



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD EN LA EXPOSICIÓN PERSONAL
A PARTÍCULAS FINAS (PM_{2.5}) Y SU CARACTERIZACIÓN QUÍMICA
EN LA REGIÓN DE EMERGENCIA SANITARIA AMBIENTAL SUR
DEL VALLE DEL MEZQUITAL**

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

I.Q. Elizabeth Sánchez Martínez

TUTOR

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM

Ciudad de México, enero del 2025



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
QUÍMICAS**

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD EN LA EXPOSICIÓN PERSONAL
A PARTÍCULAS FINAS (PM_{2.5}) Y SU CARACTERIZACIÓN QUÍMICA
EN LA REGIÓN DE EMERGENCIA SANITARIA AMBIENTAL SUR
DEL VALLE DEL MEZQUITAL**

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

P R E S E N T A

I.Q. Elizabeth Sánchez Martínez

Ciudad de México, enero del 2025



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a Facultad de Química, por ser parte de mi formación y de mi desarrollo profesional.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, por proporcionarme las herramientas y los espacios necesarios para la realización de este proyecto.

Al CONAHCYT, por la beca de posgrado que me fue otorgada durante mis estudios de maestría, CVU: 1233831.

Al Proyecto CONAHCYT PRONAI 318998 por el financiamiento recibido para el trabajo de campo y la adquisición de equipos de monitoreo de contaminantes atmosféricos.

Al Proyecto PAPIIT “Medición de la exposición potencial y la contaminación atmosférica en estaciones de transporte de superficie mediante sistemas AQEarth de bajo costo” con clave IT102124, por el apoyo económico recibido, el cual fue fundamental para la culminación de este trabajo.

A mi tutor, el Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua, por ser mi guía durante mi trayectoria académica, compartirme el gusto por la investigación y motivarme en seguir mi camino dentro de ella.

Al honorable jurado, conformado por la Dra. Josefina de Gyves y Marciniak, Dra. Araceli Patricia Peña Álvarez, Dra. Alma Luisa Revilla Vázquez, Dr. Óscar Augusto Peralta Rosales y Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas, por su valioso tiempo, sus observaciones y guía para fortalecer este trabajo.

Al Dr. Javier Miranda Martín del Campo y su equipo de trabajo, por el apoyo para realizar los análisis de caracterización química de partículas en su espectrómetro de rayos X.

Al Fís. Juan Carlos Pineda Santamaría por su trabajo y apoyo para caracterizar las muestras en el XRF y su enseñanza en el laboratorio.

A la Fundación Apaxtle, por brindarnos hospedaje y apoyo durante los muestreos realizados.

Al personal de las Escuelas Primarias Adolfo López Mateos y Benito Juárez en Atitalaquia, José María Morelos y Pavón y Juan Fernández Albarrán en Apaxco, y Primero de Mayo y Revolución en Atotonilco, por su cooperación y entusiasmo durante las actividades realizadas dentro de ellas para la recopilación de datos y difusión de la ciencia.

DEDICATORIAS

A mi familia, por el apoyo que me han dado para continuar con mis estudios de posgrado y por su amor incondicional en cada paso que doy.

A mi tutor, el Dr. Iván Yassmany, por ser mi guía durante mis estudios y realización de proyecto, además de su apoyo durante estos años. Su dedicación, sabiduría y paciencia han sido esenciales en mi formación académica y personal.

A los amigos que conocí en el deporte, a Yazmín Ramírez, José Ortega, Diego Sánchez y todo mi equipo, porque me motivaron a enfrentar nuevos desafíos y a superarme en cada entrenamiento. Gracias por los momentos compartidos, por la diversión y sobre todo por su amistad.

A Yazmín Hilerio, porque de nuevo tu apoyo ha sido muy importante para mí para llegar hasta donde estoy. Gracias por ayudarme a mejorar e impulsarme a superarme, porque tu fe en mí ha hecho que logre cosas que nunca creí posible. Gracias por ser esa persona que siempre está dispuesta a escucharme y darme ánimos cuando más los necesito. A Brandon Montiel, porque compartir contigo clases, proyectos, vivencias y experiencias, son de las cosas que más atesoro y aprecio. Gracias por ser mi compañero incondicional en cada paso de este viaje. Sin tu ayuda, muchas de estas experiencias no habrían sido posibles. Gracias por creer en mí en todo momento. Gracias a los dos porque hacen mi vida más bonita, los amo.

A todos los mencionados, mis más sinceros agradecimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. HIPÓTESIS.....	19
4. OBJETIVOS.....	21
5. MARCO TEÓRICO.....	23
5.1. Partículas suspendidas.....	23
5.1.1. Definición de PM _{2.5} y su importancia para la salud.....	23
5.1.2. Normatividad.....	24
5.2. Características de PM _{2.5}	25
5.2.1. Tamaño y composición de partículas PM _{2.5}	25
5.2.2. Identificación de componentes específicos (metales, elementos, etc.).....	26
5.3. Fuentes de PM _{2.5}	28
5.3.1. Emisiones vehiculares.....	28
5.3.2. Emisiones industriales.....	28
5.3.3. Vínculo entre fuentes específicas y la composición de PM _{2.5}	29
5.4. Exposición a PM _{2.5}	32
5.4.1. Exposición personal a PM _{2.5}	32
5.4.2. Exposición personal en zonas industriales.....	33
5.5. Métodos de caracterización de componentes en PM _{2.5}	33
5.5.1. Filtros de recolección.....	33
5.6. Técnicas de análisis de elementos químicos en PM _{2.5}	35
5.6.1. Fluorescencia de rayos X.....	35
5.6.2. Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado por inducción.....	36
5.6.3. Otras técnicas.....	37
5.6.4. Lista de elementos que pueden ser identificados.....	38
5.7. Impactos en la salud.....	39

5.7.1.	Efectos asociados a la exposición a PM _{2.5}	39
5.7.2.	Relación entre los componentes de PM _{2.5} y diferentes problemas de salud 40	
5.7.3.	Estudios epidemiológicos que vinculan la exposición a PM _{2.5} a enfermedades	41
6.	ÁREA DE ESTUDIO	43
6.1.	Área de estudio	43
6.2.	Sitios de muestreo	44
7.	MÉTODOS.....	49
7.1.	Muestreo.....	49
7.1.1.	Diseño experimental	49
7.1.2.	Instrumentación	50
7.2.	Análisis de la composición química.....	51
7.3.	Análisis estadísticos	53
8.	RESULTADOS.....	56
8.1.	Exposición a PM _{2.5}	56
8.2.	Composición Química	60
8.2.1.	RESA.....	60
8.2.2.	Apaxco	62
8.2.3.	Atitalaquia	64
8.2.4.	Atotonilco	65
8.3.	Comparación contra estudios existentes a nivel mundial.....	66
9.	CONCLUSIONES.....	70
	REFERENCIAS	71
	ANEXO A: Memoria de cálculo para realizar gráficos de cajas y bigotes	85
	ANEXO B: Memoria de cálculo para calcular promedios geométricos.....	88
	ANEXO C: Memoria de cálculo para realizar cálculo de masa total	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contribución de emisiones de PM _{2.5} por fuentes fijas en México	29
Figura 2. Contribución de emisiones de PM _{2.5} por categoría de fuentes de área en México	29
Figura 3. Ciudades de Apaxco, Estado de México, Atotonilco de Tula y Atitalaquia, Hidalgo con localización de las fábricas de cemento. Tomado de: Las comunidades locales del istmo oaxaqueño ante el megaproyecto eólico (Alonso, 2017) del Documento: Respuestas Comunitarias ante conflictos territoriales (Carrasco-Gallegos, 2017).....	44
Figura 4. Mapa de los sitios de muestreo en la ciudad de Apaxco. Las rutas se muestran con color azul, los puntos amarillos corresponden a escuelas primarias y el punto rojo es el sitio de monitoreo fijo donde se colocaron los equipos. Elaboración propia con datos de: Google Maps (2023).	45
Figura 5. Mapa de los sitios de muestreo en la ciudad de Atotonilco. Las rutas de muestreo se muestran con color azul, los puntos amarillos son las primarias descritas como puntos de interés y el punto rojo es el sitio fijo donde se colocaron los equipos de medición. Elaboración propia con datos de: Google Maps (2023).....	46
Figura 6. Mapa de los sitios de muestreo en la ciudad de Atitalaquia. Las rutas se muestran con color azul, los puntos amarillos son las primarias y el punto rojo es el sitio fijo donde se colocaban los equipos. Elaboración propia con datos de: Google Maps (2023).	47
Figura 7. Diagrama del funcionamiento del detector X-123SDD	52
Figura 8. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X perteneciente al Laboratorio de Aerosoles del Instituto de Física de la UNAM, utilizado en el presente estudio para la caracterización química del PM _{2.5} recolectado durante la determinación de la exposición personal.	53
Figura 9. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración de PM _{2.5} en µg m ⁻³ medidas en la zona industrial y zona urbana en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco.	57
Figura 10. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración de PM _{2.5} en µg m ⁻³ medidas en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco	58
Figura 11. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración de PM _{2.5} en µg m ⁻³ medidas en las dos campañas realizadas (Temporada 1: seca-caliente, Temporada 2: seca-fría).	59
Figura 12. Ejemplo del espectro generado a partir de la técnica XRF del día 6 de diciembre del 2023 en la ciudad de Apaxco, en la zona Industrial.....	60
Figura 13. Factores de corrección para cada instrumento pDR-1500 y su análisis de correlación de concentraciones de PM _{2.5} . Tomada de: Reduced commuter exposure to PM _{2.5} and PAHs in response to improved emission standards in bus rapid transit systems in Mexico (Hernández-Paniagua et al., 2023).....	63
Figura 14. Porcentaje de masa del total de PM _{2.5} recolectado para cada especie identificada en el análisis de composición química utilizando la técnica de XRF, en una zona urbana y una zona industrial en la ciudad de Apaxco	64
Figura 15. Porcentaje de masa del total de PM _{2.5} recolectado para cada especie identificada en el análisis de composición química utilizando la técnica de XRF, en una zona urbana y una zona industrial en la ciudad de Atitalaquia.	65

Figura 16. Porcentaje de masa del total de PM_{2.5} recolectado para cada especie identificada en el análisis de composición química utilizando la técnica de XRF, en una zona urbana y una zona industrial en la ciudad de Atotonilco. 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de partículas PM ₁₀ y PM _{2.5} en la NOM	25
Tabla 2. Especies fundamentales de la composición de partículas ultrafinas, finas y gruesas.....	27
Tabla 3. Principales fuentes de emisión de la fracción de partículas	31
Tabla 4. Resumen de filtros utilizados típicamente en análisis ambientales para la recolección de PM _{2.5} . El material de los filtros se selecciona acorde con el tipo de análisis de composición a realizar.....	34
Tabla 5. Especiación química de muestras PM _{2.5}	39
Tabla 6. Calendario de campañas de muestro realizadas	49
Tabla 7. Tiempo de muestreo durante cada día de las campañas realizadas.....	56
Tabla 8. Concentraciones de PM _{2.5} medidas en cada ciudad durante la temporada seca-caliente y seca-fría.	60
Tabla 9. Concentraciones de las especies químicas en µg m ⁻³ encontradas en el análisis de composición utilizando XRF en las diferentes rutas dentro de las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco.	61
Tabla 10. Concentraciones de las especies químicas en µg m ⁻³ encontradas en el análisis de composición en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco.....	62
Tabla B1. Promedios geométricos y su desviación estándar en µg m ⁻³ de las rutas estudiadas en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, obtenidos en RStudio....	88
Tabla B2. Promedios geométricos y su desviación estándar en µg m ⁻³ en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, obtenidos en RStudio.	89
Tabla B3. Promedios geométricos y su desviación estándar en µg m ⁻³ de las campañas realizadas en la RESA, obtenidos en RStudio.	89
Tabla B4. Promedios geométricos y su desviación estándar en µg m ⁻³ de las campañas realizadas en la RESA en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, obtenidos en RStudio.	90
Tabla C1. Masa total corregida en µg de los días de muestreo realizados en la RESA....	91
Tabla C2. Masa de cada especie medida en el análisis de XRF en µg de la primera campaña.	92
Tabla C3. Masa de cada especie medida en el análisis de XRF en µg de la segunda campaña.	92

RESUMEN

En este trabajo se analiza la exposición personal, es decir, la exposición medida de contaminantes que afecta a los individuos durante un periodo definido, en este caso de las partículas $PM_{2.5}$ realizada en las ciudades de Apaxco (Estado de México) y, Atotonilco y Atitalaquia (Hidalgo) y la caracterización química de estas. Se llevaron a cabo campañas de muestreo en la temporada seca-caliente de mayo junio y otra en la temporada seca-fría de noviembre diciembre del año 2023. En las tres ciudades, se seleccionaron dos rutas de muestreo, una representativa de zona urbana y otra correspondiente a una zona industrial, con el objetivo de comparar la composición del $PM_{2.5}$ a que están expuestos los habitantes de la región de estudio en diferentes ambientes. Las muestras de $PM_{2.5}$ se recolectaron durante muestreos de exposición en tiempo real.

Las concentraciones más elevadas de $PM_{2.5}$ se determinaron en Apaxco con un promedio de $11.7 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$, las cuales están influenciadas por una intensa actividad industrial en la zona. Dependiendo de las condiciones orográficas, el tránsito vehicular e industrias alrededor de las zonas, los promedios de concentración de exposición a $PM_{2.5}$ pueden ser hasta 1.3 veces mayor en zonas industriales (Apaxco, $24.9 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$; Atitalaquia, $25.5 \pm 2.6 \mu\text{g m}^{-3}$, Atotonilco, $20.1 \pm 2.0 \mu\text{g m}^{-3}$) con abundante tráfico vehicular a diésel, presencia de industrias y caminos con alta resuspensión de partículas en comparación con las zonas urbanas (Apaxco, $22.1 \pm 2.4 \mu\text{g m}^{-3}$; Atitalaquia, $17.7 \pm 2.7 \mu\text{g m}^{-3}$ Atotonilco, $11.8 \pm 2.6 \mu\text{g m}^{-3}$). En la temporada seca-caliente, se determinó un promedio de $20.6 \pm 2.5 \mu\text{g m}^{-3}$, el cual es menor a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 de 24 horas ($41 \mu\text{g m}^{-3}$). Cuando se consideró el tiempo de permanencia de las personas en sus casas durante la temporada seca-fría, el tiempo de muestreo fue de 22 horas por lo que el promedio de las concentraciones de exposición disminuyó a $7.5 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$. Este valor es tres veces inferior a lo que establece la norma para 24 horas. Es de resaltar que a la fecha no existe un valor de concentración para exposición personal, por lo cual, las comparaciones con la normatividad vigente proporcionan una idea de la exposición de los habitantes en el área.

El Ca fue el elemento más abundante determinado en las $PM_{2.5}$ muestreadas que se recolectaron en las ciudades de estudio. Esto es debido a la presencia de numerosas industrias que se encuentran alrededor de ella, entre las que destacan las cementeras, la termoeléctrica, la refinería, trituradoras y la resuspensión de polvos.

ABSTRACT

This study presents results from the assessment of personal exposure to $PM_{2.5}$ in the municipalities of Apaxco, Atotonilco, and Atitalaquia. Samples of $PM_{2.5}$ were collected to monitor personal exposure and analyse their chemical composition, during the dry-hot season (May-June) and the dry-cold season (November-December) both of 2023. Two sampling routes were selected in each city to compare residents' personal exposure to $PM_{2.5}$. These routes represent urban and industrial environments in the area. Real-time monitoring instruments (pDR-1500) were utilised to collect samples of $PM_{2.5}$ and determine personal exposure concentrations.

Results revealed that the highest average $PM_{2.5}$ concentrations ($11.7 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$) was measured in Apaxco, likely due to substantial industrial emissions in the area. $PM_{2.5}$ exposure concentrations in industrial zones were around 1.3-fold of those measured in residential environments in the three municipalities. This difference suggests a relative impact of industrial activities, diesel vehicle traffic and road dust resuspension on $PM_{2.5}$ exposure levels along the studied routes and different environments.

The exposure to $PM_{2.5}$ exhibited several variations in the three studied cities, with the dry-hot season exhibiting an average exposure concentration of $20.6 \pm 2.5 \mu\text{g m}^{-3}$. This was significantly higher than the $7.5 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$ measured during the dry-cold season. The chemical analysis of the collected samples exhibited that calcium was the most abundant component in the region, likely because the emissions in the area are dominated by industrial sources, mostly including cement plants, crushers, and resuspended dust.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica que enfrentan los habitantes del Sur del Valle del Mezquital es uno de los problemas más serios, llegando a ser considerada como una zona de sacrificio ambiental por todos los impactos negativos socioambientales que causan las actividades industriales dentro de ella. El corredor Apaxco-Tula-Atotonilco es una de las zonas industriales más grandes del país, aquí se encuentran 5 de las cementeras más importantes del país como Holcim, Cemex, Lafarge, Cruz Azul y Apasco, además de industrias como Caleras Bertrán, en donde queman toneladas de llantas y otros residuos peligrosos (Vargas y Vilella, 2013; Camacho-López et al., 2019). También en esta zona se localiza la planta termoeléctrica y la refinería en la región de Tula, las cuales son las dos fuentes fijas de emisiones de mayor impacto.

En el Informe Nacional de Calidad del Aire publicado por el INECC en 2019, se menciona que las ciudades de Atitalaquia y Atotonilco con frecuencia se han registrado concentraciones que superan los límites de partículas finas ($PM_{2.5}$, $10 \mu\text{gm}^{-3}$ según la NOM-025-2021) durante todo el año. Debido a esto, es importante cuantificar la exposición a estos contaminantes a la que se encuentran sometidos los habitantes al realizar sus actividades cotidianas, además de conocer la composición de estas partículas, con el fin de asociarlas con sus posibles fuentes.

En este trabajo se cuantifica y analiza la exposición personal a partículas $PM_{2.5}$ de forma integral considerando una escala diaria, y se presenta la caracterización química de estas partículas en las ciudades de Apaxco en el Estado de México y, Atotonilco y Atitalaquia en Hidalgo. Se reportan y discuten las variaciones geográficas de concentraciones y composición según el sitio de estudio. Hasta la fecha, los estudios realizados para caracterizar la distribución del material particulado se han llevado a cabo, principalmente, mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), las cuales requieren un proceso riguroso de validación. Este proyecto, proporciona datos experimentales que pueden ser utilizados para validar y mejorar la precisión de estos modelos.

La tesis se encuentra organizada de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta una investigación bibliográfica sobre el tema que se abordará durante todo el trabajo. La Sección 3 describe el área de estudio en los que se realizó la investigación. La descripción de los muestreos realizados se presenta en la Sección 4, así como los instrumentos utilizados durante las campañas de muestreo. Los resultados obtenidos de concentración de

exposición a $PM_{2.5}$ se presentan en la Sección 5, además de la caracterización química de las partículas recolectadas. Por último, en la Sección 6 se exponen las conclusiones que se encontraron en el presente estudio, agregando algunas recomendaciones a la población para disminuir el impacto de los contaminantes estudiados.

Capítulo 2

JUSTIFICACIÓN

2. JUSTIFICACIÓN

Se requiere generar información sobre los niveles de exposición a $PM_{2.5}$ con los posibles efectos negativos a la salud a los que se encuentran sometidos los pobladores de los municipios de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia. Las ciudades mencionadas se localizan en la Región de Emergencia Sanitaria Ambiental (RESA) del Valle del Mezquital Sur. En toda la zona se registra un alto impacto industrial debido a la refinería, la termoeléctrica, cementeras, una calera e industrias de manufactura de alimentos, plásticos y productos para el cuidado de cultivos, en una región relativamente reducida en términos espaciales, lo que conlleva a la concentración de emisiones y contaminantes (INECC, 2023). Las emisiones típicas de industrias como las presentes en la zona de estudio sugieren que estas pueden ser fuentes de emisiones significativas de $PM_{2.5}$, lo que resalta la necesidad de contar con información sobre los niveles de exposición a estas debido al impacto negativo a la salud de la población que dichas partículas pueden causar. Cuantificar las concentraciones de exposición a $PM_{2.5}$ determinadas en cada una de las ciudades de estudio, permite identificar los horarios de mayor exposición a los contaminantes y así poder realizar recomendaciones a la población para disminuir su exposición a estos mismos. De igual manera, el conocer la composición química de las partículas, permitirá asociar las especies químicas encontradas con posibles fuentes y, así, conocer el impacto que estas tendrán en la salud. Además, datos experimentales del proyecto pueden validar los resultados de los modelos CFD utilizados para caracterizar la distribución del material particulado, mejorando así la exactitud de las simulaciones.

Capítulo 3

HIPÓTESIS

3. HIPÓTESIS

La variabilidad de la composición química de las partículas finas (PM_{2.5}) recolectadas durante los muestreos realizados en las ciudades de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia se correlaciona con las actividades antropológicas específicas de cada ciudad, por lo que conocer sus principales componentes puede permitir identificar las principales fuentes de emisión y su impacto en la salud de los habitantes de la zona.

Capítulo 4

OBJETIVOS

4. OBJETIVOS

General

Estudiar la exposición personal a partículas finas ($PM_{2.5}$) durante la realización de actividades cotidianas y realizar la caracterización química de los elementos que las componen, en las ciudades de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia, pertenecientes a la Región de Emergencia Sanitaria Ambiental del Valle del Mezquital Sur.

Específicos

- Determinar la exposición personal a $PM_{2.5}$ a la que está expuesta la población de la RESA.
- Comparar la variación de los niveles de exposición a $PM_{2.5}$ determinados durante las temporadas seca-caliente y seca-fría.
- Caracterizar la composición química de las $PM_{2.5}$ a las que están expuestos los habitantes de la RESA a partir del análisis de fluorescencia de rayos X (XRF).
- Identificar las posibles fuentes de $PM_{2.5}$ que se encuentran dentro de la región a estudiar.
- Analizar la variabilidad espacial de la concentración de las especies que componen las $PM_{2.5}$ en las ciudades de estudio y sus implicaciones a la salud de la población.

Capítulo 5

MARCO TEÓRICO

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Partículas suspendidas

5.1.1. Definición de PM_{2.5} y su importancia para la salud

El material particulado es una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en estado sólido o líquido en forma de partículas suspendidas en el aire. Estas partículas suspendidas pueden permanecer en el aire durante periodos de tiempo variables y poseen características físicas y químicas que varían según su origen, las fuentes que las generan, los precursores y su entorno, ya sea urbano o rural. Los componentes fundamentales de las partículas suspendidas pueden ser: sulfatos, nitratos, amonio, carbono orgánico y carbono elemental, algunos elementos traza, sales, bioaerosoles y metales pesados. Según su origen, las partículas se clasifican por un lado en naturales y antropogénicas, y por el otro en primarias y secundarias. Las primarias son aquellas que son emitidas directamente por alguna fuente contaminante, y las secundarias son las que su formación es en la atmósfera, como resultado de reacciones químicas entre gases y partículas primarias (NOM-025, 2021).

