su derecho a respirar aire limpio*. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/con-proaire-se-cuida-la-salud-de-las-personas-y-se-protege-su-derecho-a-respirar-aire-limpio?idiom=es>.
- SEMAR-WWF. (2023). *Impulsando la descarbonización del sector marítimo-portuario en México, con un enfoque en el puerto de Manzanillo*.
- Solís, C., Gómez, V., Ortiz, E., Chávez, E., Miranda, J., Aragón, J., Martínez, M. A., Castro, T., & Peralta, O. (2017). Ams14C and chemical composition of atmospheric aerosols from Mexico City. *Radiocarbon*, 59(2), 321–332. <https://doi.org/10.1017/RDC.2016.119>
- Stone, E. A., Hedman, C. J., Zhou, J., Mieritz, M., & Schauer, J. J. (2010a). Insights into the nature of secondary organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO experiment 2006. *Atmospheric Environment*, 44(3), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.036>
- Stone, E. A., Hedman, C. J., Zhou, J., Mieritz, M., & Schauer, J. J. (2010b). Insights into the nature of secondary organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO experiment 2006. *Atmospheric Environment*, 44(3), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.036>
- Syms, C. (2019). Principal Components Analysis. In *Encyclopedia of Ecology: Volume 1-4, Second Edition* (Vol. 3, pp. 566–573). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11152-2>
- Szidat, S., Jenk, T. M., Gäggeler, H. W., Synal, H. A., Fisseha, R., Baltensperger, U., Kalberer, M., Samburova, V., Reimann, S., Kasper-Giebl, A., & Hajdas, I. (2004). Radiocarbon (14C)-deduced biogenic and anthropogenic contributions to organic carbon (OC) of urban

aerosols from Zürich, Switzerland. *Atmospheric Environment*, 38(24), 4035–4044.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.066>

Takahashi, K., Hirabayashi, M., Tanabe, K., Shibata, Y., Nishikawa, M., & Sakamoto, K.

(2007). Radiocarbon content in urban atmospheric aerosols. *Water, Air, and Soil Pollution*, 185(1–4), 305–310. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9454-5>

Thakur, P. (2019). Radiochemical methods | food and environmental applications. In *Encyclopedia of Analytical Science* (pp. 1–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14223-4>

Tu, X., Fang, X., Fang, H., Ye, C., Liu, Z., Jia, X., He, D., Wang, J., Huang, H., Zou, C., & Yu, C. (2022). Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Ceramic Industrial Base during Winter. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(5). <https://doi.org/10.4209/aaqr.210390>

Vallero, D. (2014). Modeling Applications. In *Fundamentals of Air Pollution* (pp. 683–753). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-401733-7.00027-x>

Valsaraj, K. T., Ehrenhauser, F. S., Heath, A. A., & Vaitilingom, M. (2015). Mass Transport and Chemistry at the Air-Water Interface of Atmospheric Dispersoids. In *Food, Energy, and Water: The Chemistry Connection* (pp. 93–112). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800211-7.00003-X>

VAr, R., Dack, X., Costa Dantas, C., Moura Amorim, W. DE, & Maenhaut, W. (1982). ELEMENTAL CONSTITUENTS OF ATMOSPHERIC AEROSOLS IN RECIFE, NORTH-EAST BRAZIL. In *Environmental Pollution (Series B)* (Vol. 4).

Viana, M., Kuhlbusch, T. A. J., Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R. M., Hopke, P. K., Winiwarter, W., Vallius, M., Szidat, S., Prévôt, A. S. H., Hueglin, C., Bloemen, H., Wählín, P., Vecchi, R., Miranda, A. I., Kasper-Giebl, A., Maenhaut, W., & Hitzenberger, R. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. In *Journal of Aerosol Science* (Vol. 39, Number 10, pp. 827–849). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>

Visser, S., Slowik, J. G., Furger, M., Zotter, P., Bukowiecki, N., Canonaco, F., Flechsig, U., Appel, K., Green, D. C., Tremper, A. H., Young, D. E., Williams, P. I., Allan, J. D., Coe, H., Williams, L. R., Mohr, C., Xu, L., Ng, N. L., Nemitz, E., ... Prévôt, A. S. H. (2015). Advanced source apportionment of size-resolved trace elements at multiple sites in London during winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(19), 11291–11309. <https://doi.org/10.5194/acp-15-11291-2015>

- Wacker, J. F., Eiden, G. C., Lehn, S. A., & Koppenaal, D. W. (2016). Accelerator mass spectrometry (AMS). In *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (pp. 15–17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803224-4.00043-1>
- Walther, C., & Wendt, K. (2020). Radioisotope mass spectrometry. In *Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 1: Radiation Physics and Detectors* (pp. 861–898). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814397-1.00008-X>
- Wang, F. (2009). *F Factor Analysis and Principal-Components Analysis*.
- Wang, F., Yu, H., Wang, Z., Liang, W., Shi, G., Gao, J., Li, M., & Feng, Y. (2021). Review of online source apportionment research based on observation for ambient particulate matter. In *Science of the Total Environment* (Vol. 762). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144095>
- Wang, X., Xu, M., Xu, M., Jia, S., Xu, W., Zhang, W., Gao, Y., Xu, Q., Wang, A., & Hu, S. (2024). Mechanism of PM2.5 induced/aggravated allergic diseases and its prevention and treatment. *Allergy Medicine*, 2, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.allmed.2024.100012>
- Watson, J. G., & Chow, J. C. (2015). Receptor Models and Measurements for Identifying and Quantifying Air Pollution Sources. In *Introduction to Environmental Forensics: Third Edition* (pp. 677–706). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404696-2.00020-5>
- Yan, M., Ge, H., Zhang, L., Chen, X., Yang, X., Liu, F., Shan, A., Liang, F., Li, X., Ma, Z., Dong, G., Liu, Y., Chen, J., Wang, T., Zhao, B., Zeng, Q., Lu, X., Liu, Y., & Tang, N. jun. (2022). Long-term PM2.5 exposure in association with chronic respiratory diseases morbidity: A cohort study in Northern China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114025>
- Yang, S. R., Lee, J. H., Yang, J. H., & Park, G. Il. (2024). An estimation and radioactivity measurement for radiocarbon(14C) in the Korean nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.051>
- Yi, J., Kim, S. H., Lee, H., Chin, H. J., Park, J. Y., Jung, J., Song, J., Kwak, N., Ryu, J., & Kim, S. (2024). Air quality and kidney health: Assessing the effects of PM10, PM2.5, CO, and NO2 on renal function in primary glomerulonephritis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116593>
- Zhai, S., Zeng, J., Zhang, Y., Huang, J., Li, X., Wang, W., Zhang, T., Deng, Y., Yin, F., & Ma, Y. (2023). Combined health effects of PM2.5 components on respiratory mortality in short-term exposure using BKMR: A case study in Sichuan, China. *Science of the Total Environment*, 897. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165365>

---

Zhi, M., Zhang, X., Zhang, K., Ussher, S. J., Lv, W., Li, J., Gao, J., Luo, Y., & Meng, F. (2021).  
The characteristics of atmospheric particles and metal elements during winter in  
Beijing: Size distribution, source analysis, and environmental risk assessment.  
*Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111937>