Un aspecto clave para analizar las partículas suspendidas en la atmósfera es conocer su diámetro aerodinámico, debido a que ayuda a determinar su capacidad para penetrar y permanecer en diferentes áreas de las vías respiratorias. Las partículas con un diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM₁₀) penetran y se establecen a lo largo del tracto respiratorio. Por otro lado, las partículas con un diámetro menor o igual que 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) y las menores o iguales que 0.1 micrómetros (PM_{0.1}), provocan daños locales en los tejidos de los alvéolos y también a nivel sistémico, por lesiones en el tejido pulmonar y por la posibilidad que entren al torrente sanguíneo (NOM-025, 2021).

Debido a lo mencionado anteriormente, la medición de partículas suspendidas como indicador de la calidad del aire, se ha enfocado principalmente a PM₁₀ y PM_{2.5}, debido al impacto que traerán consigo a la salud de las personas (NOM-025, 2021). Aunque las partículas PM_{2.5} son de tamaño relativamente pequeño, se considera que pueden poseer alta toxicidad. Por un lado, es más probable que se depositen en el tracto respiratorio que otros contaminantes de la misma masa e incluso pueden transferirse directamente al cerebro porque pueden mantenerse en el aire suspendidas por un periodo de tiempo más largo. Por otro lado, las PM_{2.5} pueden enriquecer el aire con sustancias nocivas y adsorber

más productos químicos tóxicos debido a su mayor proporción de superficie con respecto a la masa (Li et al., 2023).

En la Región Centro de México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en 2017 publicó los resultados sobre los efectos en la salud relacionados a la disminución de la exposición a largo plazo de $PM_{2.5}$, así como la valoración económica de estas durante el 2014:

- Se estimó que 8,464 y 9,767 de las muertes por causas generales podrían ser evitables si se cumplieran los estándares incluidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-025, 2014) y en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO, 2006), respectivamente.
- De las enfermedades específicas estudiadas, los resultados arrojaron que las afecciones cardiopulmonares constituyen hasta el 53 % de las causas generales, las enfermedades cardiovasculares hasta 49 %, mientras que enfermedades más graves como cáncer de pulmón el 3 % y enfermedades isquémicas cardíacas el 39 %, bajo la NOM y OMS. Se calcula que en un escenario intermedio ($11 \mu g m^{-3}$) podrían prevenirse hasta 9,115 muertes prematuras relacionadas a causas generales.

Bajo un escenario conservador, el INECC estima que los beneficios económicos derivados de la reducción de las $PM_{2.5}$ estarían entre los 14 y 16 mil millones de pesos anualmente para el año 2014.

5.1.2. Normatividad

La exposición a contaminantes del aire como el material particulado fino, se relaciona a diferentes impactos negativos a la salud de la población. Su afectación dependerá en gran medida de la concentración de dichos contaminantes en el aire, de la cantidad inhalada, la duración y frecuencia de exposición, al igual que de las características de la población afectada como su edad, actividad física, condiciones de salud preexistentes, etc. Para prevenir los posibles riesgos a la salud, los artículos 116 y 118 de la Ley General de Salud Mexicana, establecen que las autoridades deberán crear regulaciones, implementar medidas y realizar acciones para proteger a la población (NOM-025, 2014). Por dicha razón,

se han establecido los límites máximos permisibles de contaminantes en la NOM-025, los cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} en la NOM-025-SSA1-2021.

Contaminante	Dato base utilizado para la evaluación	Exposición	Frecuencia Tolerada	Valor límite Indicador con el que se evalúa	Criterio de suficiencia anual	Norma Oficial Mexicana
Partículas menores de 10 micrómetros (PM ₁₀)	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	75 µg/m ³ máximo	Por lo menos tres trimestres con al menos 75 % de los promedios de 24 horas válidas	NOM-025-SSA1-2021 (DOF, 2021)
		Crónica	-	40 µg/m ³ promedio anual		
Partículas menores de 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	45 µg/m ³ máximo		
		Crónica	-	12 µg/m ³ promedio anual		

Adaptada de: Normas Oficiales Mexicanas-Salud Ambiental (INECC, 2024).

5.2. Características de PM_{2.5}

5.2.1. Tamaño y composición de partículas PM_{2.5}

La composición química de las PM_{2.5} varía dependiendo de su origen, así como del proceso de formación y de las fracciones orgánica e inorgánica. La fracción orgánica incluye una gran cantidad de compuestos como el carbono elemental, el carbono orgánico (que incluye compuestos tanto primarios como secundarios derivados de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles, como etano, benceno, tolueno, o-xileno, etc., y material biológico como bacterias, esporas, alérgenos y polen. Por otro lado, la fracción inorgánica está compuesta de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y elementos metálicos como plomo, cobre, zinc, níquel, hierro, etc. (Badillo, 2012; Mancilla et al., 2014; Manzanares et al., 2011; Blanco-Jiménez et al., 2015).

La quema de combustibles produce no solo partículas de carbón sino también materia inorgánica que proviene de los minerales presentes en estos. Igualmente, en muchos de los procesos industriales, como en las plantas de cemento, las emisiones liberan compuestos inorgánicos que normalmente presentan una composición parecida a las materias primas o a los productos producidos dentro de ellas (INE-SEMARNAT, 2011). Las

partículas que son emitidas por vehículos que utilizan gasolina, tienen una combinación entre carbono orgánico, carbono elemental y pequeñas concentraciones de metales y sulfatos. De esas partículas, el carbón orgánico representa entre 26 % y 88 % de la masa total. También se han identificado en estas partículas, compuestos orgánicos de elevado peso molecular e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (INE-SEMARNAT, 2011). Es por ello que, según el tipo de partículas y su origen de emisión, se logran identificar compuestos abundantes y compuestos minoritarios.

5.2.2. Identificación de componentes específicos (metales, elementos, etc.)

Alrededor del mundo, existen diversos estudios que han caracterizado las $PM_{2.5}$ a partir de su morfología y composición química, ya que esto permite estimar el efecto que estas partículas finas tienen en la salud de la población y también cuantifican la contribución de las fuentes de emisión a la contaminación (Argumedo et al., 2016; Tabla 2). Por ejemplo, Yue et al. (2006) llevaron a cabo recolección de muestras de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Shanghai, China, utilizando la técnica de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (X-EDS) para llevar a cabo una caracterización de hasta 500 partículas. Ellos clasificaron las partículas en cuatro grupos en función de su estructura física y composición elemental, en donde se incluyen hollín, cenizas de carbón, material mineral y otros tipos (principalmente elementos ligeros como C, N, O, también podían contener polen y esporas). Por otro lado, Shi et al. (2015) presentó un análisis también de la estructura física y las propiedades mecánicas de las partículas utilizando microscopía de fuerza atómica (AFM). Ellos encontraron que el $PM_{2.5}$ mostraba formas irregulares, circulares, con elevadas concentraciones de O, Si, C, Fe, Ca, Mg, Al, K y S.

En otro estudio, Maria et al. (2022) capturaron partículas utilizando filtros de membrana de teflón en la isla de Saint Croix, que analizaron mediante espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). Los resultados que reportaron muestran contenido de iones sulfato, amonio, silicatos y carbonilos e hidrocarburos alifáticos. Por otro lado, Shaka y Saliba (2004) establecieron la concentración y composición del $PM_{10-2.5}$ (fracción gruesa) y $PM_{2.5}$ en Líbano empleando la técnica de ATR-FTIR. En dicho estudio se logró identificar compuestos como SO_4^{2-} , NO_3^- , SiO_4^{2-} , CO_3^{2-} y NH_4^+ , en donde se notaron diferencias dependiendo del tamaño de partícula estudiada: las concentraciones eran mayores en las $PM_{2.5}$ que en la $PM_{10-2.5}$ (Polo et al., 2019).

En México, Barrera et al. (2023) caracterizaron las partículas suspendidas en la ciudad de San Luis Potosí durante los años 2017-2018 a partir del análisis de Fluorescencia de Rayos X y análisis de Carbono Total reconstruyendo así la masa gravimétrica. También utilizaron un modelo de Factorización de Matriz Positiva (PMF) para identificar las fuentes de donde provenían dichas partículas. Sus resultados muestran la presencia de 18 elementos, entre los cuales las mayores concentraciones fueron S, V, Ni y Carbono Total (1.65, 0.149, 0.569 y 12.59 $\mu\text{g m}^{-3}$), provenientes de combustibles fósiles. Además, dicho estudio evidenció la emisión de contaminantes tóxicos como Cu, Fe, Zn, Mn, V y Pb (contenidos de 0.242, 1.02, 0.378, 0.550 y 2.35 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente).

Martínez-Morales et al. (2023) realizaron un estudio en la ciudad de Monterrey durante la pandemia de COVID-19 para conocer la composición de partículas suspendidas durante el periodo de confinamiento. La morfología de las partículas, así como su composición elemental fueron evaluados a partir de la espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS), siendo Ca, K, Fe, Mg y Cu (2.7044, 1.7608, 0.2045, 0.1320 y 0.0211 $\mu\text{g m}^{-3}$) los metales traza más abundantes en el $\text{PM}_{2.5}$ muestreado. Los estudios descritos muestran que se pueden utilizar distintas técnicas analíticas para caracterizar los componentes de las partículas finas, lo cual es relevante para el posterior análisis de los impactos que pueden tener en la salud de la población.

Tabla 2. Especies fundamentales de la composición de partículas ultrafinas, finas y gruesas

	Tipo de Partículas		
	Ultrafinas ($\text{PM}_{0.1}$)	Finas ($\leq \text{PM}_{2.5}$)	Gruesas ($\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10})
Composición	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato • Carbón elemental • Compuestos metálicos • Compuestos orgánicos con baja saturación de presión de vapor a temperatura ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato, nitrato, amonio, iones de hidrógeno • Carbón elemental • Gran variedad de compuestos orgánicos • Metales: compuestos de Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc. • Agua ligada a las partículas • Bacterias, virus 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitratos, cloruros, sulfatos de reacciones de HNO_3, HCl y SO_2 con partículas gruesas • Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe) • CaCO_3, CaSO_4, NaCl, sal marina • Bacterias, polen, moho, esporas de hongos, detritos de plantas y animales

Tomada de: Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ (INE-SEMARNAT, 2011).

5.3. Fuentes de PM_{2.5}

Existen diferentes maneras de clasificar las fuentes de donde provienen las partículas PM_{2.5}; una de las principales es si son originarias de fuentes naturales o antropogénicas. Las primeras abarcan las que son generadas por procesos naturales en donde no participa el hombre, mientras que las segundas son derivadas de las actividades que este realiza (INE-SEMARNAT, 2011).

5.3.1. Emisiones vehiculares

El sector transporte también conocido como fuentes móviles es el mayor generador de PM_{2.5}, CO, NO_x y CO₂, etc. siendo relacionados con el proceso de combustión. En particular, los vehículos que funcionan con diésel como autobuses y camiones de carga son los principales emisores de PM_{2.5}. Por ejemplo, en la Ciudad de México, estos vehículos aportan hasta el 25 % de las emisiones totales de PM_{2.5}. En México, dentro del Informe Nacional de Emisiones de 2016, se tiene cuantificado que el estado de Hidalgo contribuye hasta con el 3.2 % en el total de emisiones de PM_{2.5} totales en el país.

5.3.2. Emisiones industriales

En el año 2018, se tiene registrado en el inventario de emisiones del Estado de Hidalgo que el dióxido de azufre es el contaminante más emitido por las industrias, con el 99.3 % del total registrado, mientras que las industrias son responsables del 28 % del total de emisiones de PM_{2.5}. De manera más específica, los sectores industriales que más contribuyen a las PM_{2.5} son los encargados de la generación de energía eléctrica, la industria petroquímica y petrolera, las plantas cementeras, etc. Además, en algunas poblaciones la fabricación de ladrillos puede ser una fuente importante de contaminación (Fig. 1 y Fig. 2) (SEMARNAT, 2016).

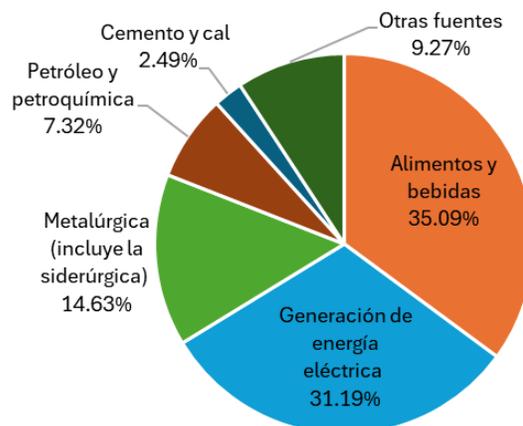


Figura 1. Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por fuentes fijas en México. Elaboración propia con datos de: Inventario Nacional de Emisiones (SEMARNAT, 2016)

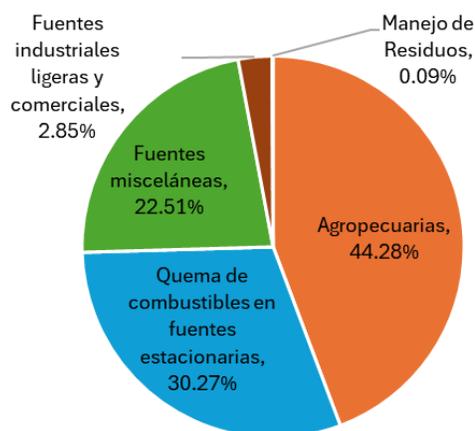


Figura 2. Contribución de emisiones de $PM_{2.5}$ por categoría de fuentes de área en México. Elaboración propia con datos de: Inventario Nacional de Emisiones (SEMARNAT, 2016).

5.3.3. Vínculo entre fuentes específicas y la composición de $PM_{2.5}$

Conocer el tamaño de las partículas ayuda a establecer su capacidad para ingresar al sistema respiratorio, sin embargo, es la composición química la que puede resaltar los efectos asociados a la mortalidad y la morbilidad. Las $PM_{2.5}$ pueden ser tóxicas, cancerígenas, mutagénicas y teratogénicas debido a los componentes de su mezcla (Franklin et al. 2008; Atkinson et al. 2014; Apte et al. 2015; Wang et al. 2019; Morantes et al., 2021). Además, la composición de material particulado se utiliza para la designación de fuentes. Por ello, conocer la composición de las partículas es fundamental (Morantes et al.,

2021). En la detección de fuentes de emisión, se utilizan algunos trazadores elementales (Chavent et al. 2009, Morantes et al., 2021), elementos provenientes de fuentes móviles como C/Fe/Ba/Zn/Cu, los provenientes del suelo o de la superficie terrestre como el Al/Si/Ca/Fe, los que se originan en el océano Na/Cl/Mg y por último el V/Ni que son relacionados a la combustión, aerosoles secundarios y a las emisiones de empresas (Viana et al. 2008, Álvarez-Tolentino & Suárez-Salas, 2020). También, los elementos S/K/Cl/Ca/Br/Zn se consideran trazadores de la incineración de biomasa (Echalar et al. 1998, Gilardoni et al. 2011, Álvarez-Tolentino y Suárez-Salas, 2020), siendo de mayor relevancia para las regiones donde existen pastizales y una alta ocurrencia de incendios forestales (Reddington et al., 2019). La Tabla 3 muestra un resumen de las principales fuentes contaminantes de elementos observados en partículas según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

Martínez-Cinco et al. (2016) en la zona metropolitana de Monterrey (MMA) realizaron un estudio de distribución de fuentes de $PM_{2.5}$, recolectando muestras en los años 2007 y 2008. Los principales elementos encontrados fueron el S, Ca, Si, Fe, Al y K. A partir del análisis químico de las muestras, ellos asociaron el Ca, Fe y K al polvo mineral. El S se determinó como proveniente a la refinería de petróleo al este de la MMA y a los combustibles.

También en la Ciudad de México, se recolectaron muestras de partículas en 2003 para determinar la composición elemental mediante PIXE (Emisión de Rayos X Inducida por Partículas). Se detectaron diez elementos (S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb). Utilizando el análisis de componentes principales (PCA) se identificaron que los elementos traza como K y Ca son relacionados a las emisiones de gases del transporte, mientras que el Fe, Mn, Zn, y Ti lo asociaron al polvo de carreteras. El S, SO_2 y PM, por otro lado, corresponden a la combustión de diésel (Aldape et al., 2011).

Tabla 3. Principales fuentes de emisión de la fracción de partículas

Especies	<PM _{2.5}		>PM _{2.5}	
	Naturales	Antrópicas	Naturales	Antrópicas
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Aerosoles marinos	Quema de combustibles fósiles	Aerosoles marinos	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	-	Tubos de escape de vehículos	-	-
Minerales	Erosión y re-suspensión	Polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, agricultura, construcción, demolición	Erosión y re-suspensión	Polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, agricultura, construcción, demolición
Amonio (NH ₄ ⁺)	-	Tubos de escape de vehículos	-	-
Carbón orgánico	Incendios naturales	Quema de madera, tubos de escape de vehículos, cocinas, desgaste de llantas y procesos industriales	Materia húmica del suelo	Desgaste de llantas y pavimento, polvo de caminos pavimentados y no pavimentados
Carbón elemental	Incendios naturales	Quema de madera, tubos de escape de vehículos (principalmente diésel), cocinar	-	Desgaste de llantas y pavimento, polvo de caminos pavimentados y no pavimentados
Metales	Actividades volcánicas	Combustión de combustibles fósiles, procesos metalúrgicos, desgaste de frenos de vehículos	Emisión y re-suspensión	-
Aerosoles biológicos	Bacterias y virus	-	Fragmentos de plantas e insectos, polen, esporas y bacterias	-

Tomada de: Integrated Science Assessment for Particulate Matter (USEPA, 2009)

5.4. Exposición a PM_{2.5}

5.4.1. Exposición personal a PM_{2.5}

La exposición personal se define como el momento en que una persona entra en contacto con un contaminante del aire, lo cual puede medirse a través del monitoreo de dicho contaminante en la zona de respiración de un individuo (Steinle et al., 2011; Castillo-Camacho et al., 2020). Con el avance de los sensores de bajo costo, ahora es posible recopilar datos con una resolución espacio temporal (describe en tiempo y espacio la medición) que antes resultaba inalcanzable, lo que facilita el estudio de exposiciones en diferentes microambientes (McCarron et al., 2023). Específicamente, la exposición a PM_{2.5} se ha asociado con un aumento de los síntomas respiratorios en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y una disminución de la función pulmonar (Cortez-Lugo et al., 2015), además de muchas otras enfermedades relacionadas.

En este contexto, Butler y Madhavan (2017) subrayan la importancia de investigar cómo las fuentes de contaminación ambiental, tanto interiores como exteriores, influyen en la exposición en espacios cerrados. Asimismo, es crucial identificar cuáles aspectos de esta exposición son controlables por las personas, con el fin de encontrar un equilibrio que permita reducir la exposición y así habilitar a las personas para que adopten medidas efectivas en pro de su salud.

Tovalín-Ahumada et al. en 2007, en la Ciudad de México y Puebla estudiaron la concentración a la que se encontraban expuestos 36 trabajadores (actividades al aire libre como taxistas, vendedores ambulantes, conductores de transporte y actividades en oficinas). La mayoría de las exposiciones determinadas fueron superiores a la NOM-025 (1993) con promedios de hasta $133 \mu\text{g m}^{-3}$ para 24 horas, siendo los vendedores ambulantes los más expuestos en la Ciudad de México ($206.8 \mu\text{g m}^{-3}$). Estos resultados representan un posible aumento de riesgo de desarrollar morbilidad y mortalidad asociadas a PM.

Medir la exposición personal a PM_{2.5} permite a conocer de manera más precisa el impacto a la salud en los individuos a partir de sus actividades cotidianas y los microambientes en los que se encuentra durante su día.

5.4.2. Exposición personal en zonas industriales

Las emisiones industriales son fuentes importantes de $PM_{2.5}$, especialmente en países en desarrollo (Taiwo et al., 2014). En China una fábrica de cemento representa aproximadamente el 14 % de las emisiones de $PM_{2.5}$. Todo el proceso de producción, desde la molienda hasta el empaquetado, contribuye considerablemente a la acumulación de partículas suspendidas totales (PST) tanto dentro como fuera de la industria. Además, muchas de estas fábricas siguen utilizando carbón como combustible, lo que incrementa las emisiones. Las partículas emitidas contienen contaminantes nocivos, como metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, sílice y gases tóxicos, que tienden a acumularse en las zonas cercanas a la fábrica de cemento (Utami-Rauf et al., 2021).

Masri et al. (2022) subrayan la importancia de desarrollar medidas básicas de control de la calidad del aire en las instalaciones industriales. Esto incluye la instalación de sistemas de ventilación adecuados para desviar los contaminantes del aire lejos de las zonas donde se encuentran los trabajadores. Estos sistemas deben incorporar filtros de aire de alta eficacia para partículas (HEPA) para eliminar las que se encuentran en un ambiente interno y evitar que se liberen al exterior, afectando así a la comunidad local. Un estudio realizado en la Subestación Jasso cerca de la zona industrial de Tula (Querol et al., 2007), determinó una concentración de $31 \mu g m^{-3}$ de $PM_{2.5}$, probablemente debido a la intensa resuspensión de polvo y la influencia de una planta cementera y una cantera de piedra caliza dentro de la zona.

La medición de la exposición personal en zonas industriales es crucial para salvaguardar la salud de los empleados. Identificar las áreas y actividades con altos niveles de contaminación facilita la implementación de medidas de control y con ello, poder abordar adecuadamente a la mitigación de contaminantes al ambiente.

5.5. Métodos de caracterización de componentes en $PM_{2.5}$

5.5.1. Filtros de recolección

Para caracterizar los elementos presentes en el $PM_{2.5}$, es necesario llevar a cabo su recolección en filtros de diversos materiales dependiente del objetivo y tipo de compuestos objetivos que se quieren caracterizar. El filtro de fibra de cuarzo y el filtro de teflón son los más comunes para recolectar $PM_{2.5}$. El filtro de fibra de cuarzo tiene una excelente resistencia a altas temperaturas por lo que es adecuado para el análisis de elementos de

carbono, carbono orgánico y compuestos orgánicos. Además de que estos filtros son inertes y libres de contaminantes, por lo que no interfirieren en el análisis de compuestos orgánicos e iones solubles en agua. Para reducir la formación de compuestos orgánicos, debe calentarse durante unas horas a una temperatura superior a 300 °C antes de usarlo. Teniendo en cuenta que algunos elementos inorgánicos (por ejemplo, Al, Si y Fe) forman parte de la composición del filtro de fibra de cuarzo, no es adecuado utilizar este para el análisis de elementos inorgánicos (Pan et al., 2022). Por otro lado, el filtro de teflón se utiliza generalmente para la determinación de elementos inorgánicos e iones solubles en agua (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , etc.) (Pan et al., 2022). En la Tabla 4, se presenta un resumen de algunos de los filtros más utilizados para cada tipo de análisis de interés.

Tabla 4. Resumen de filtros utilizados típicamente en análisis ambientales para la recolección de $\text{PM}_{2.5}$. El material de los filtros se selecciona acorde con el tipo de análisis de composición a realizar

Material del filtro	Método de análisis aplicables	Ventajas	Desventajas
Fibra de vidrio	IC ICP-AES XRF PIXE INAA	<ul style="list-style-type: none"> •Alta eficiencia de recolección de partículas •Gama amplia de análisis posibles 	<ul style="list-style-type: none"> •Niveles altos de sodio, calcio y silicio en el filtro blanco •Absorción de HNO_3, NO_2 y SO_2
Cuarzo	IC ICP-AES ICP-MS XRF PIXE Carbono orgánico y elemental	<ul style="list-style-type: none"> •Alta eficiencia de recolección de partículas •Gama amplia de análisis posibles 	<ul style="list-style-type: none"> •Niveles altos de silicio, aluminio y sodio en el filtro blanco •Absorción de vapores orgánicos
Teflón	XRF PIXE ICP-AES ICP-MS INAA	<ul style="list-style-type: none"> •Bajos niveles de metales en el filtro blanco •Inerte 	<ul style="list-style-type: none"> •No permite análisis de carbono ni de iones •Baja eficiencia de retención de partículas
Polycarbonato	XRF PIXE	<ul style="list-style-type: none"> •Bajos niveles de metales en el filtro blanco 	<ul style="list-style-type: none"> •No permite análisis de carbono ni de iones •Baja eficiencia de retención de partículas

Tomada de: Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (2010).

5.6. Técnicas de análisis de elementos químicos en PM_{2.5}

5.6.1. Fluorescencia de rayos X

La técnica de fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés) es utilizada para determinar elementos inorgánicos en muestras sólidas que mide la fluorescencia que emite un elemento químico sometido a radiación continua de rayos X. Se conoce, por tanto, como XRF a la espectrometría de rayos X en la cual rayos X primarios se usan para inducir radiación secundaria característica del material a analizar. Considerando que los fotones de rayos X se caracterizan por dos parámetros: longitud de onda y energía, la espectrometría de rayos X utiliza bien sea el poder de difracción de un cristal para separar bandas de longitud de onda muy próximas o bien un detector para separar bandas de energías muy próximas del haz policromático de radiación característica excitada de la muestra. El primer método se denomina espectrometría de XRF de longitud de onda dispersiva y el segundo, espectrometría de XRF de energía dispersiva.

- **Espectroscopía de dispersión de longitud de onda (WDXRF):** A partir de un cristal a un cierto ángulo se reflejan los rayos X y es posible detectar longitudes de onda específicas de cada elemento (Verma H.R., 2007). Este principio sigue la ecuación de Bragg, por lo que es posible analizar espectros complejos. Estos equipos poseen detectores con una mayor resolución espectral. Sin embargo su capacidad para recibir señales por segundo es menor en comparación con los detectores SDD. Por esto, estos sistemas se encuentran en laboratorios de análisis de metales dedicados para experimentos fuera del sitio (Seidel et al., 2021). Además, las muestras deben ser planas y estables, y su análisis está limitado a métodos de masa, lo que restringe la resolución espacial a más de 0.5 μm (Verma, H.R., 2007).
- **Espectroscopía de dispersión de energía (EDXRF):** Según su energía son capaces de separar y detectar rayos X (Verma H.R., 2007). Estos sistemas son más baratos y compactos y suelen encontrarse con mayor frecuencia en dispositivos portátiles (Seidel et al., 2021). Sin embargo, una de sus desventajas es que la interferencia de las líneas de rayos X provenientes de elementos traza con el analito, puede afectar gravemente los límites de detección. Este efecto se agrava cuando la interferencia proviene de un elemento de mayor importancia (Verma, H.R., 2007).

La XRF tiene las ventajas de ser una técnica para el análisis de muestras sólidas de operación relativamente fácil con un bajo costo de preparación de muestras y, por lo tanto, se usa ampliamente para la determinación de elementos inorgánicos principales y traza en varios tipos de materiales, por ejemplo, rocas, minerales y sedimentos. Además de ser un método adecuado para análisis de muestras pequeñas con alta precisión (Kim et al., 2022). Sin embargo, esta técnica no permite la detección de elementos como el hidrógeno, helio, litio y berilio, a grandes rasgos el XRF está restringido a identificar elementos desde flúor ($Z=9$) hasta el uranio ($Z=92$) (Simon A., 2012), También no es capaz de proporcionar el mismo nivel de sensibilidad o precisión que los espectrómetros ICP-masas (espectrometría de emisión de plasma acoplado por inducción con detector de masas) para ciertos elementos (Fedeli et al., 2024). También es difícil distinguir variaciones entre isótopos de un mismo elemento o iones del mismo elemento en diferentes estados de valencia (Wilberforce O. J., 2016).

5.6.2. Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado por inducción

Por otro lado, la técnica de espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado por inducción con detección óptica (ICP-AES) es más utilizada para determinar elementos inorgánicos en muestras líquidas. Por ejemplo, la ICP-AES es útil para cuantificar metales pesados en $PM_{2.5}$ que están estrechamente relacionados con la producción industrial y sus emisiones (Pan et al., 2022). Esta técnica consiste en suministrar energía mediante corrientes eléctricas producidas por inducción electromagnética con el objetivo de hacer que los elementos emitan longitudes de onda características de luz específica que luego pueden ser medidas (Warra & Jimoh, 2011). Principalmente, esta técnica permite el análisis multielemento (hasta 40 elementos), aunque su desventaja es ser una técnica destructiva y un alto límite de detección, es decir, necesita muestras entre 0.1-0.5 g para que puedan ser detectadas de forma precisa (Gibson et al., 2004).

Otra técnica similar a la mencionada anteriormente es la espectrometría de plasma acoplado por inducción con detección de masas (ICP-MS). La ventaja más significativa de esta técnica es que se logra una mejora de hasta 10 veces más en los límites de detección (Brenner, 2017) y la capacidad de detectar isótopos. Sin embargo, dentro de sus desventajas se encuentra el alto costo del equipo (Wilschefski & Baxter, 2019) y que puede

presentar interferencias espectroscópicas y no espectroscópicas que afectan las señales del analito, las primeras ocurren cuando los iones extraídos poseen relaciones masa-carga (m/z) similares lo que puede ser causado por interferencias isobáricas. Las segundas surgen de alteraciones cuando se introduce la muestra, se ioniza el plasma o cuando se transportan los iones al detector (Makonnen & Beauchemin, 2014).

5.6.3. Otras técnicas

Los iones solubles en agua son la composición principal de las $PM_{2.5}$. Los iones solubles en agua tienen una fuerte higroscopicidad, lo que puede afectar la formación de nubes y, por tanto, al clima (Hassanvand et al. 2014). La cromatografía iónica y la espectrofotometría de absorción atómica (AAS) son métodos analíticos usados para la determinación de iones solubles en agua. El principio de AAS es la absorción de frecuencias específicas de luz por parte de los átomos y, por lo tanto, AAS solo puede analizar iones metálicos. Aunque también existen técnicas basadas en AAS para mejorar la detección de elementos en traza, como AAS-electrotérmica y las de generación de vapor: con generación de hidruros (HG-AAS) y con vapor frío (CV-AAS). La primera mencionada permite detectar As, Sb y Se (Mohammed et al., 2018) y la segunda se emplea para Hg. Otros ejemplos son la espectrofotometría colorimétrica de Nessler, la espectrofotometría del compuesto selectfluor, la espectrofotometría de ferritocianato y la precipitación con sulfato de bario son métodos analíticos tradicionalmente usados para NH_4^+ , F^- , Cl^- y SO_4^{2-} (Pan et al., 2022).

Análisis del Carbón Elemental y Carbón Orgánico

Existen estudios donde se ha comprobado que el 20 al 70 % del peso de $PM_{2.5}$ se constituye de carbón elemental (CE) y carbón orgánico (CO). El CE absorbe la luz solar y, como consecuencia, se incrementa la temperatura del aire, lo que provoca el calentamiento global. El CO proviene principalmente del escape de los vehículos y de las industrias. El escape directo se llama carbono orgánico primario, que puede reaccionar con la luz solar y oxidantes (por ejemplo, ozono y radicales libres) formando carbono orgánico secundario (Kelly y Fussell, 2012). Además, el CO frecuentemente deriva de la quema de biomasa (Zhang et al., 2010).

Se ha encontrado que la espectrometría de masas de partículas individuales en aerosol (SPA-MS) es una nueva técnica para detectar el carbón elemental y el carbón orgánico en las partículas. En comparación con el analizador de carbono tradicional, la SPA-MS puede

determinar la composición química de $PM_{2.5}$ en tiempo real sin pretratamiento de la muestra (Pan et al., 2022). Esta técnica se utiliza para analizar la composición de muestras sólidas con alta sensibilidad. Se emplea una sonda que interactúa en la superficie de la muestra para extraer material, el cual es ionizado y analizado por un espectrómetro de masas (Shamazu et al., 2015).

Determinación de Compuestos Orgánicos

Dos de los métodos más comunes para detectar compuestos orgánicos en $PM_{2.5}$ son la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) y también la que es utilizada para líquidos (LC-MS). Una de las ventajas que tienen la GC-MS y LC-MS es la eficiencia de separación, especialmente cuando se detectan compuestos orgánicos con estructuras similares. La GC-MS se emplea para detectar pequeñas moléculas que son termoestables y con un bajo punto de ebullición (Pan et al., 2022). Alternativamente, el espectrómetro de masas en aerosol (AMS) es una técnica poderosa para el estudio directo de partículas atmosféricas (Nash et al. 2006) y, por lo tanto, se usa ampliamente en el mundo. Usando AMS, el componente orgánico del $PM_{2.5}$ se puede ionizar eficientemente mediante impacto de electrones o ionización química lo que permite la determinación de componentes presentes (Pan et al., 2022).

5.6.4. Lista de elementos que pueden ser identificados

La técnica de análisis de componentes principales es un método estadístico en donde se considera que existe una correlación entre las variables de composición del $PM_{2.5}$ y permite asociar los datos a las posibles fuentes de emisión a partir de su varianza común. Sin embargo, la aplicación estadística de esta técnica llega a ser deficiente al definir las fuentes potenciales de emisión, por lo que es necesario utilizar técnicas más avanzadas, aunque llega a ser útil como punto de partida porque nos da una idea más general de donde provienen (CMM, 2020).

Para lograr identificar cada uno de los elementos de las muestras, es necesario utilizar diferentes técnicas de análisis de ellas, por lo que en la Tabla 5 se presenta un resumen de cada uno de los componentes observables en la caracterización y el tipo de análisis que se debe realizar. Para elegir el tipo de análisis dependerá del objeto de estudio, así como de los recursos a disposición para la ejecución del proyecto.

Tabla 5. Especiación química de muestras PM_{2.5}

Tipos de análisis	Componentes
Metales (Posibles técnicas XRF, ICP-OES, ICP-MS)	Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Ga, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, Ce, Pb.
Iones (Cromatografía iónica)	Cloruro, nitrato, sulfato, sodio, magnesio, potasio, calcio, amonio
EC/OC (Métodos termo-ópticos)	Carbono orgánico, carbono elemental y fracciones (OC1, OC2, OC3, OC4, EC1, EC2, EC3)
Carbono orgánico soluble	Carbono orgánico soluble
Análisis de trazadores orgánicos (cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas GC-MS)	Levoglucosan, HAPs, Hopanos y Esteranos, Alcanos, etc.

Tomada de: Caracterización Química de Material Particulado (CORPONOR et al., 2021).

5.7. Impactos en la salud

5.7.1. Efectos asociados a la exposición a PM_{2.5}

Las partículas PM_{2.5} son tan pequeñas como para ingresar y alojarse en el sistema respiratorio. Los efectos que traerán consigo dependerán del tiempo de exposición, tanto a corto como largo plazo, por ejemplo:

- Enfermedades respiratorias y cardiovasculares, que incluye el empeoramiento del asma, los síntomas respiratorios y el aumento de las hospitalizaciones relacionadas a esto.
- Aumento de las muertes asociadas a las mencionadas en el punto anterior, además de cáncer de pulmón.

Además, la exposición a largo plazo de PM_{2.5} está relacionado al incremento del riesgo de mortalidad cardiopulmonar que va desde un 6 a un 13 % por cada 10 µg m⁻³ de PM_{2.5} (WHO, 2013). Estudios centrados en investigar el sistema nervioso humano evidenciaron que la exposición a PM_{2.5} crecimiento del riesgo en los individuos de desarrollar la enfermedad de Parkinson, Alzheimer, el déficit de memoria y la demencia (Kioumourtzoglou et al., 2016; Liu et al., 2016; Younan et al., 2020). Los efectos nocivos de la exposición a PM_{2.5} y su asociación con daños en el sistema renal humano han sido reportados en diferentes estudios, los cuales evidencian el riesgo también de enfermedad renal crónica (ERC) (Blum

et al., 2020; Bo et al., 2021; Bragg -Gresham et al., 2018; Chan et al., 2018; García, 2023), de progresión a enfermedad renal terminal (ESKD) (Bowe et al., 2018) y de menor tasa de filtración glomerular (TFG) (Mehta et al., 2016) (García, 2023).

Conocer los efectos de la exposición a concentraciones elevadas de PM_{2.5} permitirá realizar recomendaciones a las autoridades para proteger a la población.

5.7.2. Relación entre los componentes de PM_{2.5} y diferentes problemas de salud

Entre los componentes principales de las PM_{2.5} se encuentran los compuestos orgánicos (carbono orgánico, hidrocarburos aromáticos policíclicos y benceno), compuestos inorgánicos (sulfato, nitrato, amoníaco, cuarzo, sílice, óxidos minerales) y componentes biológicos (bacterias, hongos y virus). Sin embargo, las proporciones de los distintos componentes en las PM_{2.5} varían mucho según las fuentes y emisiones locales. La composición, concentración y área de superficie específica de PM_{2.5} influyen en sus efectos fisiopatológicos. Se ha determinado que los componentes de PM_{2.5} más tóxicos son los metales, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), las partículas carbonosas (CP) y otros compuestos orgánicos que tienen diferente toxicidad para la salud humana (Wang et al., 2023).

➤ Metales

La diferente composición metálica del PM_{2.5} afecta a diferentes órganos. Por ejemplo, el As o el Cr suelen dañar los pulmones. Sin embargo, el Pb²⁺ afecta predominantemente a los riñones (Bai et al., 2018). Algunos metales con propiedades redox (Zn y Fe), desempeñan un papel que puede promover la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y, por lo tanto, disminuir la actividad de las enzimas antioxidantes, lo que hace que las células experimenten estrés oxidativo (Heo et al., 2015).

➤ Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Una de las principales consecuencias a la exposición excesiva a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) es la ocurrencia de cáncer de pulmón. El metabolismo de los HAP a través de la vía CYP1A1/1B1/EH, la vía CYP peroxidasa y la vía AKR conduce a la formación de carcinógenos activos como diol-epóxidos, cationes radicales y o -quinonas. Estos metabolitos reactivos producen aductos de ADN, lo que da lugar a mutaciones de

ADN, modificación de las características de expresión génica y tumorigénesis (Moorthy et al., 2015). También hacen que mediadores proinflamatorios ingresen al torrente sanguíneo, lo que en última instancia puede causar daño al epitelio o tejido pulmonar (Wang et al. 2023).

Es importante considerar la presencia de metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en la composición de las $PM_{2.5}$ para comprender las concentraciones a las que las personas pueden estar expuestas. Aun cuando no sean el objeto de estudio de este proyecto es necesario tenerlos en cuenta porque permite identificar los posibles efectos para la salud que podrían derivarse de dicha exposición.

5.7.3. Estudios epidemiológicos que vinculan la exposición a $PM_{2.5}$ a enfermedades

Evidencia toxicológica y epidemiológica sugiere un vínculo potencial entre sustancias químicas específicas en $PM_{2.5}$ y efectos adversos para la salud. A corto plazo, se ha identificado que los cambios de concentración de los componentes del $PM_{2.5}$ pueden estar estrechamente relacionados con enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Dai et al., 2014; Huang et al., 2012; Ostro et al., 2009; Ostro et al., 2015; Peng et al., 2009; Yoo et al., 2019; Wang et al., 2022). Por ejemplo, el aumento de las concentraciones de carbono negro (BC), nitrato (NIT) y sulfato (SO_4) a corto plazo, pueden estar asociados con un aumento en las tasas de ingreso hospitalario por morbilidad cardiovascular y respiratoria (Ostro et al., 2009; Peng et al., 2009) e incluso puede conducir a un aumento de la mortalidad por dichas condiciones (Dai et al., 2014; Ostro et al., 2015; Yoo et al., 2019). Esta carga de salud afecta de manera desproporcionada a las poblaciones de mayor edad (Huang et al., 2012). Además de las enfermedades cardiopulmonares, también se ha documentado el impacto de los nitratos en la aparición de complicaciones agudas de la diabetes tipo 2 (Sun et al., 2016). Se han observado asociaciones entre los niveles de exposición a BC, nitratos, sulfatos y materias orgánicas (MO) y la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares como la cardiopatía isquémica (Thurston et al., 2016), la enfermedad coronaria (Wolf et al., 2015) y el cáncer de pulmón (Ostro et al., 2009; Raaschou-Nielsen et al., 2016).

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se realizó un estudio entre la asociación a la exposición promedio a $PM_{2.5}$ y la prevalencia de obesidad en niños, adolescentes y adultos. Observando un aumento de casi el doble en las probabilidades de obesidad por cada $10 \mu g m^{-3}$ de $PM_{2.5}$ (Tamayo-Ortiz, 2021).

Capítulo 6
ÁREA DE ESTUDIO

6. ÁREA DE ESTUDIO

6.1. Área de estudio

La presente tesis se desarrolló realizando actividades experimentales dentro del Corredor Industrial Tula-Vito-Apaxco (CITVA), el cual es considerado como una de las zonas industriales y económicas más importantes del país, en la que se localizan hasta 117 industrias en donde se llevan a cabo actividades de generación de energía eléctrica, de refinación, así como de producción de cemento, actividades extractivas, agroquímicas, por mencionar algunas (Fig. 3). Esta alta densidad de industrias representa un riesgo potencial para los ciudadanos de la zona (Álvarez, 2017). En el Informe Nacional de Calidad del Aire publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en 2018, se resalta la región de Tula, donde los límites máximos permisibles para PM_{10} (70 y $36 \mu\text{g m}^{-3}$, para 24 h y anualmente, respectivamente) y $PM_{2.5}$ (41 y $10 \mu\text{g m}^{-3}$, para 24 h y anualmente, respectivamente) son superados constantemente, siendo las ciudades de Atitalaquia y Atotonilco en donde se registran las concentraciones más altas. La ciudad de Apaxco en el Estado de México contigua al CITVA, también presenta problemas graves de contaminación del aire, sin embargo, al carecer de un sistema de monitoreo de contaminantes, se desconoce a detalle las concentraciones ambientales de partículas suspendidas y otros contaminantes criterio. En Apaxco, las fuentes móviles son las mayores contribuyentes en la contaminación del aire debido a una alta presencia de vehículos de carga y particulares, además de las emisiones provenientes de la cementeras, las pedreras y las encargadas de producción de cal (SEDEMA, 2020).

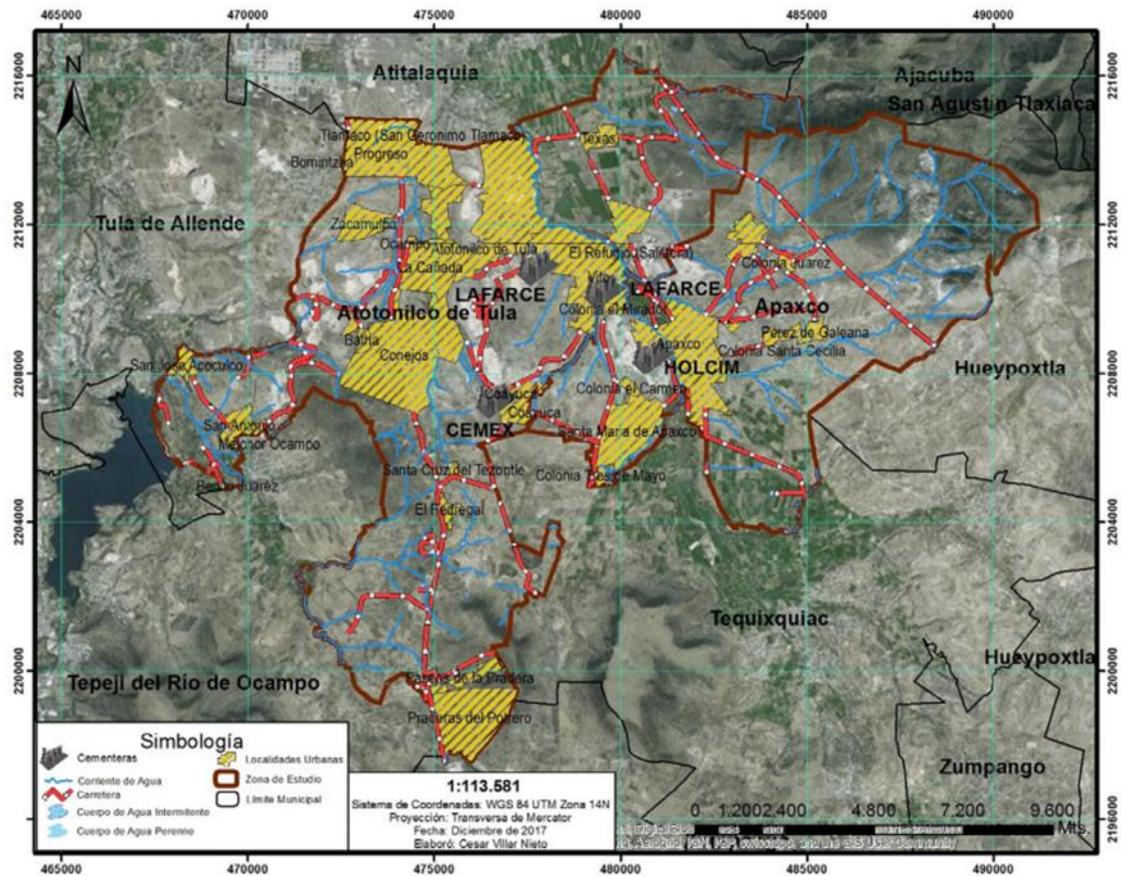


Figura 3. Ciudades de Apaxco, Estado de México, Atotonilco de Tula y Atitalaquia, Hidalgo con localización de las fábricas de cemento. Tomado de: Las comunidades locales del istmo oaxaqueño ante el megaproyecto eólico (Alonso, 2017) del Documento: Respuestas Comunitarias ante conflictos territoriales (Carrasco-Gallegos, 2017)

6.2. Sitios de muestreo

Se seleccionaron puntos de muestreo dentro de las ciudades de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia para determinar la exposición personal a PM_{2.5}. En cada ciudad, se seleccionaron dos rutas, caracterizadas por ser frecuentemente transitadas por la población y por la presencia de puntos de interés. En la ciudad de Apaxco (Fig. 4), se seleccionó un recorrido en la zona urbana, cruzando por la Avenida principal Juárez y llegando a la primaria Lic. Juan Fernández Albarrán (19.978185, -99.172892), esto en el centro de la ciudad; mientras que el segundo recorrido comprende la zona industrial, en las calles Adolfo Mateos y Juan Aldama hasta llegar a la primaria José María Morelos y Pavón (19.981325, -99.141540).

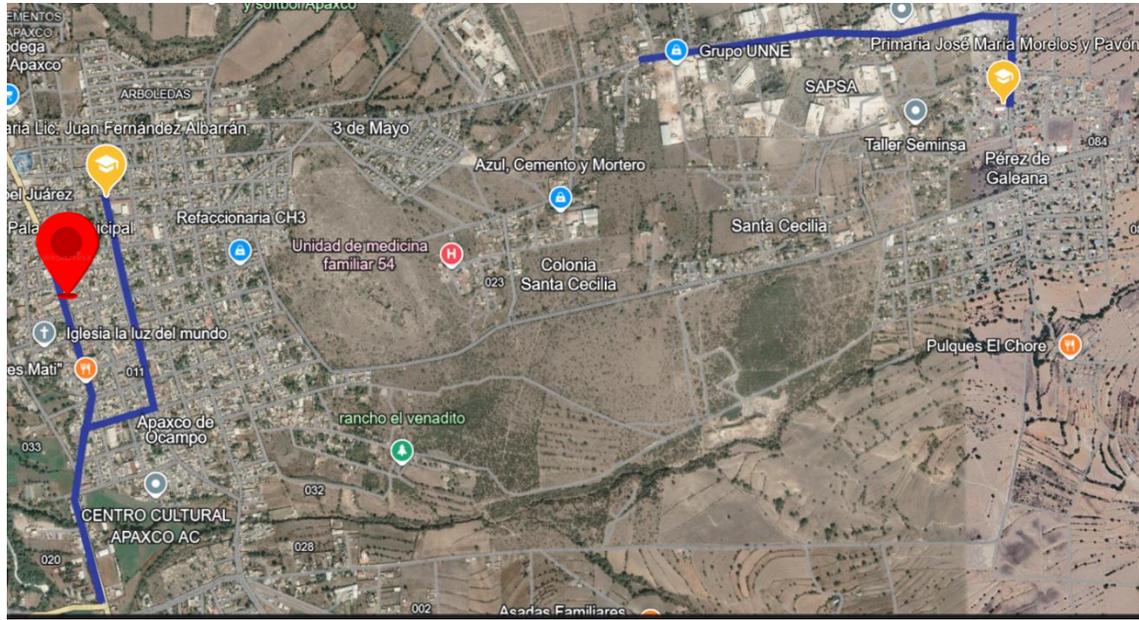


Figura 4. Mapa de los sitios de muestreo en la ciudad de Apaxco. Las rutas se muestran con color azul, los puntos amarillos corresponden a escuelas primarias y el punto rojo es el sitio de monitoreo fijo donde se colocaron los equipos. Elaboración propia con datos de: Google Maps (2023).

En Atotonilco (Fig. 5), una ruta de muestreo se localiza en la zona industrial al norte de la ciudad, cercana a la calera Beltrán, en donde la primaria “Primero de Mayo” (20.013273, -99.217983) se encuentra próxima a dicha empresa. La segunda ruta cubre la zona sur, en una zona urbana cruzando por una de las plazas principales dentro del municipio, la cual cruza por la primaria “Revolución” (20.007247, -99.218843) cerca del Museo Comunitario Atotonilli.

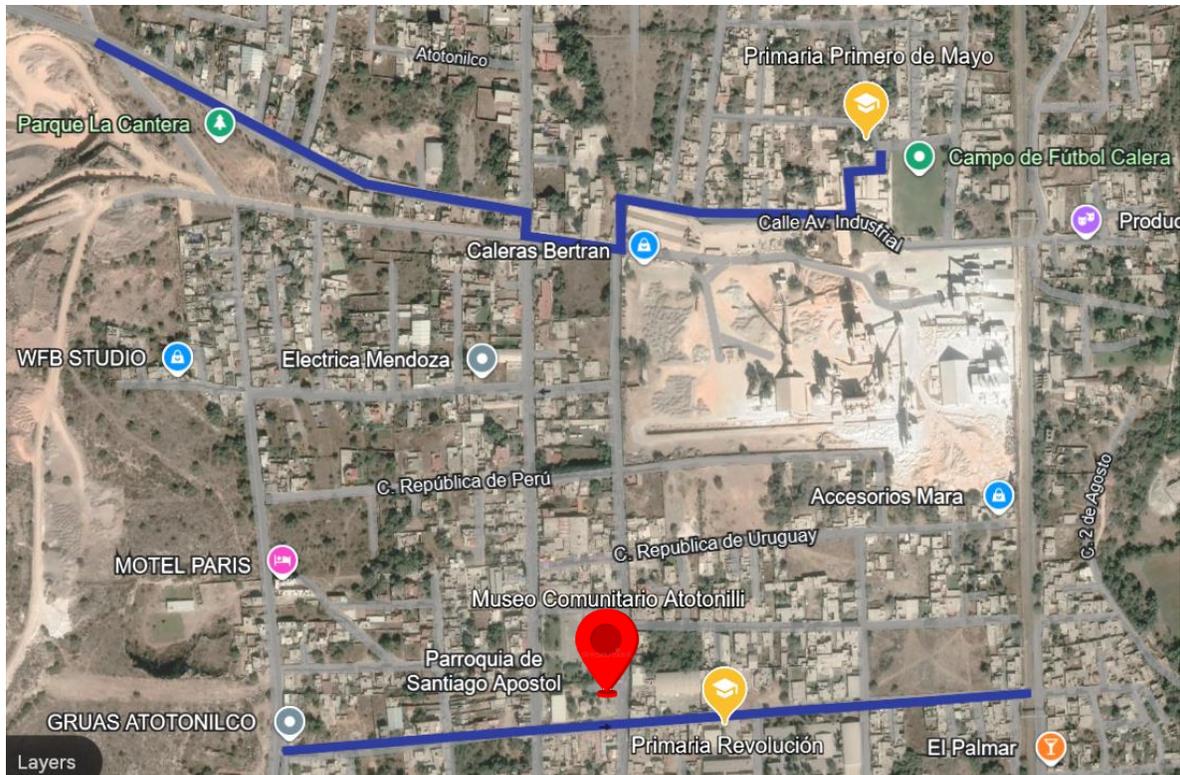


Figura 5. Mapa de los sitios de muestreo en la ciudad de Atotonilco. Las rutas de muestreo se muestran con color azul, los puntos amarillos son las primarias descritas como puntos de interés y el punto rojo es el sitio fijo donde se colocaron los equipos de medición. Elaboración propia con datos de: Google Maps (2023).

Finalmente, en la ciudad de Atitalaquia (Fig. 6), se seleccionó una ruta en la zona urbana al centro de la ciudad y otra ruta al sur de la ciudad en la zona industrial, la cual es transitada por vehículos de carga que funcionan con diésel. La primera ruta termina en la escuela primaria “Benito Juárez” (20.058435, -99.222654) y la segunda termina en la primaria “Adolfo López Mateos” (20.049304, -99.219395). Al igual que en las otras ciudades, se colocó un sitio de monitoreo en el techo del Palacio Municipal de la ciudad.

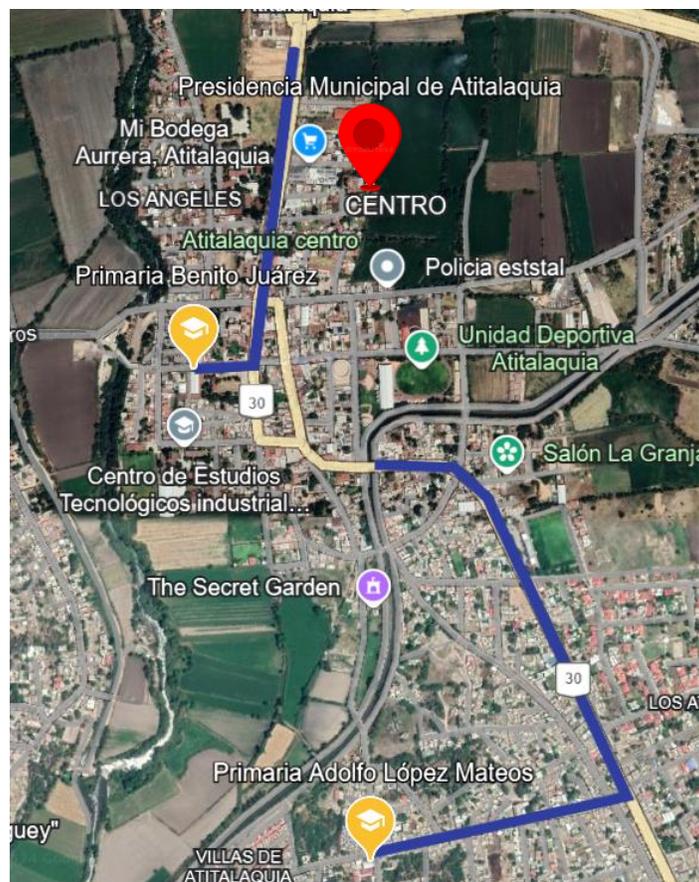


Figura 6. Mapa de los sitios de muestreo en la ciudad de Atitalaquia. Las rutas se muestran con color azul, los puntos amarillos son las primarias y el punto rojo es el sitio fijo donde se colocaban los equipos. Elaboración propia con datos de: Google Maps (2023).

Capítulo 7

MÉTODOS

7. MÉTODOS

7.1. Muestreo

7.1.1. Diseño experimental

Se realizaron muestreos en las ciudades de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia para conocer las concentraciones a $PM_{2.5}$ que están expuestas cuando realizan actividades cotidianas los habitantes de cada una de ellas. Se realizaron dos campañas de muestreo en 2023, la primera realizada los meses de mayo-junio (temporada seca-caliente) y la segunda en noviembre-diciembre (temporada seca-fría). A continuación, la Tabla 6 muestra las fechas específicas en que se realizaron mediciones en cada ciudad estudiada:

Tabla 6. Calendario de campañas de muestro realizadas

Temporada	Fecha	Ciudad
Seca-caliente	30-may-23	Apaxco
	31-may-23	Apaxco
	01-jun-23	Apaxco
	02-jun-23	Apaxco
	12-jun-23	Atotonilco
	13-jun-23	Atotonilco
	14-jun-23	Atotonilco
	15-jun-23	Atitalaquia
	16-jun-23	Atitalaquia
Seca-fría	13-nov-23	Atotonilco
	14-nov-23	Atotonilco
	15-nov-23	Atitalaquia
	16-nov-23	Atitalaquia
	04-dic-23	Apaxco
	05-dic-23	Apaxco
	06-dic-23	Apaxco
07-dic-23	Apaxco	

Durante cada campaña, se siguió un protocolo que consistió en 8 etapas:

- Preparación de los equipos en el ICAYCC, donde se realizaba su calibración y el corte de los filtros de policarbonato con un tamaño de poro de 4 y 6 micrómetros.

- Antes del inicio del muestreo, se colocó un nuevo filtro para todo el día. De igual manera, se co-colocaron (poner en operación al mismo tiempo y en la misma ubicación para identificar discrepancias entre instrumentos) los equipos durante 10 minutos.
- Se realizaron dos rutas de muestreo diferente en cada una de las ciudades (Fig. 4-6) en un horario matutino y otro vespertino. Estos horarios se eligieron al ser representativos en los que se traslada principalmente la población.
- Después de terminar la ruta en la mañana, los equipos se colocaban en las escuelas primarias elegidas para cada ciudad, dejando los equipos en un salón de clases. Esto con la finalidad de recopilar información adicional de la exposición en un sitio donde confluye población vulnerable.
- Al terminar el horario escolar, se recogían los equipos y se realizaba nuevamente la ruta.
- Se eligieron puntos fijos dentro de cada ciudad. Al término de las rutas, los equipos se colocaron nuevamente juntos para una comparación.
- Al finalizar el muestreo, se retiraron los filtros utilizados y se descargaron datos.
- Los filtros con muestras de partículas finas, se etiquetaron con claves dependiendo del día, del equipo utilizado y el lugar donde se realizó el muestreo para posteriormente analizados utilizando XRF.

7.1.2. Instrumentación

Para la realización de los muestreos descritos, se utilizaron equipos de monitoreo de exposición personal (pDR-1500) de partículas con alta resolución temporal (1-seg). El monitor personal Thermo pDR-1500 mide la concentración en tiempo real de partículas suspendidas, utilizando el principio de nefelometría (ThermoFisherScientific, s.f.). El instrumento pDR-1500 permite colocar filtros en un accesorio para recolectar las partículas suspendidas que son medidas de forma óptica, para realizar posteriormente un análisis gravimétrico. Este instrumento cuenta con rango de punto de corte de partículas aerodinámicas de 1 a 10 μm . Adicionalmente, se utilizó un monitor de aerosoles óptico (Grimm) que mide la concentración de partículas suspendidas en un rango de tamaño de 0.3 a 20 μm , el cual utiliza el principio de dispersión ortogonal de la luz (Grimm Aerosol, s.f.).

7.2. Análisis de la composición química

Para realizar la caracterización química de los elementos químicos presentes en las muestras de partículas suspendidas recolectadas en las rutas de muestreo seleccionadas, se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF). Dicha técnica consiste en incidir un rayo X primario procedente de una fuente de radiación sobre una muestra de $PM_{2.5}$ recogida en un filtro de policarbonato, en donde los rayos X pueden ser absorbidos por átomos o dispersarse a través del material (Haq et al., 2008).

El espectrómetro de dispersión de energía (EDXRF) utilizado para el análisis de las muestras se encuentra en el Instituto de Física de la UNAM. Las fuentes de radiación primarias son tubos de rayos X empaquetados de 75 W (voltaje máximo 50 kV), fabricados por Oxford Instruments X-Ray Technologies (Scotts Valley, CA, EE. UU.). Estos tubos cuentan con ánodos de Rh y W; para las muestras analizadas se utilizó el tubo de Rh, operado a 50 kEV y 500 μ A.

Los tubos empleados tienen una ventana de Berilio de 127 μ m de espesor, lo que permite su funcionamiento en vacío. Además, estos operan a través de una fuente de energía construida localmente, lo que facilita la selección del voltaje y la corriente del tubo de rayos X. Como consecuencia de la alta energía consumida por los tubos, es necesario mantener su temperatura por debajo de 65 °C. Esto se logra mediante refrigeración por aire forzado, utilizando un conjunto de ventiladores que funcionan a un caudal mínimo de 0.071 $m^3 s^{-1}$ (150 CFM), siguiendo las recomendaciones del fabricante (Espinosa et al., 2012).

Una de las características del sistema de XRF es que los tubos de rayos X que actúan como soporte de la fuente radiactiva, se fijan a la cámara del espectrómetro mediante bridas NW-40. Este dispositivo está diseñado de tal manera que un objetivo cilíndrico se coloca a un ángulo de 45 grados con respecto al haz primario de rayos X y la dirección de la muestra (Espinosa et al., 2012). El sistema utiliza un detector de deriva de silicio (X-123SDD), el cual cuenta el número y la energía característica de los fotones de rayos X y tiene una resolución de 120eV a 5.9 keV. El SDD registra todo el espectro de energía a la vez, lo que permite la detección simultánea de múltiples elementos (Fig.7).

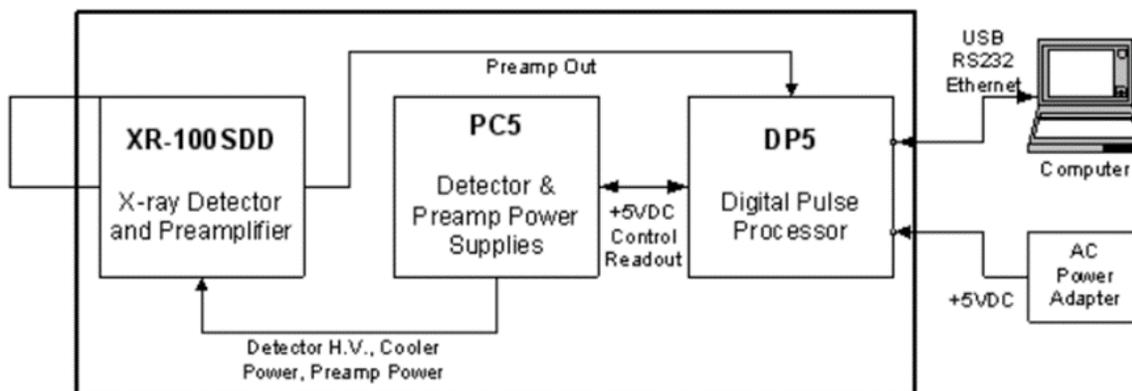


Figura 7. Diagrama del funcionamiento del detector X-123SDD. Tomada de: X-123SDD Complete X-Ray Spectrometer with Silicon Drift Detector (SDD) (Amptek.com, s/f).

En la Fig. 8, se muestran imágenes del espectrómetro de rayos X ubicado en el Laboratorio de Aerosoles del Instituto de Física. En el panel inferior, se muestra el tubo de portamuestras, el cual permite colocar hasta 6 muestras. Es importante colocar primero un patrón certificado para garantizar la veracidad de los datos obtenidos. Después, como ya se mencionó anteriormente, el tubo se coloca con un ángulo de 45° para que las muestras sean incididas correctamente por los rayos X y lleguen al detector. Estas muestras se colocan a alto vacío (10^{-6} torr) para eliminar la interferencia del aire y el ruido del sustrato y se irradian por 900 s. Se realiza un escaneo de los filtros para conocer donde se encuentra la mayor superficie de depósito e irradiar en ese punto los rayos X. Las señales emitidas se procesan en computadora para generar un espectro, donde cada pico corresponde a un elemento específico. A partir de este análisis, es posible identificar los elementos y cuantificar sus concentraciones.

Para validar los resultados obtenidos, a principio de año se realiza la calibración del espectrómetro con los patrones certificados que abarcan prácticamente todos los elementos de la tabla periódica. Este proceso tiene una duración de un mes para asegurar la precisión antes de analizar las muestras. También se determinan los límites de detección, donde la energía del Na es el límite mínimo (1.041 keV) y el U como límite máximo (98.4 keV) (Deslattes et al., 2003).

Cada muestra que ingresa al equipo es colocada con un patrón certificado de Fe de $42.9 \mu\text{g m}^{-3}$, para comprobar y tener la certeza que el equipo no se ha descalibrado. Al final del análisis de las muestras, se realiza otra calibración utilizando un patrón estándar certificado

para $PM_{2.5}$, NIST SRM 2783 (Air Particulate on Filter Media), siguiendo la metodología de Mejía-Ponce et al. (2018).



Figura 8. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X perteneciente al Laboratorio de Aerosoles del Instituto de Física de la UNAM, utilizado en el presente estudio para la caracterización química del $PM_{2.5}$ recolectado durante la determinación de la exposición personal.

7.3. Análisis estadísticos

Los datos obtenidos de los equipos de muestreo fueron recopilados y analizados utilizando el software R (R Core Team). Las series de tiempo recolectadas se evaluaron mediante la prueba de Shapiro-Wilk, con el fin de conocer qué tipo de distribución presentan los datos obtenidos. Los resultados mostraron que los datos de $PM_{2.5}$ presentan una distribución no

paramétrica, debido a que no presenta una distribución normal de los datos. Por lo anterior, la existencia de diferencias se evaluó utilizando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, para comparar diferencias significativas entre los grupos de datos analizados. Los resultados se evaluaron utilizando un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, por lo tanto, valores $p<0.05$ muestran la existencia de diferencias significativas en las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidos y de los componentes identificados. Las series de tiempo obtenidas muestran que las mediciones son representativas de diferencias reales entre ciudades y no es el resultado de muestreos al azar. Por último, los resultados obtenidos fueron representados en gráficos de cajas y bigotes para analizar la distribución y variabilidad que seguían los datos.

Capítulo 8

RESULTADOS

8. RESULTADOS

8.1. Exposición a PM_{2.5}

En la siguiente sección, se presentan los datos de exposición obtenidos en los muestreos realizados en la RESA. La Tabla 7 presenta los días y el número de horas de muestreo.

Tabla 7. Tiempo de muestreo durante cada día de las campañas realizadas

				Tiempo de muestreo
Seca-caliente	Apaxco	30/05/2023	pDR1	05:19:43
			pDR2	-
		31/05/2023	pDR1	06:18:57
			pDR2	06:47:22
		01/06/2023	pDR1	06:18:39
			pDR2	07:12:29
	02/06/2023	pDR1	06:09:19	
		pDR2	07:03:06	
	Atotonilco	12/06/2023	pDR1	02:43:24
			pDR2	01:01:13
		13/06/2023	pDR1	13:44:04
			pDR2	07:31:59
		14/06/2023	pDR1	14:11:35
			pDR2	14:43:30
Atitalaquia	15/06/2023	pDR1	13:19:38	
	16/06/2023	pDR2	14:43:30	
Seca-fría	Atotonilco	13/11/2023	pDR2	22:00:01
			pDR3	21:31:56
		14/11/2023	pDR2	14:42:22
			pDR3	21:18:23
			pDR3	21:18:23
		Atitalaquia	15/11/2023	pDR2
	16/11/2023		pDR3	21:19:55
	Apaxco	04/12/2023	pDR2	-
			pDR3	10:59:01
		05/12/2023	pDR2	22:37:24
			pDR3	22:08:05
		06/12/2023	pDR2	13:27:42
			pDR3	12:46:34
		07/12/2023	pDR2	22:50:43
pDR3			22:10:33	
		pDR2	11:27:38	
		pDR3	10:49:17	

Se evaluó el comportamiento de las concentraciones de PM_{2.5} durante las campañas realizadas para cada una de las ciudades y rutas estudiadas a partir de gráficos de cajas y bigotes (Anexo A). Dichos gráficos permiten visualizar la distribución de los datos y facilitan la comparación entre las ciudades de estudio. En la Fig. 9, se presentan los resultados obtenidos de exposición a PM_{2.5} utilizando los monitores personales pDR-1500 para las zonas analizadas en las tres ciudades de la RESA.

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ determinadas para las rutas en las zonas industriales (Apaxco $24.9 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$, Atitalaquia $25.5 \pm 2.6 \mu\text{g m}^{-3}$, Atotonilco $20.1 \pm 2.0 \mu\text{g m}^{-3}$) destacan en todas las ciudades estudiadas en comparación con las zonas urbanas (Apaxco $22.1 \pm 2.4 \mu\text{g m}^{-3}$, Atitalaquia $17.7 \pm 2.7 \mu\text{g m}^{-3}$, Atotonilco $11.8 \pm 2.6 \mu\text{g m}^{-3}$) (Anexo B). Por lo cual, las zonas industriales muestran una variabilidad marcada en los datos de concentración promedio más alta que en las zonas urbanas, con un aumento para Apaxco del 12 %, para Atitalaquia del 44 % y de hasta el 70 % para Atotonilco. Este aumento se debe principalmente a la proximidad de las industrias mencionadas anteriormente, así como al intenso tráfico de camiones diésel, que contribuye de manera considerable a la contaminación del aire en estas áreas. Por lo tanto, las personas que transitan por las zonas industriales entre las 8 y 9 de la mañana, así como de 13 a 14 de la tarde, están expuestas a niveles más elevados de concentración de contaminantes, lo que implica un riesgo potencialmente mayor en comparación con las zonas urbanas.

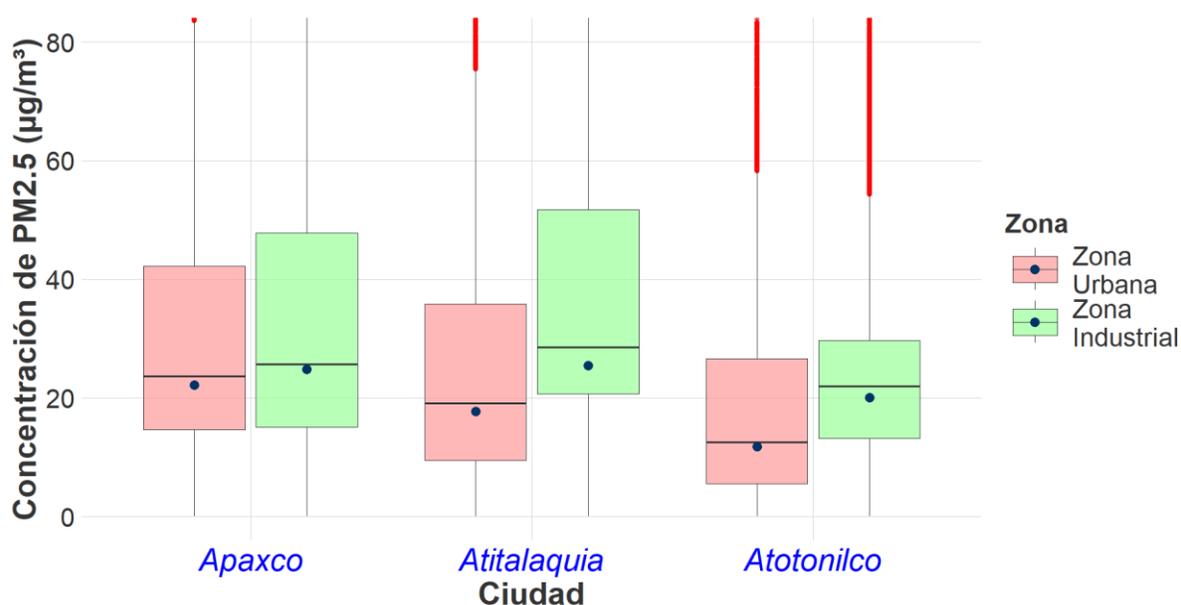


Figura 9. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración de $PM_{2.5}$ en $\mu\text{g m}^{-3}$ medidas en la zona industrial y zona urbana en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco.

Cada ciudad estudiada cuenta con diferentes actividades industriales, por lo que es importante analizar sus concentraciones de manera separada. En la Fig. 10, se presenta el análisis por cada ciudad estudiada. La ciudad de Apaxco es la que se observa la mayor concentración de $PM_{2.5}$ medida ($11.7 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$), esto asociado a que las concentraciones son dependientes principalmente de las fuentes móviles que se encuentran dentro de la

ciudad y de sus zonas industriales. La segunda ciudad con la mayor concentración promedio de $PM_{2.5}$ es Atotonilco ($10.8 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$). Es importante señalar que en esta localidad se encuentra una calera en el centro de la ciudad, que genera emisiones constantes de polvos. Estos polvos son claramente visibles para la población, lo que ha generado una preocupación continua entre los habitantes.

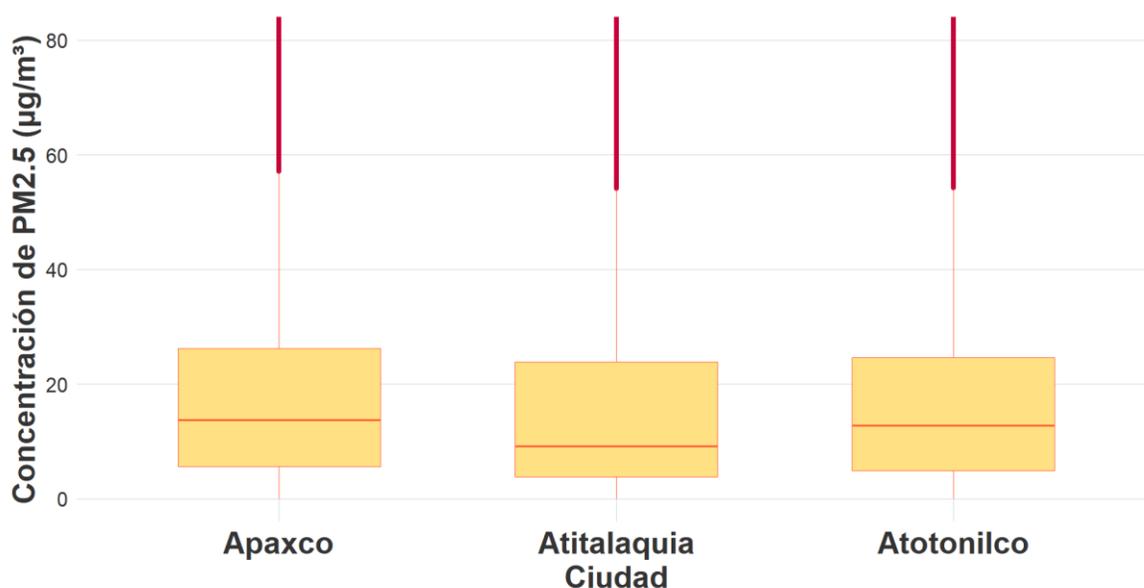


Figura 10. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración de $PM_{2.5}$ en $\mu\text{g m}^{-3}$ medidas en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco

Durante la primer campaña de muestreos, se inició con recorrido en el horario de mañana, dejando los equipos en un salón de clases de las primarias seleccionadas y finalizando con un recorrido por la tarde. Este enfoque tenía como objetivo simular el trayecto que realizan los niños durante sus actividades escolares. Sin embargo, al concluir esta campaña, se observó que para lograr una simulación más precisa de la exposición total a $PM_{2.5}$ a la que están expuestos los habitantes a lo largo del día, era necesario considerar también el tiempo que pasan en casa. Como resultado, se decidió ampliar los muestreos durante la segunda campaña para abarcar hasta 22 horas del día.

En la Fig. 11 se observa lo anterior mencionado, en la temporada seca-caliente en donde existe mayor variabilidad de datos, con un promedio de $20.6 \pm 2.5 \mu\text{g m}^{-3}$ durante el trayecto hacia la escuela y dentro de ella. Mientras que, al incluir el tiempo en los hogares durante la temporada seca-fría, se registra una disminución del promedio de concentraciones

medidas con un valor de $7.5 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$. Este último valor es hasta dos veces menor que lo establecido en la norma para un período de 24 horas, lo que sugiere una reducción significativa en la exposición personal total durante el día.

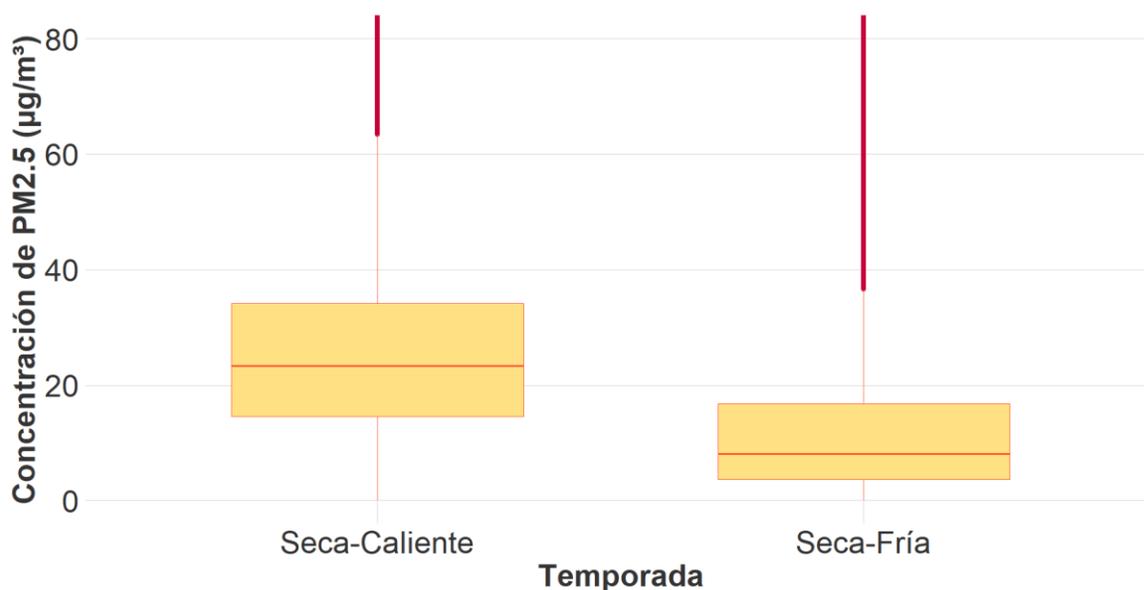


Figura 11. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración de PM_{2.5} en $\mu\text{g m}^{-3}$ medidas en las dos campañas realizadas (Temporada 1: seca-caliente, Temporada 2: seca-fría).

En la Tabla 8 se muestran las concentraciones de PM_{2.5} medidas en cada campaña por ciudad. Si se considerara los promedios medidos en la temporada seca-fría como la exposición total cada día durante el año, entonces no se rebasa la norma oficial de concentración de PM_{2.5} a $10 \mu\text{g m}^{-3}$ por año, siendo Apaxco la ciudad más cercana a rebasarla con un promedio de $9.7 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$. No obstante, es necesario realizar una nueva campaña en la temporada seca-caliente con las mismas condiciones de tiempo realizadas

en la temporada seca-fría para así tener la información suficiente al comparar ambas temporadas y encontrar las similitudes o diferencias que tienen cada una.

Tabla 8. Concentraciones de PM_{2.5} medidas en cada ciudad durante la temporada seca-caliente y seca-fría.

Ciudad	Concentraciones ($\mu\text{g m}^{-3}$)	
	Seca-Caliente Campaña 1	Seca-Fría Campaña 2
Apaxco	22.4 ± 2.9	9.7 ± 3.0
Atotonilco	24.6 ± 1.8	5.5 ± 2.5
Atitalaquia	14.1 ± 3.0	5.3 ± 4.1

8.2. Composición Química

8.2.1. RESA

Utilizando la técnica de caracterización por XRF descrita en la sección 7.2, se obtuvieron los espectros de las muestras recolectadas en filtros de policarbonato (Fig. 12). En los espectros obtenidos, cada pico observado corresponde a un elemento específico encontrado en las muestras y el área bajo los picos representa su concentración.

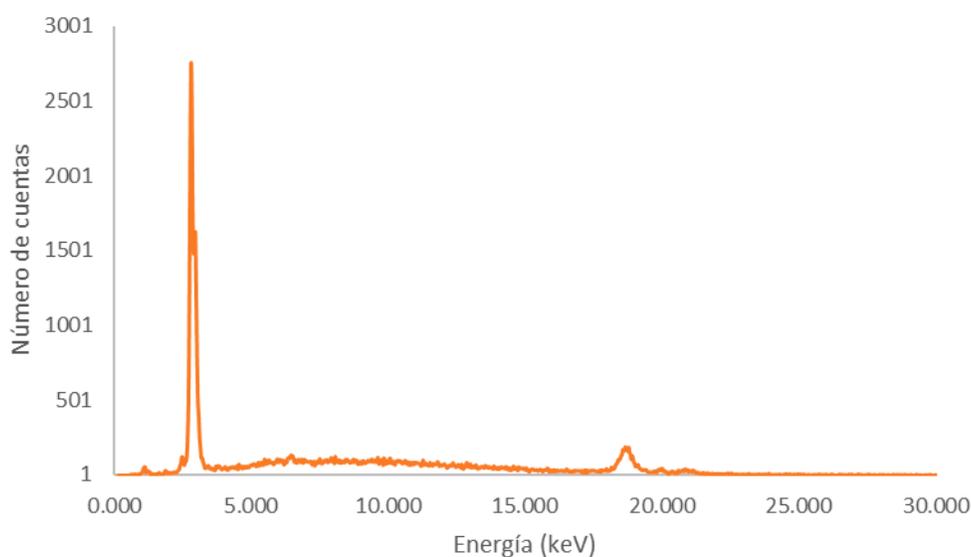


Figura 12. Ejemplo del espectro generado a partir de la técnica XRF del día 6 de diciembre del 2023 en la ciudad de Apaxco, en la zona Industrial.

La concentración representa la masa medida en cada centímetro de filtro ($\mu\text{g cm}^{-2}$), por lo que es necesario realizar una conversión a partir del área del filtro (7.55 cm^2) recolectada con la operación de los equipos pDR-1500 a un flujo de 1.52 L min^{-1} , presentado en la Tabla 9. El análisis de la caracterización química de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ presentado en la Tabla 9 revela que, aunque los niveles de los elementos identificados son más altos en las zonas industriales, la composición química no presenta una gran variabilidad. Esto se debe, principalmente, a que las concentraciones provienen de fuentes similares dentro de la ciudad, a pesar de las diferencias en su presencia en algunas áreas.

El calcio (Ca) se identificó como la especie más abundante en la región, lo que se asocia a la proximidad de industrias tales como cementeras y trituradoras, así como al polvo fugitivo acumulado en los suelos por actividades industriales encargadas de procesar materiales pétreos. Además, aunque en menor cantidad, el desgaste de los frenos de los vehículos en circulación en las ciudades también contribuye a la presencia de Ca en el aire (Nayabare et al., 2018).

Tabla 9. Concentraciones de las especies químicas en $\mu\text{g m}^{-3}$ encontradas en el análisis de composición utilizando XRF en las diferentes rutas dentro de las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco.

		Concentraciones ($\mu\text{g m}^{-3}$)									
Ciudad	Zona	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe
Apaxco	Urbana	4.4E-06	5.5E-06	1.6E-07	9.9E-06	8.2E-06	3.2E-06	8.9E-06	-	3.6E-07	2.4E-06
Apaxco	Industrial	4.3E-06	5.9E-06	4.6E-07	6.7E-06	1.1E-06	2.4E-06	2.9E-05	-	8.3E-07	2.8E-06
Atotonilco	Urbana	2.1E-06	4.7E-06	1.7E-07	2.5E-06	9.9E-07	1.8E-06	7.2E-06	-	2.0E-07	1.6E-06
Atotonilco	Industrial	1.5E-06	1.8E-06	9.8E-08	2.0E-06	1.1E-06	8.6E-07	4.2E-06	1.7E-08	1.4E-07	8.4E-07
Atitalaquia	Urbana	4.2E-06	7.1E-06	8.5E-08	1.2E-05	1.3E-06	1.9E-06	8.9E-06	-	1.7E-07	2.0E-06
Atitalaquia	Industrial	5.1E-06	8.4E-06	2.9E-07	1.0E-05	9.1E-07	1.3E-06	8.9E-06	-	1.6E-07	2.4E-06

En la Tabla 10 se encuentran resumidas las concentraciones de todas las especies químicas medidas en el espectrómetro. De nuevo es observable como los elementos químicos asociados a las actividades del cemento y polvos (Ca, S y Si) son las que mayor afectan la zona de la RESA.

Tabla 10. Concentraciones de las especies químicas en $\mu\text{g m}^{-3}$ encontradas en el análisis de composición en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco.

I	Concentraciones ($\mu\text{g m}^{-3}$)									
	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe
Apaxco	4.3E-06	5.7E-06	3.1E-07	8.3E-06	4.6E-06	2.8E-06	1.9E-05	-	5.9E-07	2.6E-06
Atotonilco	1.8E-06	3.2E-06	1.3E-07	2.2E-06	1.1E-06	1.3E-06	5.7E-06	1.7E-08	1.7E-07	1.2E-06
Atitalaquia	4.6E-06	7.7E-06	1.9E-07	1.1E-05	1.1E-06	1.6E-06	8.9E-06	-	1.7E-07	2.2E-06

Otro factor importante por considerar es el efecto que tienen estas especies químicas a la salud. En el documento Integrated Science Assessment for Particulate Matter de la USEPA en 2009, hace un recopilado de estudios epidemiológicos y de sus efectos que tienen sobre la salud. El Ca y Si son asociados según Cakmak et al. (2009) en Chile, al aumento de mortalidad causado por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. En Wake County, NC, USA, el estudio realizado por Riediker et al., 2004, el Si era parte del aumento de ácido úrico por lo que podía generar problemas renales y también causaba un efecto en el ciclo de las mujeres al hacerlo más largo. Otro estudio que menciona al Ca y Si, así como el Fe, Al, Ba y Ti (Gent et al., 2009) en New Haven CT, los relaciona con el aumento de problemas respiratorios y también al incremento en el uso de inhaladores para abrir las vías respiratorias. Por su parte, el S es el principal culpable del incremento de la mortalidad en Phoenix, AZ (Mar et al., 2000).

8.2.2. Apaxco

En esta sección, se analizan los resultados obtenidos en la ciudad de Apaxco durante los muestreos realizados. El análisis de composición química presenta valores de masa de las especies químicas más ligeras observadas en la muestra. La masa total fue calculada como la suma de las concentraciones totales medidas en cada día de muestreo, determinadas con cada monitor personal pDR-1500 (Anexo C). Esto es confiable debido al análisis gravimétrico para $\text{PM}_{2.5}$ realizado por Hernández-Paniagua et al. (2023), en el cual obtuvieron factores de corrección para cada instrumento pDR-1500 utilizado en este estudio con la finalidad de corregir las lecturas obtenidas en tiempo real de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ (Figura 13). Ellos mostraron que la masa total determinada por las mediciones de los equipos personales pDR-1500 se correlaciona con la masa determinada en cada filtro recolectado utilizando la técnica de gravimetría lo que permite la corrección de dicho cálculo y realizar cálculos de masa total de forma confiable.

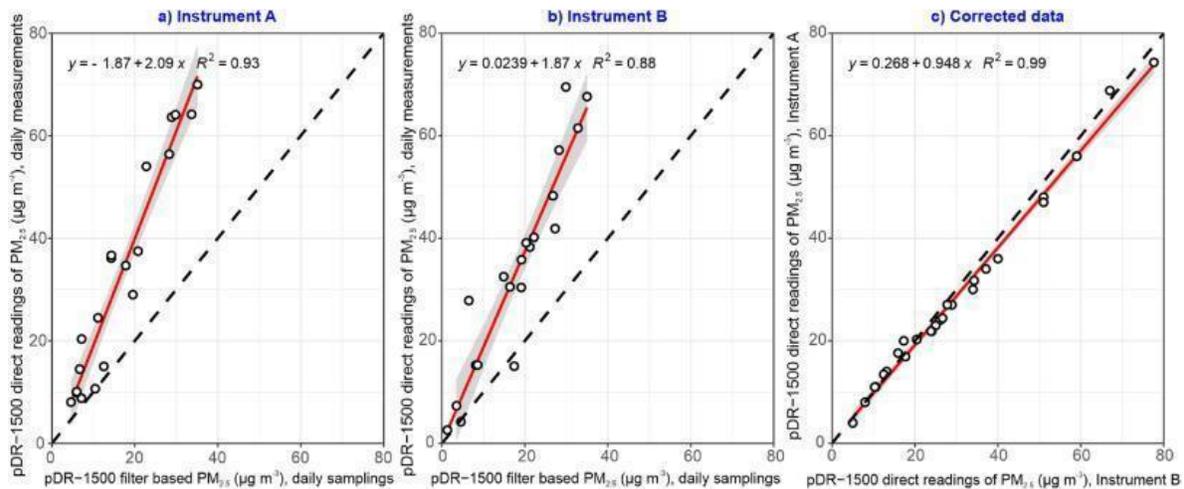


Figura 13. Factores de corrección para cada instrumento pDR-1500 y su análisis de correlación de concentraciones de PM_{2.5}. Tomada de: Reduced commuter exposure to PM_{2.5} and PAHs in response to improved emission standards in bus rapid transit systems in Mexico (Hernández-Paniagua et al., 2023).

Considerando la masa total de PM_{2.5} recolectada en cada filtro y las concentraciones de cada especie medidas en laboratorio, fue posible calcular el % de masa de cada una de ellas. Esto permitió identificar la especie química más predominante en cada una de las rutas dentro de las ciudades estudiadas. Además, esta caracterización permite tener una idea preliminar de las posibles fuentes de donde provienen las PM_{2.5} medidas.

La Figura 14 presenta el % en masa promedio de cada especie química encontrada en las muestras en las dos zonas estudiadas en la ciudad de Apaxco. La zona urbana dentro del centro de la ciudad presenta una mayor presencia de Ca y S, los cuales son indicadores de quema de biomasa (Echalar et al. 1998, Gilardoni et al. 2011). Mientras que en la zona industrial (en la periferia de la ciudad) el Ca, destaca sobre las demás especies. El Ca forma óxido de calcio (CaO) y es atribuido a actividades de minería de roca caliza y su manipulación en la producción de cemento (Vega et al., 2021). Esto concuerda con las actividades económicas que se llevan a cabo en la zona estudiada, debido a que esta se encuentra rodeada de pequeñas industrias de trituración de la roca, principalmente a escala familiar las cuales no cuentan con medidas de captura de polvos.

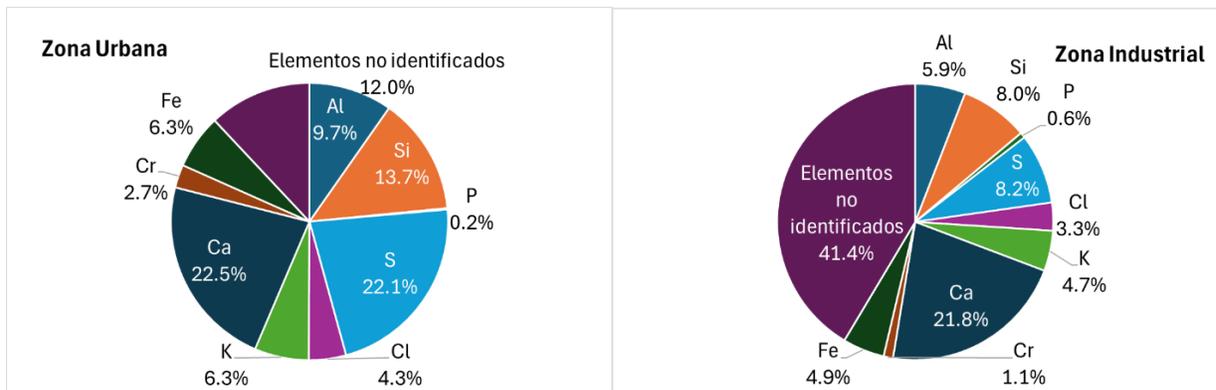


Figura 14. Porcentaje de masa del total de $PM_{2.5}$ recolectado para cada especie identificada en el análisis de composición química utilizando la técnica de XRF, en una zona urbana y una zona industrial en la ciudad de Apaxco

8.2.3. Atitalaquia

Al igual que en Apaxco, se realizó el mismo análisis de composición de $PM_{2.5}$ sobre las dos rutas muestreadas en la ciudad de Atitalaquia. La Fig. 15 muestra que no existen diferencias en la composición de las $PM_{2.5}$ entre ambas zonas. Las especies químicas predominantes son el S, Ca y Si, los cuales según Taghvaei et al. (2018) pueden ser asociados con el polvo de resuspensión de carreteras. En ambas rutas de la ciudad, existe un constante flujo de vehículos, tanto de carga como particulares, por lo que concuerda con lo mencionado por el autor. Además, la similitud en la composición química de las $PM_{2.5}$ entre ambas rutas se debe a que su principal fuente de emisión corresponde a las fuentes móviles dentro de la ciudad. También el S está potencialmente vinculado a la refinería de petróleo ubicada a menos de 10 km de distancia de la ciudad (Cargonja et al., 2019), así como a la quema de combustibles fósiles y combustión del petróleo en la termoeléctrica ubicada en la ciudad de Tula (Nayabare et al., 2018).

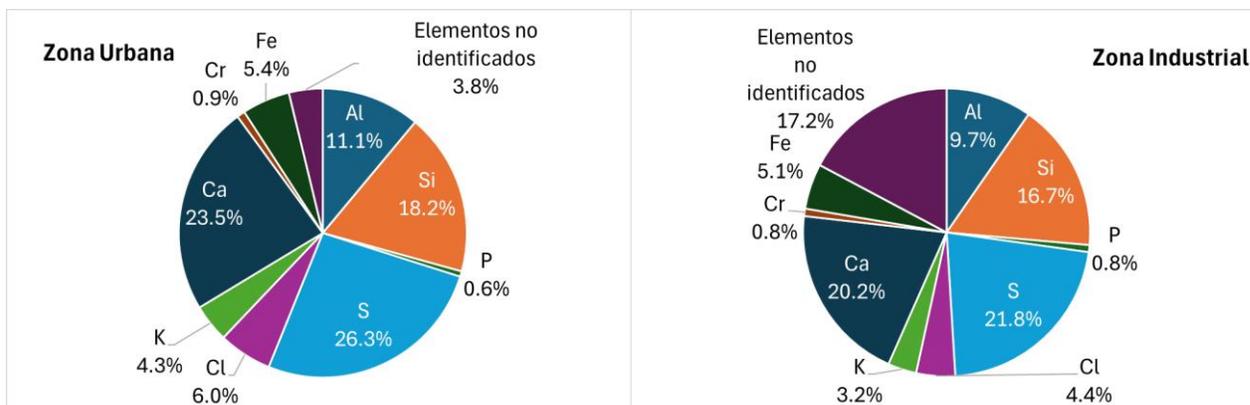


Figura 15. Porcentaje de masa del total de $PM_{2.5}$ recolectado para cada especie identificada en el análisis de composición química utilizando la técnica de XRF, en una zona urbana y una zona industrial en la ciudad de Atitalaquia.

8.2.4. Atotonilco

En la ciudad de Atotonilco se encuentra ubicada una calera en el centro de la ciudad, por lo que toda la zona es claramente afectada por las emisiones que genera esta industria. Esto se observa en la Fig. 16, en donde ambas zonas presentan la misma variabilidad de las especies, siendo las especies mayoritarias el Ca, Si y S, las cuales son relacionadas a la industria del cemento y hormigón (Nayebare et al., 2018) y también al polvo fugitivo (Kotchenruther, 2016) asociado a la producción de cal de la calera. También dichas especies se pueden asociar a la resuspensión de polvo al circular camiones de carga cerca de la zona industrial.

Particularmente en Atotonilco, se identificó que en las calles se encontraba abundante polvo blanco en ambas rutas que es resuspendido por vehículos cuando transitan sobre estas. La ciudad de Atotonilco es considerada una de las más contaminadas en el estado de Hidalgo debido a su alta actividad industrial dentro de la ciudad. En este análisis, fue la segunda ciudad con mayores concentraciones registradas ($10.8 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$), siendo superada por Apaxco con una diferencia de 8 % ($11.7 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$) en las concentraciones de exposición a $PM_{2.5}$.

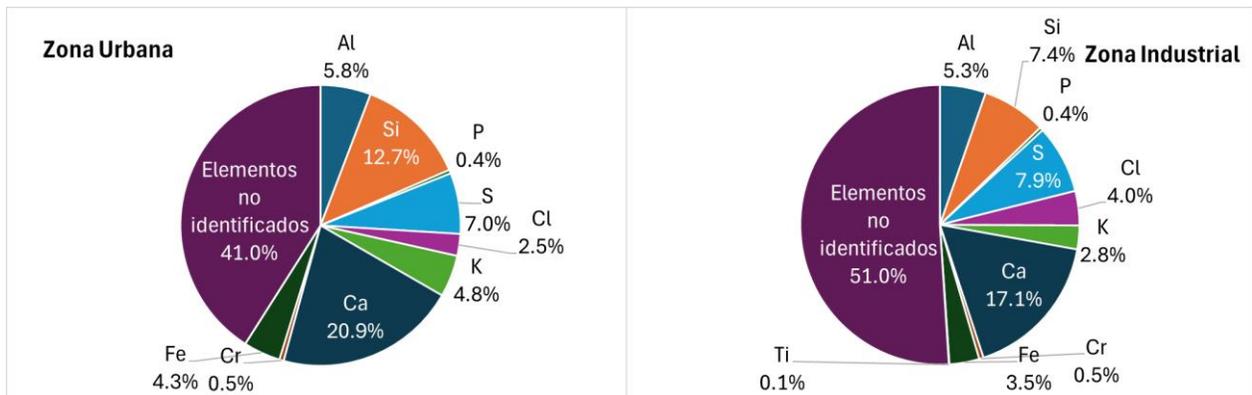


Figura 16. Porcentaje de masa del total de PM_{2.5} recolectado para cada especie identificada en el análisis de composición química utilizando la técnica de XRF, en una zona urbana y una zona industrial en la ciudad de Atotonilco.

8.3. Comparación contra estudios existentes a nivel mundial

Es fundamental entender las diferencias en la exposición y las posibles políticas que se han implementado en otras partes del mundo con el fin de mitigar los niveles de este contaminante que respira la población. Por ello, es pertinente comparar los resultados obtenidos en este proyecto con otras investigaciones realizadas en el contexto de exposición a PM_{2.5}. Por ejemplo, un estudio de exposición personal llevado a cabo en tres ciudades de China (Lai et al., 2021), reveló que, en análisis llevados a cabo en ambientes exteriores como los realizados en este proyecto, la ciudad de Beijing mostró un promedio de concentración de PM_{2.5} 164 $\mu\text{g m}^{-3}$, mientras que Shanxi y Guangxi exhibieron concentraciones de exposición de 163 y 70 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Comparando dichos datos con las mediciones de este proyecto en la temporada seca-caliente en las zonas estudiadas (Apaxco, $22.5 \pm 2.9 \mu\text{g m}^{-3}$; Atotonilco, $24.6 \pm 1.8 \mu\text{g m}^{-3}$; Atitalaquia, $14.1 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$), se observó que las concentraciones en las ciudades de Beijing y Shanxi son significativamente mayores. Esto indica que las ciudades chinas enfrentan mayores problemas de contaminación de partículas finas que las estudiadas en este proyecto. Sin embargo, es importante considerar que las ciudades chinas cuentan con una extensión territorial mayor, por lo que, en la RESA, que tiene una menor extensión, existe un mayor impacto de las fuentes que la rodean a su población.

Estudios han destacado la importancia de cuantificar la exposición personal no solo en microambientes exteriores, sino también en espacios interiores debido a que las personas pasan la mayor parte del tiempo en ellos, especialmente los estudiantes y trabajadores, por

lo que hace que sean lugares importantes de exposición a partículas (Lim et al., 2012). Por ejemplo, en Seúl, Corea, se han reportado valores promedio de exposición diaria a $PM_{2.5}$ de $19.8 \mu\text{g m}^{-3}$, los cuales se pueden comparar con los resultados obtenidos en el presente proyecto durante la campaña durante la temporada seca-fría. En dicho periodo en la RESA las concentraciones en los hogares de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia fueron de 9.7 ± 3.0 , 5.5 ± 2.6 y $5.4 \pm 4.1 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Los valores de exposición a $PM_{2.5}$ determinados en ambientes intramuros en la RESA son menores que los reportados por ejemplo en Seúl, a pesar de haber sido obtenidos en un área industrial. Al considerar las directrices propuestas por la OMS, que establecen que la concentración anual de $PM_{2.5}$ no debería de superar los $10 \mu\text{g m}^{-3}$, es evidente que la población de Seúl ya está siendo afectadas de manera significativa por las actividades que realizan y el entorno en el que viven.

En particular en estudios de exposición, es relevante de contrastar esto en periodos de 24 horas, lo que incluye la exposición experimentada en ambientes exteriores e intramuros, como se realizó en el presente proyecto. En Hong Kong, Chen et al. (2019) estimaron la exposición personal a $PM_{2.5}$ en la ciudad, considerando un promedio de muestreo de aprox. 24 horas para conocer a que elementos estaban expuestos los adultos dentro de ella. Ellos obtuvieron un valor promedio de concentración personal de $33.4 \mu\text{g m}^{-3}$, con muestras enriquecidas principalmente de partículas de resuspensión como Ca ($1.6 \times 10^{-1} \mu\text{g m}^{-3}$) y Si ($2.6 \times 10^{-1} \mu\text{g m}^{-3}$). En segundo lugar, se identificaron Fe ($2.3 \times 10^{-1} \mu\text{g m}^{-3}$) y Cr ($4 \times 10^{-3} \mu\text{g m}^{-3}$), relacionados con el tráfico, lo que coincide con las tendencias de actividad diaria que afectan la población. En comparación, las ciudades de Apaxco, Atotonilco y Atitalaquia presentan concentraciones de Ca y Si de $1.9 \times 10^{-5} \mu\text{g m}^{-3}$ y de $5.7 \times 10^{-6} \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente, siendo menores al estudio en Hong Kong. Sin embargo, estas especies son también asociadas a la resuspensión de polvos fugitivos y a las grandes industrias que se encuentran alrededor de la zona como ya se describió anteriormente.

A la fecha, se han llevado a cabo pocos estudios de exposición personal en zonas industriales en México donde se caractericen las partículas, sin embargo, a partir de las concentraciones obtenidas por los sitios de monitoreo se pueden hacer algunas estimaciones. Por ejemplo, en el estudio realizado en la ciudad de Sonora por Becerra-Pérez y Ramos-Álvarez (2021), se obtuvieron las concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ de las estaciones de monitoreo de Culiacán, Mazatlán y los Mochis. Se reportó que la concentración anual promedio respectivamente de las tres ciudades fue de 13.3, 22.2 y

20.1 $\mu\text{g m}^{-3}$, mientras que para Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, las concentraciones rondan entre $11.7 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$, $8.2 \pm 3.9 \mu\text{g m}^{-3}$ y $10.8 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Considerando los valores reportados, el estado de Sonora enfrenta mayores problemas en los niveles de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en comparación con el estado de Hidalgo. Finalmente, Vega et al. en 2003, realizaron un estudio en la zona urbana de Salamanca, donde obtuvieron concentraciones promedio de $23.7 \pm 1.5 \mu\text{g m}^{-3}$. Esta concentración fue atribuida a la ubicación de la zona, y su cercanía a la refinería de la ciudad. En comparación con los datos obtenidos en este estudio, la exposición en la ciudad de Salamanca es mayor que en la RESA.

Capítulo 9

CONCLUSIONES

9. CONCLUSIONES

En el presente estudio se encontró que en las zonas industriales de las ciudades estudiadas existen concentraciones de $PM_{2.5}$ mayores que en las zonas urbanas, de hasta el 12 % para Apaxco, 44 % para Atitalaquia y del 70 % para Atotonilco (Apaxco: 22.1 ± 2.4 y $24.9 \pm 3.2 \mu\text{g m}^{-3}$; Atitalaquia: 17.7 ± 2.7 y $25.5 \pm 2.6 \mu\text{g m}^{-3}$; Atotonilco: 11.8 ± 2.6 y $20.1 \pm 2.0 \mu\text{g m}^{-3}$; zonas urbanas y zonas industriales, respectivamente). Esto principalmente es relacionado a las industrias que se encuentran en la periferia de las rutas estudiadas que cruzan por dichas zonas industriales.

En la temporada seca-fría, no se rebasó la NOM-025-SSA1-2021 ($10 \mu\text{g m}^{-3}$) en ninguna de las ciudades estudiadas, sin embargo, la ciudad de Apaxco se encuentra en el límite por rebasarla ($9.7 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$) por lo que ya podría existir una posible afectación a la salud. Es necesario realizar una campaña de medición de exposición a $PM_{2.5}$ en la temporada seca-caliente para tener igualdad de condiciones en los muestreos y poder realizar comparaciones entre ellos durante ambos periodos cuando se encuentran las mayores concentraciones ambientales de partículas suspendidas.

El calcio es la especie más abundante en la zona de la RESA durante los periodos estudiados, lo que se relaciona principalmente a la presencia de industrias cementeras, trituradoras y polvo fugitivo en el área. Otros elementos de abundancia son el azufre y el silicio, los cuales en la zona pueden deberse a las mismas fuentes de emisión que para el calcio.

Las altas concentraciones de calcio y silicio medidas en la región de estudio pueden representar un riesgo en el aumento de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, impactando de forma significativa la salud de los habitantes.

Las conclusiones formuladas con base en los resultados obtenidos durante la realización de la presente tesis, permiten establecer que la hipótesis formulada al inicio del proyecto fue comprobada.

REFERENCIAS

- A. A. Espinosa, J. Reyes-Herrera, J. Miranda, F. Mercado, M. A. Veytia, M. Cuautle & J. I. Cruz. (2012). Development of An X-Ray Fluorescence Spectrometer For Environmental science Applications. *Instrumentation Science & Technology*, 40:6, 603-6. <http://dx.doi.org/10.1080/10739149.2012.693560>
- Aeroqual. (s.f.). Portable particulate monitor - measure PM2.5/PM10. Aeroqual.com. Recuperado de: <https://www.aeroqual.com/s-series-portable-air-monitors/portable-particulate-monitor>.
- Aldape, F., Flores-Maldonado, J., Flores, J., Retama, A., Rivera, O. (2011). Elemental Composition and Source Identification of PM_{2.5} particles collected in downtown Mexico City. *International Journal of PIXE*. México. <http://dx.doi.org/10.1142/S012908350500060X>
- Alexandra Lai, Martha Lee, Ellison Carter, Queenie Chan, Paul Elliott, Majid Ezzati, Frank Kelly, Li Yan, Yangfeng Wu, Xudong Yang, Liancheng Zhao, Jill Baumgartner, and James J. Schauer. Chemical Investigation of Household Solid Fuel Use and Outdoor Air Pollution Contributions to Personal PM_{2.5}. *Exposures. Environmental Science & Technology* 2021 55 (23), 15969-15979. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01368>
- Álvarez-Orozco, S.E. (2017). TESIS DOCTORAL: Migración y desplazamiento forzado interno por desastres industriales a la luz de la seguridad humana: Corredor industrial Tula-Vito Apaxco. UAM, Unidad Cuajimalpa, División de Ciencias Sociales y Humanidades. Recuperado de: <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/handle/123456789/256>
- Alvarez-Tolentino, D., Suarez-Salas, L. (2020). Aporte cuantitativo de las fuentes de PM₁₀ y PM_{2.5} en sitios urbanos del valle del Mantaro, Perú. *Rev. Int. Contam. Ambient*, Vol.36, n.4. pp.875-892. Epub 13-Sep-2021. ISSN 0188-4999. <https://doi.org/10.20937/rica.53473>
- AmpTec. (2002). X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). Amptek Inc. Bedford, MA., U.S.A. Recuperado de: <https://www.amptek.com/resources/xrf>
- Amptek.com. (s/f). X-123SDD Complete X-Ray Spectrometer with Silicon Drift Detector (SDD). Amptek.com. Recuperado de: <https://www.amptek.com/internal-products/obsolete-products/sdd-x-ray-detectors-for-xrf/x-123sdd-complete-x-ray-spectrometer-with-silicon-drift-detector-sdd>
- Apte JS, Marshall JD, Cohen AJ, Brauer M (2015) Addressing global mortality from ambient PM_{2.5}. *Environmental Science & Technology*, 49(13), pp. 8057–8066. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01236>
- Arciniégas-Suárez, C.A. (2012). Diagnóstico y control de Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales y Fracción Respirable PM₁₀. *Revista Luna Azul*, (34), 195-213. Colombia. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321727348012.pdf>
- Argumedo, Carlos Doria, & Castillo, Juan Fagundo. (2016). Caracterización química de material particulado PM₁₀ en la atmósfera de La Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 19-29. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n2.56991>

Atkinson RW, Kang S, Anderson HR, Mills IC, Walton HA (2014) Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. *Thorax*, 69(7), pp. 660–665. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2013-204492>

Badillo-Castañeda, C. T. (2012). Caracterización del Contenido de Metales en Partículas PM_{2.5} en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. 114 pp. Recuperado de: <http://riacti.uanl.mx/110/1/1080224321.pdf>

Bai X, Liu Y, Wang S. (2018). Ultrafine particle libraries to explore mechanisms of PM_{2.5}-induced toxicity in human cells. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2018; 157: 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.095>

Barrera, V.; Contreras, C.; Mugica-Alvarez, V.; Galindo, G.; Flores, R.; Miranda, J. (2023). PM_{2.5} Characterization and Source Apportionment Using Positive Matrix Factorization at San Luis Potosi City, Mexico, during the Years 2017–2018. *Atmosphere* 2023, 14, 1160. <https://doi.org/10.3390/atmos14071160>

Becerra-Pérez, L.A., Ramos-Álvarez, R.A. (2021). Evaluación del Impacto en la Salud por Partículas PM_{2.5} en Sinaloa, México. *Revista Internacional de contaminación ambiental.* <https://doi.org/10.20937/rica.53463>

Blanco-Jiménez S., Altúzar F., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M.; Benítez M.A. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 34 pp. Recuperado de: http://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/Reporte_WG3_PM2.5_Monterrey.pdf

Blum MF, Surapaneni A, Stewart JD, Liao D, Yanosky JD, Whitsel EA, Grams ME (2020). Particulate matter and albuminuria, glomerular filtration rate, and incident CKD. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 15: 311–319. 10.2215/CJN.08350719. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32108020/>

Bo Y, Brook JR, Lin C. (2021). Reduced Ambient PM_{2.5} Was Associated with a Decreased Risk of Chronic Kidney Disease: A Longitudinal Cohort Study. *Environmental Science and Technology*. 2021;55:6876–6883. doi: 10.2215/CJN.08350719. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33904723/>

Bowe B, Xie Y, Li T. (2018). Particulate matter air pollution and the risk of incident CKD and progression to ESRD. *Journal of the American Society of Nephrology*. 2018;29:218–230. doi: 10.1681/ASN.2017030253. <https://doi.org/10.1681/asn.2017030253>

Bragg-Gresham J, Morgenstern H, McClellan W. (2018). County-level air quality and the prevalence of diagnosed chronic kidney disease in the US Medicare population. *PLoS ONE*. 2018;13:1–13. doi: 10.1371/journal.pone.0200612. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200612>

Brenner, I. (2017). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Applications. *Encyclopedia of Spectroscopy Applications*. Third Edition. 2017, 229-235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803224-4.00057-1>

Butler DA, Madhavan G. Communicating the health effects of indoor exposure to particulate matter. *Indoor Air*. 2017 May;27(3):503-505. doi: 10.1111/ina.12373. PMID: 28418616. <https://doi.org/10.1111/ina.12373>

Camacho-López, C., Marmolejo-Santillán, Y., Otazo-Sánchez, E., Romo-Gómez, C. (2019). Emisiones de GEI del corredor industrial Tula – Apaxco. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*. 7. 12-16. 10.29057/icbi.v7i13.3443. <http://dx.doi.org/10.29057/icbi.v7i13.3443>

Cakmak S; Dales RE; Vida CB (2009). Components of particulate air pollution and mortality in Chile. *Int J Occup Environ Health*, 15: 152-158. 191995. <https://doi.org/10.1179/oeh.2009.15.2.152>

Čargonja, M., Mekterović, D., Mance, D., Žauhar, G., Bogdanović Radović, I., & Zamboni, I. (2019). Characteristics of aerosol pollution in the vicinity of an oil refinery near Rijeka, Croatia. *X-Ray Spectrometry*, 48(5), 561–568. <https://doi.org/10.1002/xrs.3052>.

Carrasco-Gallegos, B. V. (2017). Respuestas Comunitarias ante Conflictos Territoriales. UAEM. México. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/314404738_Las_comunidades_locales_del_istmo_oaxaqueño_ante_el_megaproyecto_eólico

Castillo-Camacho, M.P., Tunarrosa-Grisales, I.C., Chacón-Rivera, Guevara-Luna, A., Belalcázar-Cerón, L.C. (2020). Exposición personal a PM 2.5 en el Sistema de Transporte Masivo de Bogotá y Medellín, Colombia. *Asiático J. Atmos. Medio ambiente* 14 , 210–224 (2020). <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.3.210>

Centro Mario Molina (CMM). (2020). Informe Parcial del Proyecto Caracterización Química de Partículas Suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey, Estado de Nuevo León. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente A.C. Recuperado de: http://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/Informe_Caracterización_Química_de_PM25_en_el_AMM.pdf

Chan TC, Zhang Z, Lin BC. (2018). Long-term exposure to ambient fine particulate matter and chronic kidney disease: A cohort study. *Environ Health Perspect* 126:.. 10.1289/EHP3304. <https://doi.org/10.1289/ehp3304>

Chavent M, Guegan H, Kuentz V, Patouille B, Saracco J (2009) PCA-and PMF-based methodology for air pollution sources identification and apportionment. *Environmetrics* 20(8):928–942. <http://dx.doi.org/10.1002/env.963>

Chen C, Xu D, He MZ. (2018). Fine particle constituents and mortality: a time-series study in Beijing, China. *Environmental science technology*. 2018;52(19):11378–11386. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00424>

Chen, X., Chow, J., Ward, T., Cao, J., Lee, S., Watson, J., Lau, N., Yim, S., Ho, K. (2019). Estimation of personal exposure to fine particles (PM_{2.5}) of ambient origin for healthy adults in Hong Kong. *Science of The Total Environment*. Volume 654, 2019. Pages 514-524. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.088>

Chung Y, Dominici F, Wang Y, Coull BA, Bell ML. (2015). Associations between long-term exposure to chemical constituents of fine particulate matter (PM_{2.5}) and mortality in Medicare enrollees in the eastern United States. *Environmental health perspectives*. 2015;123(5):467–474. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307549>

CORPONOR. (2021). *Formulación Proyecto-Characterización Química de Material Particulado. Plan de Calidad del Aire*. Colombia. Recuperado de: https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2022/05/Proyecto-caracterizacion_quimica-PM.pdf

Cortez-Lugo M, Ramírez-Aguilar M, Pérez-Padilla R, Sansores-Martínez R, Ramírez-Venegas A, Barraza-Villarreal A. (2015). Effect of Personal Exposure to PM_{2.5} on Respiratory Health in a Mexican Panel of Patients with COPD. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(9):10635-10647. <https://doi.org/10.3390/ijerph120910635>

Crouse DL, Philip S, Van Donkelaar A. (2016). A new method to jointly estimate the mortality risk of long-term exposure to fine particulate matter and its components. *Scientific reports*. 2016;6(1):1–10. <https://doi.org/10.1038/srep18916>

Dai L, Zanobetti A, Koutrakis P, Schwartz JD. (2014). Associations of fine particulate matter species with mortality in the United States: a multicity time-series analysis. *Environmental health perspectives*. 2014;122(8):837–842. Recuperado de: <https://doi.org/10.1289/ehp.1307568>

Deslattes, R. D., Kessler, E. G., Indelicato, P., de Billy, L., Lindroth, E., Anton, J. (2003). X-ray transition energies: new approach to a comprehensive evaluation. *Reviews of Modern Physics*, 75(1), 35–99. doi:10.1103/revmodphys.75.35

Echalar F., Artaxo P., Vanderlei Martins J., Yamasoe M. y Gerab F. (1998). Long-term monitoring of atmospheric aerosols in the Amazon Basin: Source identification and apportionment. *J. Geophys. Res.* 103 (D24),31849-31864. <https://doi.org/10.1029/98JD01749>

Environmental Protection Agency (EPA). (2009). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*. EPA/600/R-08/139F. Recuperado de: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=216546

Espinosa, A.; Reyes-Herrera, J.; Miranda, J.; Mercado, F; Veytia, M.; Cuautle, M.; Cruz, J. (2012). Development of an X-ray fluorescence spectrometer for environmental science applications. *Instrumentation Science & Technology*. 40. 10.1080/10739149.2012.693560. <http://dx.doi.org/10.1080/10739149.2012.693560>

Fedeli, R., Di Lella, L. A., & Loppi, S. (2024). Suitability of XRF for Routine Analysis of Multi-Elemental Composition: A Multi-Standard Verification. *Methods and Protocols*. 7(53). <https://doi.org/10.3390/mps7040053>

Franklin M, Koutrakis P, Schwartz J (2008) The role of particle composition on the association between PM_{2.5} and mortality. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 19(5), pp. 680–689. <https://doi.org/10.1097/ede.0b013e3181812bb7>

García, A., Santa-Helena, E., De Falco, A., Ribeiro, J., Gioda, A., Gioda, C. (2023). Efectos toxicológicos de las partículas finas (PM 2.5): riesgos para la salud y lesiones sistémicas

asociadas: revisión sistemática. Contaminación del agua, el aire y el suelo 234, 346. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06278-9>

Gent JF; Koutrakis P; Belanger K; Triche E; Holford TR; Bracken MB; Leaderer BP (2009). Symptoms and medication use in children with asthma and traffic-related sources of fine particle pollution. *Environ Health Perspect*, 117: 1168–1174. 180399. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800335>

Gibson, L. T., Worsfold, P. J., Townshend, A., & Poole, C. F. (2004). Archaeometry and antique analysis: (b) metallic and ceramic objects. In *Encyclopedia of Analytical Science* (pp. 117-123). Elsevier Limited. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00020-0>

Gilardoni S., Vignati E., Marmer E., Cavalli F., Belis C., Gianelle V., Loureiro A. y Artaxo P. (2011). Sources of carbonaceous aerosol in the Amazon Basin. *Atmos. Chem. Phys.* 11 (6), 2747-2764. <https://doi.org/10.5194/acp-11-2747-2011>

Grimm Aerosol. (s.f.). Portable Laser Aerosolspectrometer and Dust Monitor Model 1.108/1.109. GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG. Alemania. Recuperado de: https://cires1.colorado.edu/jimenez-group/Manuals/Grimm_OPC_Manual.pdf

Hagen, L.J., (1995). Wind Erosion Prediction System, U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Manhattan. KS. September. Recuperado de: <https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/symposium/proceedings/hagen.pdf>

Haq, G., Schwela, D. (2008). Air Quality Modelling. Stockholm Environment Institute. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/263970547_Air_Quality_Modelling

Hassanvand MS, Naddafi K, Faridi S. (2013). Indoor/outdoor relationships of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ mass concentrations and their water-soluble ions in a retirement home and a school dormitory. *Atmos Environ.* 2014;82:375–382. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.048. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.048>

Heo J, Antkiewicz DS, Shafer MM, Perkins DA, Sioutas C, Schauer JJ. (2015). Evaluation of the role of chemical components in cellular responses to atmospheric particulate matter (PM) by chemical fractionation of PM extracts. *Química bioanal anal.* 2015; 407 (20): 5953–5963. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8749-4>

Hernández-Paniagua, I.Y., Amador-Muñoz, O., Rosas-Pérez, I., Arrieta-García, O., González-Buendía, R.I., Andraca-Ayala, G.L., Jazcilevich, A. (2023). Reduced commuter exposure to PM_{2.5} and PAHs in response to improved emission standards in bus rapid transit systems in Mexico. *Environmental Pollution*. Volume 335, 15 October 2023, 122236. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122236>

Huang W, Cao J, Tao Y. (2012). Seasonal variation of chemical species associated with short-term mortality effects of PM_{2.5} in Xi'an, a central city in China. *American journal of epidemiology.* 2012;175(6):556–566. <https://doi.org/10.1093/aje/kwr342>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2019). Informe Nacional de Calidad del Aire 2018, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>

INECC-SEMARNAT. (2017). Estimación de impactos en salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de Gestión. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. Ciudad de México. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208105/INECC_CAME_Final_14022017.pdf

INECC-SEMARNAT. (2020). Calidad del Aire en la Cuenca Atmosférica de Tula. Comisión Ambiental de la Megalópolis. Hidalgo. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/571616/Calidad_del_Aire_Cuenca_Atm_de_Tula-FINAL.pdf

INECC. (2023). Caracterización y diagnóstico de la calidad del aire en la Cuenca Atmosférica de Tula y su relación con otros problemas ambientales en la zona. Comisión Ambiental de la Megalópolis. México. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/922358/04_2024_Informe_Final_-_Caracterizaci_n_Tula.pdf

INECC. (2024). Normas Oficiales Mexicanas (NOM) - Salud Ambiental. México. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/noms.php>

Instituto Nacional de Ecología (INE)- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones PM_{2.5}. ISBN: 978-607-8246-52-6. México. Recuperado de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>

IPCS (International Programme on Chemical Safety). (2004). IPCS Risk Assessment Terminology: Part 2: IPCS Glossary of Key Exposure Assessment Terminology (PDF). Geneva, Switzerland: World Health Organization. Recuperado de: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42908/9241562676.pdf?sequence=1>

Jacobson MZ. (2001). Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*. 2001;409:695–697. doi: 10.1038/35055518. <http://dx.doi.org/10.1038/35055518>

Kelly FJ, Fussell JC. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmos Environ*. 2012;60:504–526. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.06.039. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>

Kim, Y., Rudasingwa, G., Cho, S. -H., McWilliams, A., Kang, C. -M., Kim, S., & Kim, S. (2022). Comparison of the Concentrations of Heavy Metals in PM_{2.5} Analyzed in Three Different Global Research Institutions Using X-ray Fluorescence. *Applied Sciences*, 12(9), 4572. <https://doi.org/10.3390/app12094572>

Kioumourtzoglou MA, Schwartz JD, Weiskopf MG. (2016). Long-term PM_{2.5} exposure and neurological hospital admissions in the northeastern United States. *Environmental Health Perspectives*. 2016;124:23–29. doi: 10.1289/ehp.1408973. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408973>

Kotchenruther, R. A. (2016). Source apportionment of PM_{2.5} at multiple Northwest U.S. sites: Assessing regional winter wood smoke impacts from residential wood combustion. *Atmospheric Environment*, 142, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.048>

- Li, B., Ma, Y., Zhou, Y., Chai E. (2023). Research progress of different components of PM_{2.5} and ischemic stroke. *Sci Rep* 13, 15965. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43119-5>
- Lippmann M, Chen LC, Gordon T, Ito K, Thurston GD. (2013). National Particle Component Toxicity (NPACT) Initiative: integrated epidemiologic and toxicologic studies of the health effects of particulate matter components. *Research Report*. 2013(177):5–13. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24377209/>
- Soogil Lim, Jeonghoon Kim, Taehyun Kim, Kiyong Lee, Wonho Yang, Sangil Jun, Seungdo Yu. (2012). Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmospheric Environment*. Volume 47. 2012. Pages 407-412. ISSN 1352-2310. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.043>.
- Liu R, Young MT, Chen JC. (2016). Ambient air pollution exposures and risk of parkinson disease. *Environmental Health Perspectives*. 2016;124:1759–1765. doi: 10.1289/EHP135. <https://doi.org/10.1289/EHP135>
- Makonnen, Y., Beauchemin, D. (2014). An argon-nitrogen-hydrogen mixed-gas plasma as a robust ionization source for inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. Volume 99, 1 september 2014, pages 87-93. Canada. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2014.06.015>
- Mancilla, Y., Mendoza, A., Herckes, P.; Fraser, M. (2014). Source Apportionment of PM_{2.5} based on molecular organic marker in Monterrey, Mexico. En: A&WMA's 107th Annual Conference & Exhibition. 24-27 de Junio de 2014. California, Estados Unidos. Paper 33604. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/264310626_Source_apportionment_of_PM25_based_on_molecular_organic_markers_in_Monterrey_Mexico
- Manzanares, L. Echániz, G., López, M.A., Pérez, I.K.; Garibay, V. (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}. INE, México. 103 pp. Recuperado de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- Mar TF; Norris GA; Koenig JQ; Larson TV (2000). Associations between air pollution and mortality in Phoenix, 1995-1997. *Environ Health Perspect*, 108: 347-353. 001760. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108347>
- Maria, S. F., Russell, L. M., Turpin, B. J., Porcja, R. J. (2002). FTIR measurements of functional groups and organic mass in aerosol samples over the Caribbean. *Atmospheric Environment*, 36(33), 5185-5196. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00654-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00654-4)
- Martínez-Cinco, M., Santos-Guzmán, J., y Mejía-Velázquez, G. (2016). Distribución de las fuentes de PM 2.5 para apoyar las estrategias de control en el Área Metropolitana de Monterrey, México. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66 (6), 631–642. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1159259>
- Martínez-Morales S., Cerón-Bretón JG., Carbajal N., Cerón-Bretón RM., Lara-Severino R., Kahl JDW, Carrillo-Ávila JR., Carranco-Lozada SE., Espinosa-Guzmán A., Pech-Pech IE., Garcia-Martinez R., Robles-Heredia JC., Hernández-López G., Solís-Canul JA., Uc-Chi MP. (2023). PM_{2.5}-bound trace metals in an urban area of Northern Mexico during the COVID-

19 pandemic: characterization, sources, and health risk. *Air Qual Atmos Health*. 2023 May 18;1-20. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01372-7>

Masri, S.; Rea, J.; Wu, J. (2022). Use of Low-Cost Sensors to Characterize Occupational Exposure to PM_{2.5} Concentrations Inside an Industrial Facility in Santa Ana, CA: Results from a Worker- and Community-Led Pilot Study. *Atmosphere* 2022, 13, 722. <https://doi.org/10.3390/atmos13050722>

McCarron A, Semple S, Braban CF, Gillespie C, Swanson V, Price HD. (2023). Personal exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) and self-reported asthma-related health. *Soc Sci Med*. 2023 Nov;337:116293. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2023.116293>

Mehta AJ, Zanobetti A, Bind MAC. (2016). Long-term exposure to ambient fine particulate matter and renal function in older men: The veterans administration normative aging study. *Environmental Health Perspectives*. 2016;124:1353–1360. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510269>

Mejía-Ponce, L.V., Hernández-López, A.E., Reynoso-Cruces, S., Pineda, J.C., Mendoza-Flores, J.A., Miranda, J. (2018). Improvements to the X-ray Spectrometer at the Aerosol Laboratory, Instituto de Física, UNAM. *Journal of Nuclear Physics Material*. <http://dx.doi.org/10.15415/jnp.2018.61009>

Menéndez, M., Gil-Ibargutxi, J.I., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M. (2003). Análisis de contribución de fuentes en PM₁₀ y PM_{2.5} en un área de fondo urbano con influencia de emisiones industriales (Abanto, Vizcaya). Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dirección de Planificación, Evaluación y Control Ambiental. Recuperado de: https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/particulas_abanto/eu_doc/adjuntos/2003.pdf

Mohammed, E., Mohammed, T., Mohammed, A. (2018). Optimization of instrument conditions for the analysis for mercury, arsenic, antimony and selenium by atomic absorption spectroscopy. *Methods X*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2018.07.016>

Moorthy, B., Chu., Carlin, DJ. (2015). Polycyclic aromatic hydrocarbons: from metabolism to lung cancer. *Toxicol Sci*. 2015;145(1):5-15. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv040>

Morantes, G., González, JC., Rincón, G. (2021). Caracterización de material particulado e identificación de fuentes de emisión en la Gran Caracas, Venezuela. *Air Qual Atmos Health* 14 , 1989–2014. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01070-2>

Nash DG, Baer T, Johnston MV. (2006). Aerosol mass spectrometry: an introductory review. *Int J Mass Spectrom*. 2006;258:2–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2006.09.017>

Nayebare, S. R., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Carpenter, D. O., Hussain, M. M., Zeb, J., Aburizaiza, A. J., Khwaja, H. A. (2018). Ambient air quality in the HolyCity of Makkah: A source apportionment with elemental Enrichment Factors (EFs) and Factor Analysis (PMF). *Environmental Pollution*, 243, 1791–1801. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.086>

Niwa Y, Hiura Y, Murayama T, Yokode M, Iwai N. (2007). Nano-sized carbon black exposure exacerbates atherosclerosis in LDL-receptor knockout mice. *Circulation Journal*. 2007;71(7):1157–1161. <https://doi.org/10.1253/circj.71.1157>

NOM-025 (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micras (PM₁₀). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras (PM₁₀) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. *Diario Oficial de la Federación*. México. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2092912&fecha=26/09/2005#gsc.tab=0

NOM-025 (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de la Federación*. México. Recuperado de: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0

NOM-025 (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. *Diario Oficial de la Federación*. México. Recuperado de: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021&print=true

Ortiz-Espejel, B. (s.f.) Región Atitalaquia-Tula-Apaxco: Hacia un modelo de restauración ecológica. SEMARNAT. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/538909/22_TulaD.pdf

Ostro B, Roth L, Malig B, Marty M. (2009). The effects of fine particle components on respiratory hospital admissions in children. *Environmental health perspectives*. 2009;117(3):475–480. <https://doi.org/10.1289/ehp.11848>

Ostro B, Lipsett M, Reynolds P. (2010). Long-term exposure to constituents of fine particulate air pollution and mortality: results from the California Teachers Study. *Environmental health perspectives*. 2010;118(3):363–369. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901181>

Ostro B, Tobias A, Karanasiou A. (2015). The risks of acute exposure to black carbon in Southern Europe: results from the MED-PARTICLES project. *Occupational environmental medicine*. 2015;72(2):123–129. <https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102184>

Pan, S., Qiu, Y., Li, M., Yang, Z., Liang, D. (2022). Recent Developments in the Determination of PM_{2.5} Chemical Composition. *Bull Environ Contam Toxicol* 108, 819–823. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03510-w>

Peng RD, Bell ML, Geyh AS. (2009). Emergency admissions for cardiovascular and respiratory diseases and the chemical composition of fine particle air pollution. *Environmental health perspectives*. 2009;117(6):957–963. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800185>

Polo, G. (2019). Caracterización morfológica y química de PM2.5 en región tertrropical de Latinoamérica. Ecuador. Recuperado de: <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2019/caracterizacion-morfologica-quimica-pm25-en-region-continental-intertropical-latinoamerica>

Querol, X., Pey, J., Minguillón, M.C., Perez, N., Alastuey, A., Viana, M., Moreno, T., Bernabe, R.M., Blanco, S., Cardenas, B., Vega, E., Sosa-Iglesias, G., Ruiz, H., Artíñano, B. (2007). PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-8-111-2008>

Raaschou-Nielsen O, Beelen R, Wang M. (2016). Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer. *Environment international*. 2016;87:66–73. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800185>

Reddington C.L., Morgan W.T., Darbyshire E., Brito J., Coe H., Artaxo P., Marsham J. y Spracklen D. V. (2019). Biomass burning aerosol over the Amazon: analysis of aircraft, surface and satellite observations using a global aerosol model. *Atmos. Chem. Phys.* 19 (14), 9125-9152. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9125-2019>

Riediker M; Cascio WE; Griggs TR; Herbst MC; Bromberg PA; Neas L; Williams RW; Devlin RB (2004). Particulate matter exposure in cars is associated with cardiovascular effects in healthy young men. *Am J Respir Crit Care Med*, 169: 934-940. 056992. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14962820/>

Rubio-Gómez, Y.M. (2023). TESIS DE MAESTRÍA: Determinación de Fuentes de Emisión de Partículas Finas en la Zona Industrial de Tula, Hidalgo. UNAM. CDMX. <https://doi.org/10.1164/rccm.200310-1463oc>

Secretaría de Economía. (2021). Sabes cómo te benefician las Normas Oficiales Mexicanas. Acciones y Programas. México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/sabes-como-te-benefician-las-normas-oficiales-mexicanas?state=published#:~:text=Las%20Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20establecen,personas%20facultadas%20que%20lo%20har%C3%A1n>

Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2020). Situación de la Contaminación Atmosférica en el Municipio de Apaxco, Estado de México. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica. Departamento de Monitorio Atmosférico. Recuperado de: https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/IPOMEX/Ejercicio2020/Articulo_92/17/UIPPE/SOL.%2000260%20ANEXO.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES. SEMARNAT. México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2023). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. Recuperado de:

<http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2020/inventario-emisiones-cdmx-2020.pdf>.

Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2010). Elementos Técnicos del Plan Decenal de Descontaminación de Bogotá. Secretaría Distrital de Ambiente. Primera Edición. Colombia. Recuperado de: http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Plan_Decenal_Descontaminacion_Bogota.pdf

Seidel, P., Ebert, D., Schinke, R., Möckel, R., Raatz, S., Chao, M., Niederschlag, E., Kreschel, T., Gloaguen, R. y Renno, AD. (2021). Comparación de técnicas de análisis elemental para la caracterización de aleaciones comerciales. *Metales*, 11 (5), 736. <https://doi.org/10.3390/met11050736>

Shaka', H., Saliba, N.A. (2004). Concentration measurements and chemical composition of PM_{10-2.5} and PM_{2.5} at a coastal site in Beirut, Lebanon. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp. 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.009>

Shi, Y., Ji, Y., Sun, H., Hui, F., Hu, J., Wu, Y., Lanza, M. (2015). Nanoscale characterization of PM_{2.5} airborne pollutants reveals high adhesiveness and aggregation capability of soot particles. *Scientific reports*, 5, 11232. <http://dx.doi.org/10.1038/srep11232>

Shimazu, R., Yamoto, Y., Kosaka, T., Kawasaki, H., Arakawa, R. (2015). Application of Tapping-Mode Scanning Probe Electro spray Ionization to Mass Spectrometry Imaging of Additives in Polymer Films. *Mass Spectrometry*. <https://doi.org/10.5702/massspectrometry.S0050>

Simon, Andrew H. (2012). Sputter Processing. Handbook of thin film deposition. Third Edition. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/book/9781437778731/handbook-of-thin-film-deposition>

Sistema Nacional de Información De La Calidad Del Aire (SINAICA). (s.f.) Normas Oficiales Mexicanas (NOM)-Salud Ambiental. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/noms.php#:~:text=As%C3%AD%2C%20dichas%20normas%20definen%20las,un%20riesgo%20para%20la%20poblaci%C3%B3n>.

Sosa-Echeverría, R., Vega, E., Wellens, A., Jaimes, M., Fuentes García, G., H., E., Alarcón, A. B., M., Alvarez, P., A., S., D., E.. (2020). Reduction of atmospheric emissions due to switching from fuel oil to natural gas at a power plant in a critical area in Central Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*. <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2020.1808113>

Sun S, Qiu H, Ho K-F, Tian L. (2016). Chemical components of respirable particulate matter associated with emergency hospital admissions for type 2 diabetes mellitus in Hong Kong. *Environment international*. 2016;97:93–99. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.022>

Taghvaei, S., Sowlat, M. H., Mousavi, A., Hassanvand, M. S., Yunesian, M., Naddafi, K., Sioutas, C. (2018). Source apportionment of ambient PM_{2.5} in two locations in Central Tehran using the Positive Matrix Factorization (PMF) model. *Science of the Total Environment*, 628–629, 672–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.096>

Taiwo, A. M., Harrison, R. M., & Shi, Z. (2021). A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter. *Atmospheric Environment*, 244, 117877. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117877>

Tamayo-Ortiz, M.; Téllez-Rojo, MM; Rothenberg, SJ; Gutiérrez-Avila, I.; Just, AC; Kloog, I.; Texcalac-Sangrador, JL; Romero-Martinez, M.; Bautista-Arredondo, LF; Schwartz, J. (2021). Exposure to PM_{2.5} and Obesity Prevalence in the Greater Mexico City Area. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18 , 2301. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052301>

ThermoFisherScientific. (s.f.). Personal DataRAM™ pDR-1500 aerosol monitor. Recuperado de: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/PDR1500>

Thurston GD, Burnett RT, Turner MC. (2016). Ischemic heart disease mortality and long-term exposure to source-related components of US fine particle air pollution. *Environmental health perspectives*. 2016;124(6):785–794. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1509777>

Tovalin-Ahumada, H., Whitehead, L., Blanco, S. (2007). Personal exposure to PM_{2.5} and element composition- A comparison between outdoor and indoor workers from two Mexican cities. *Mexico. Atmospheric Environment*. Volume 41, Issue 25. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.059>

Utami Rauf, A., Mallongi, A., Daud, A., Hatta, M., AL-Madhoun, W., Amiruddin, R., Abdul Rahman, S., Wahyu, A., Puji Astuti, R. (2021). Community Health Risk Assessment of Total Suspended Particulates near a Cement Plant in Maros Regency, Indonesia. *Journal of Health and Pollution*. Volume 11, Issue 30, CID: 210616. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-11.30.210616>

Vargas, J. T.; Vilella, M. (2013), Del bordo poniente a CEMEX: el apoyo del MDL a la incineración de residuos en cementeras. Barcelona: GAIA. Recuperado de: https://www.yumpu.com/es/document/read/33265492/desde-el-bordo-poniente-a-cemex-gaia#google_vignette

Vega, E., López-Veneroni, D., Ramírez, O., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2021). Particle-bound PAHs and chemical composition, sources and health risk of PM_{2.5} in a highly industrialized area. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(10), 210047. <https://doi.org/10.4209/AAQR.210047>

Vega, E., Ruiz, H., Martínez-Villa-G. D., Sosa-Iglesias, G., González-Ávalos, E., Reyes, E., García-Yee, J.S. (2021). Fine and Coarse Particulate Matter Chemical Characterization in a Heavily Industrialized City in Central Mexico during Winter 2003. *Jornal of the Air & Waste Management Association*. <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.57.5.620>

Verma, H. R. (2007). Atomic and nuclear analytical methods: XRF, Mössbauer, XPS, NAA and ion-beam spectroscopic techniques. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30279-7>

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., Hitztenberger R. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *J. Aerosol Sci.* 39 (10), 827-849. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>

Wang Y, Shi L, Lee M. (2017). Long-term exposure to PM_{2.5} and mortality among older adults in the southeastern US. *Epidemiology*. 2017;28(2):207. <https://doi.org/10.1097/ede.0000000000000614>

Wang Y, Shi Z, Shen F, Sun J, Huang L, Zhang H, Hu J (2019) Associations of daily mortality with short-term exposure to PM_{2.5} and its constituents in Shanghai, China. *Chemosphere*, 233, 879-887. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.249>

Wang Q, Liu S. (2023). The Effects and Pathogenesis of PM_{2.5} and Its Components on Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2023 Apr 6;18:493-506. doi: 10.2147/COPD.S402122. PMID: 37056681; PMCID: PMC10086390. <https://doi.org/10.2147/COPD.S402122>

Wang, Y., Xiao, S., Zhang, Y., Chang, H., Martin, R., Van Donkelaar, A., Gaskins, A., Liu, Y., Liu, P., Shi, L. (2022). Long-term exposure to PM_{2.5} major components and mortality in the southeastern United States. *Environment International*. Volume 158, 2022, 106969, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106969>

Warra, A.A., Jimoh, W.L.O. (2011). Overview of an Inductively Coupled Plasma (ICP) System. *International Journal of Chemical Research* ISSN: 0975-3699 & E-ISSN: 0975-9131, Vol. 3, Issue 2, 2011, pp-41-48. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/215604842_OVERVIEW_OF_AN_INDUCTIVELY_COUPLED_PLASMA_ICP_SYSTEM

WHO (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment, s.l.: s.n.

WHO. (2013). Health Effects of Particulate Matter. Europa. ISBN 978 92 890 0001 7. Recuperado de: <https://unece.org/DAM/env/documents/2013/air/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf>

Wilberforce, O. J. (2016). Review of principles and application of AAS, PIXE, and XRF and their usefulness in environmental analysis of heavy metals. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 9(6), 15-17. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/vol9-issue6/Version-2/D0906021517.pdf>

Wilschefski, SC., Baxter, MR. (2019). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *Clin Biochem Rev*. 2019 Aug;40(3):115-133. doi: 10.33176/AACB-19-00024. PMID: 31530963; PMCID: PMC6719745. <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024>

Yoo S-E, Park J-S, Lee SH. (2019). Comparison of short-term associations between PM_{2.5} components and mortality across six major cities in South Korea. *International journal of environmental research public health*. 2019;16(16):2872. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162872>

Younan D, Petkus AJ, Widaman KF. (2020). Particulate matter and episodic memory decline mediated by early neuroanatomic biomarkers of Alzheimer's disease. *Brain*. 2020;143:289-302. doi: 10.1093/brain/awz348. <https://doi.org/10.1093/brain/awz348>

Yue, W., Li, X., Liu, J., Li, Y., Yu, X., Deng, B., Hua, W. (2006). Characterization of PM_{2.5} in the ambient air of Shanghai city by analyzing individual particles. *Science of the Total Environment*, 368(2-3), 916-925. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.03.043>

Zhang X, Hecobian A, Zheng M, Frank NH, Weber RJ. (2010). Biomass burning impact on PM_{2.5} over the southeastern US during 2007: integrating chemically speciated FRM filter measurements, MODIS fire counts and PMF analysis. *Atmos Chem Phys*. 2010;10:6839–6853. doi: 10.5194/acp-10-6839-2010. <http://dx.doi.org/10.5194/acpd-10-7037-2010>

ANEXO A: Memoria de cálculo para realizar gráficos de cajas y bigotes

Para la realización de los gráficos de caja y bigotes presentados en la sección de resultados, se utilizó el programa R Studio, debido a la cantidad de datos contenidos en la base de datos.

Para ello se utilizó el código siguiente:

```
> install.packages("openxlsx")
> install.packages("ggplot2")
> install.packages("dplyr")
> library(dplyr)
> library(openxlsx)
> library(ggplot2)
> library(readxl)
> setwd(dir = "C:/Users/elisa/Downloads")
```

Con esto se instalan los paquetes y se abren las librerías donde se encuentra la base datos. Para realizar los gráficos se usa el siguiente comando:

Zonas

```
> ggplot(data = base_dividida_cleaned, mapping = aes(y = pm25, x = city, fill = route)) +
+   geom_boxplot(
+     outlier.colour = "red",      # Color de los valores atípicos
+     outlier.shape = 16,        # Forma de los valores atípicos
+     outlier.size = 2,          # Tamaño de los valores atípicos
+     alpha = 0.7,               # Transparencia
+     na.rm = TRUE,              # Eliminar NAs
+     width = 0.8                # Ancho de las cajas
+   ) +
+   stat_summary(
+     fun = function(x) exp(mean(log(x))), # Promedio geométrico
+     geom = "point",              # Añadir punto para la media geométrica
+     shape = 16,                  # Forma del punto
+     size = 4,                    # Tamaño del punto
+     color = "#003366",          # Color del punto
+     position = position_dodge(width = 0.8) # Desplazamiento para evitar superposiciones
+   ) +
+   labs(
+     x = "Ciudad",
+     y = "Concentración de PM2.5 (µg/m³)"
+   ) +
+   theme_minimal(base_size = 15) +
+   theme(
+     axis.text.x = element_text(face = "italic", colour = "blue", size = rel(1.2)),
+     plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 22, face = "bold", color = "#333333"),
+     axis.title = element_text(size = 30, face = "bold", color = "#333333"),
+     axis.text = element_text(size = 25, color = "#333333"),
+     panel.grid.major = element_line(color = "lightgrey", size = 0.5),
+     panel.grid.minor = element_blank(),
```

```

+   plot.margin = margin(15, 15, 15, 15),
+   legend.text = element_text(size = 30, color = "#333333"),
+   legend.title = element_text(size = 30, face = "bold", color = "#333333"),
+   legend.key.size = unit(2, "cm") # Tamaño de las cajas de la leyenda
+ ) +
+ coord_cartesian(ylim = c(0, 80)) + # Limitar el eje y si es necesario
+ scale_fill_manual(
+   values = c("r1" = "#FF9999", "r2" = "#99FF99", "r3" = "#9999FF"),
+   labels = c("r1" = "Zona Urbana", "r2" = "Zona Industrial"),
+   name = "Zona"
+ )

```

Ciudades

```

> ggplot(basecompleta, aes(x = city, y = pm25)) +
+   geom_boxplot(
+     fill = "#ffe082", # Amarillo más intenso
+     color = "#ff5733", # Rojo anaranjado para el borde
+     outlier.color = "#c70039", # Rojo para los outliers
+     outlier.size = 2,
+     width = 0.6 # Ajustar el ancho de las cajas
+   ) +
+   labs(
+     title = "Concentración de PM2.5 por Ciudad",
+     x = "Ciudad",
+     y = "Concentración de PM2.5 (µg/m³)"
+   ) +
+   theme_minimal(base_size = 15) +
+   theme(
+     plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 22, face = "bold", color = "#333333"),
+     axis.title = element_text(size = 16, face = "bold", color = "#333333"),
+     axis.text = element_text(size = 14, color = "#333333"),
+     panel.grid.major = element_line(color = "lightgrey", size = 0.5),
+     panel.grid.minor = element_blank(),
+     plot.margin = margin(15, 15, 15, 15)
+   ))

```

Campaña

```

> ggplot(basecompleta, aes(x = campaign, y = pm25)) +
+   geom_boxplot(
+     fill = "#ffe082", # Amarillo más intenso
+     color = "#ff5733", # Rojo anaranjado para el borde
+     outlier.color = "#c70039", # Rojo para los outliers
+     outlier.size = 2,
+     width = 0.6 # Ajustar el ancho de las cajas
+   ) +
+   labs(
+     title = "Concentración de PM2.5 por Temporada",
+     x = "Temporada",

```

```
+   y = "Concentración de PM2.5 (µg/m³)"
+ ) +
+ theme_minimal(base_size = 15) +
+ theme(
+   plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 22, face = "bold", color = "#333333"),
+   axis.title = element_text(size = 16, face = "bold", color = "#333333"),
+   axis.text = element_text(size = 14, color = "#333333"),
+   panel.grid.major = element_line(color = "lightgrey", size = 0.5),
+   panel.grid.minor = element_blank(),
+   plot.margin = margin(15, 15, 15, 15)
+ ))
```

ANEXO B: Memoria de cálculo para calcular promedios geométricos

Datos estadísticos

Los niveles de partículas finas pueden oscilar desde unos pocos microgramos por metro cúbico hasta cientos en tan solo un segundo, el promedio geométrico representa de manera más precisa las variaciones en los datos en comparación con el promedio aritmético. Además, los datos no presentan una distribución normal, es por eso que se decidió utilizar promedios geométricos.

Promedios por rutas (r1: Zona Urbana, r2: Zona Industrial)

```
> resultados_route_1 <- base_dividida_cleaned %>%
+   group_by(city, route) %>%
+   summarise(
+     promedio_geom = exp(mean(log(pm25), na.rm = TRUE)),
+     .groups = "drop"
+   )
> print(resultados_route) # Verifica los resultados
# A tibble: 6 × 4
```

Tabla B1 (11). Promedios geométricos y su desviación estándar en $\mu\text{g m}^{-3}$ de las rutas estudiadas en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, obtenidos con el software R.

	city	route	promedio_geom	desviacion_geom
	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>
1	Apaxco	r1	22.1	2.38
2	Apaxco	r2	24.9	3.16
3	Atitalaquia	r1	25.5	2.63
4	Atitalaquia	r2	17.7	2.65
5	Atotonilco	r1	11.8	2.60
6	Atotonilco	r2	20.1	2.02

Promedios por ciudad

```
> # Primero definimos las funciones para calcular la media geométrica y la desviación
estándar geométrica
> geometric_mean <- function(x) {
+   exp(mean(log(x[x > 0]), na.rm = TRUE))
+ }
> geometric_sd <- function(x) {
+   exp(sd(log(x[x > 0]), na.rm = TRUE))
+ }
> # Luego, aplicamos estas funciones a los datos
> resultados_city <- basecompleta_filtrada %>%
```

```

+ group_by(city) %>% # Agrupamos por ciudad
+ summarise(
+   promedio_geom = geometric_mean(pm25), # Calculamos la media geométrica de
PM2.5
+   desviacion_geom = geometric_sd(pm25), # Calculamos la desviación estándar
geométrica de PM2.5
+   .groups = "drop" # Eliminamos la agrupación para el resultado final
+ )
> # Mostramos los resultados
> print(resultados_city)
# A tibble: 3 × 3

```

Tabla B2 (12). Promedios geométricos y su desviación estándar en $\mu\text{g m}^{-3}$ en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, obtenidos en RStudio.

	city <chr>	promedio_geom <dbl>	desviacion_geom <dbl>
1	Apaxco	11.7	3.16
2	Atitalaquia	8.20	3.92
3	Atotonilco	10.8	2.99

Obtenida con el software R.

Promedios por campaña (1: Seca-Caliente, 2: Seca-Fría)

```

> resultados_campaign <- basecompleta_filtrada %>%
+ group_by(campaign) %>% # Agrupamos por ciudad
+ summarise(
+   promedio_geom = geometric_mean(pm25), # Calculamos la media geométrica de
PM2.5
+   desviacion_geom = geometric_sd(pm25), # Calculamos la desviación estándar
geométrica de PM2.5
+   .groups = "drop" # Eliminamos la agrupación para el resultado final
+ )
> # Mostramos los resultados
> print(resultados_campaign)
# A tibble: 2 × 3

```

Tabla B3 (13). Promedios geométricos y su desviación estándar en $\mu\text{g m}^{-3}$ de las campañas realizadas en la RESA, obtenidos en R.

	campaign <chr>	promedio_geom <dbl>	desviacion_geom <dbl>
1	1	20.6	2.53
2	2	7.47	3.20

Promedios por rutas y por campañas

```

> # Primero definimos las funciones para calcular la media geométrica y la desviación
estándar geométrica
> geometric_mean <- function(x) {
+   exp(mean(log(x[x > 0])), na.rm = TRUE)
+ }

```

```

> geometric_sd <- function(x) {
+   exp(sd(log(x[x > 0])), na.rm = TRUE))
+ }
> # Luego, agrupamos por ciudad y campaña, y aplicamos las funciones
> resultados_city_campaign <- basecompleta_filtrada %>%
+   group_by(city, campaign) %>% # Agrupamos por ciudad y campaña
+   summarise(
+     promedio_geom = geometric_mean(pm25), # Calculamos la media geométrica de
PM2.5
+     desviacion_geom = geometric_sd(pm25), # Calculamos la desviación estándar
geométrica de PM2.5
+     .groups = "drop" # Eliminamos la agrupación para el resultado final
+   )
> # Mostramos los resultados
> print(resultados_city_campaign)
# A tibble: 6 × 4

```

Tabla B4 (14). Promedios geométricos y su desviación estándar en $\mu\text{g m}^{-3}$ de las campañas realizadas en la RESA en las ciudades de Apaxco, Atitalaquia y Atotonilco, obtenidos en R.

	city <chr>	campaign <chr>	promedio_geom <dbl>	desviacion_geom <dbl>
1	Apaxco	1	22.5	2.86
2	Apaxco	2	9.70	3.04
3	Atitalaquia	1	14.1	3.00
4	Atitalaquia	2	5.36	4.06
5	Atotonilco	1	24.6	1.81
6	Atotonilco	2	5.53	2.57

ANEXO C: Memoria de cálculo para realizar cálculo de masa total

Primero se divide la base de datos en cada una de las rutas utilizadas:

```
>basecompleta_r1 <- basecompleta %>% filter(route == "r1")
```

```
>basecompleta_r2 <- basecompleta %>% filter(route == "r2")
```

Después es necesario realizar la suma de concentraciones por día de muestreo para cada una de las rutas. Por lo que se utiliza el siguiente código:

```
>library(dplyr)
```

```
>masa_por_dia_r1 <- basecompleta_r1 %>%
```

```
  group_by(date) %>%
```

```
  summarise(pm25 = sum(pm25, na.rm = TRUE))
```

```
>write_xlsx(masa_por_dia_r1, "masa_por_dia_r1.xlsx")
```

Con esto se obtiene un Excel que contiene la suma de concentraciones de cada uno de los días de muestreo, después es necesario realizar la corrección de los equipos utilizados con la ecuación presentada en los gráficos de la Fig. 13.

Para el instrumento A: $y = -1.87 + 2.09x$

Para el instrumento B: $y = 0.0239 + 1.87x$

Tabla C1 (15). Masa total corregida en μg de los días de muestreo realizados en la RESA.

Ruta 1: Zona Urbana			Ruta 2: Zona Industrial		
Instrumento B			Instrumento A		
fecha	masa	masa corregida	fecha	masa	masa corregida
31/05/2023	17.635	9.407	30/05/2023	12.547	7.873
01/06/2023	22.416	11.963	31/05/2023	15.084	9.087
02/06/2023	18.885	10.075	01/06/2023	15.121	9.105
12/06/2023	1.517	0.787	02/06/2023	15.076	9.083
13/06/2023	19.771	10.549	12/06/2023	1.921	2.789
14/06/2023	55.969	29.906	13/06/2023	29.895	16.174
15/06/2023	4.531	2.399	14/06/2023	38.324	20.207
16/06/2023	26.552	14.175	15/06/2023	15.612	9.340
13/11/2023	14.544	7.754	16/06/2023	18.605	10.772
14/11/2023	7.767	4.130	13/11/2023	12.770	7.980
15/11/2023	15.674	8.358	14/11/2023	11.480	7.363
16/11/2023	0.125	0.043	15/11/2023	22.854	12.805
04/12/2023	23.133	12.346	16/11/2023	9.152	6.249
05/12/2023	26.063	13.913	04/12/2023	25.671	14.153
06/12/2023	5.229	2.772	05/12/2023	33.576	17.935
07/12/2023	22.900	12.222	06/12/2023	16.196	9.619
			07/12/2023	34.695	18.471

A partir de estos datos se realiza un promedio por zona y ciudad para obtener los gráficos de pastel, utilizando los datos analizados por el XRF del Instituto de Física. Se muestra a continuación la masa de cada especie medida en las dos campañas de muestreo.

Tabla C2 (16). Masa de cada especie medida en el análisis de XRF en µg de la primera campaña.

	Primera campaña									
Concentraciones (µg)	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe
Fe										43.220
Fe										42.578
PR1 0.61	0.838	1.465	0.138	1.651	0.555	1.106	13.592	0.000	0.188	1.035
PR2 0.62	0.637	1.066	0.000	1.961	2.523	1.461	1.683	0.000	0.253	0.664
PR2 0.416	1.106	2.294	0.000	1.473	1.040	0.278	5.887	0.000	0.206	0.534
PR1 0.417	1.241	2.122	0.120	2.974	1.556	0.733	8.528	0.023	0.197	1.169
PR1 Ati jun 18	1.375	2.714	0.198	3.965	0.882	0.787	4.065	0.000	0.169	0.954
PR2 Ati jun 19	2.079	2.779	0.123	3.729	1.259	0.793	4.528	0.000	0.160	0.845

Tabla C3 (17). Masa de cada especie medida en el análisis de XRF en µg de la segunda campaña.

	Segunda Campaña							
Concentraciones (µg)	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	
131123 pDR3 0.4	0.469	0.776	0.037	0.540	0.118	0.622	0.305	
131123 pDR2 0.4	0.503	1.163	0.052	0.524	0.225	1.032	0.359	
141123 pDR2 0.6	0.469	1.023	0.041	0.585	0.621	1.732	0.408	
141123 pDR3 0.6	0.671	0.679	0.037	0.720	0.426	1.261	0.301	
151123 pDR2 0.4	1.039	1.885	0.007	3.246	0.485	2.211	0.525	
151123 pDR3 0.4	0.805	1.820	0.067	2.051	0.651	2.239	0.518	
161123 pDR2 0.6	0.536	1.368	0.108	2.164	0.426	1.429	0.538	
161123 pDR3 0.6	1.173	1.605	0.041	1.993	0.000	1.425	0.427	
041223 pDR2 0.4	1.173	1.109	0.131	3.046	0.485	2.571	0.440	
051223 pDR2 0.4	0.671	1.131	0.019	2.189	0.414	1.674	0.427	
051223 pDR3 0.4	1.207	1.433	0.131	1.521	0.272	7.701	0.508	
061223 pDR2 0.4	0.838	1.131	0.000	1.219	0.739	1.887	0.350	
061223 pDR3 0.4	0.671	0.646	0.015	0.479	0.420	0.364	0.435	
071223 pDR2 0.6	0.771	0.786	0.011	1.125	0.355	0.962	0.397	
141123pDR3 0.6	1.106	0.679	0.097	0.445	0.000	0.348	0.241	
071223 pDR 3 0.6	0.402	0.829	0.060	1.113	0.420	3.271	0.416	

Con estos datos se realizaron los gráficos presentados en la sección 8.2.2, 8.2.3 y 8.2.4.