



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

**IDENTIFICACIÓN DE FUENTES CONTAMINANTES QUE GENERAN PM2.5 EN  
EL DISTRITO DE JESÚS MARÍA, 2023**

**Línea de investigación:  
Ecotoxicología y química ambiental**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciada en Química

**Autor**

Zafra Saavedra, Rafael

**Asesor**

Lezama Vigo, Helmer Heli

ORCID: 0000-0003-0663-4752

**Jurado**

Salvador Salazar, Martha

Chavez Ayala, Andres

Castañeda Pérez, Luz

**Lima - Perú**

**2026**

RECONOCIMIENTO - NO COMERCIAL - SIN OBRA DERIVADA  
(CC BY-NC-ND)



# IDENTIFICACIÓN DE FUENTES CONTAMINANTES QUE GENERAN PM2.5 EN EL DISTRITO DE JESÚS 2023

## INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUD

## FUENTES PRIMARIAS

1 [www.scielo.org.pe](http://www.scielo.org.pe)

Fuente de Internet

2 [repositorio.unsaac.edu.pe](http://repositorio.unsaac.edu.pe)

Fuente de Internet

3 [hdl.handle.net](http://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

4 [www.coursehero.com](http://www.coursehero.com)

Fuente de Internet

5 [repositorio.unfv.edu.pe](http://repositorio.unfv.edu.pe)

Fuente de Internet

6 [buleria.unileon.es](http://buleria.unileon.es)

Fuente de Internet

7 [cdn.www.gob.pe](http://cdn.www.gob.pe)

Fuente de Internet

8 [repositorio.upt.edu.pe](http://repositorio.upt.edu.pe)

Fuente de Internet

9 [patents.google.com](http://patents.google.com)

Fuente de Internet

10 [tarindustrial.etsii.upm.es](http://tarindustrial.etsii.upm.es)

Fuente de Internet

11 [es.scribd.com](http://es.scribd.com)

Fuente de Internet

12 Chauca Iparraguirre, George Edward. "El aleph volcanico de la costa sur del Peru: Estudio de la obsidiana preceramica de la boca del rio Ica", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

13 Francisco Javier Escobar Bedia. "Catalizadores metálicos subnanométricos altamente eficientes en reacciones de formación de enlaces C-C", Universitat Politecnica de Valen 2021

Publicación



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

IDENTIFICACIÓN DE FUENTES CONTAMINANTES QUE GENERAN PM2.5 EN EL  
DISTRITO DE JESÚS MARÍA, 2023

**Línea de investigación**  
**Ecotoxicología y química ambiental**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Química

**Autor:**

Zafra Saavedra, Rafael

**Asesor:**

Lezama Vigo, Helmer Heli

ORCID: 0000-0003-0663-4752

**Jurado:**

Salvador Salazar, Martha

Chavez Ayala, Andres

Castañeda Pérez, Luz

**Lima – Perú**

**2026**

## **Agradecimiento**

Expreso mi sincero agradecimiento a mi directora de tesis, MSc. Patricia Bedregal Salas, por su constante respaldo, orientación académica y paciencia a lo largo del desarrollo de la presente investigación. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para la consolidación de este trabajo.

Asimismo, agradezco a mi asesor de tesis, Dr. Lezama Vigo, Helmer por su acompañamiento académico, disposición permanente y valiosos aportes durante la etapa final de este estudio, los cuales permitieron su culminación satisfactoria. De igual manera, deseo reconocer y agradecer al Dr. Mario Mallaupoma Gutiérrez por haber sido un mentor clave durante mi formación universitaria y por brindarme su invaluable guía durante mi estadía en el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), contribuyendo significativamente a mi desarrollo académico y profesional.

Agradezco también al equipo del Laboratorio de Técnicas Analíticas del IPEN, en especial a Marco Ubillus, cuya colaboración y apoyo técnico fueron esenciales para el desarrollo experimental de la presente investigación.

Finalmente, expreso mi agradecimiento al PROCENCIA por financiar mi estancia en el IPEN, lo cual fue fundamental para la ejecución de este proyecto. Asimismo, agradezco a José Inoue y Kevin Gómez del SENAMHI por su valiosa participación y apoyo durante la realización del muestreo.

## Índice

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| Resumen.....                                            | viii |
| Abstract.....                                           | ix   |
| I. Introducción.....                                    | 1    |
| 1.1 Descripción y formulación del problema.....         | 2    |
| 1.2. Antecedentes .....                                 | 3    |
| 1.3. Objetivos.....                                     | 11   |
| 1.4. Justificación .....                                | 12   |
| 1.5. Hipótesis .....                                    | 13   |
| II. Marco Teórico .....                                 | 14   |
| 2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación ..... | 14   |
| III. Método.....                                        | 35   |
| 3.1 Tipo de investigación.....                          | 35   |
| 3.2 Ámbito temporal y espacial .....                    | 35   |
| 3.3 Variables .....                                     | 36   |
| 3.4 Población y muestra.....                            | 36   |
| 3.5 Instrumentos.....                                   | 36   |
| 3.6 Procedimiento .....                                 | 37   |
| 3.7 Análisis de datos .....                             | 57   |
| 3.8 Consideraciones Éticas .....                        | 57   |
| IV. Resultados .....                                    | 59   |
| V. Discusión de Resultados.....                         | 74   |
| VI. Conclusiones.....                                   | 78   |
| VII. Recomendaciones.....                               | 80   |
| VIII. Referencias .....                                 | 82   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Tamaño relativo del PM 2.5 y PM 10                                                                 | 14 |
| <b>Figura 2.</b> Emisiones producidas por vehículos automotores                                                     | 17 |
| <b>Figura 3.</b> Vías primarias de señalización de PM y eventos cardiovasculares.                                   | 19 |
| <b>Figura 4.</b> Equipo muestreador de alto volumen                                                                 | 21 |
| <b>Figura 5.</b> Representación gráfica del análisis de activación neutrónica de rayos gamma.                       | 23 |
| <b>Figura 6.</b> Esquema del funcionamiento del FRXED                                                               | 26 |
| <b>Figura 7.</b> Instrumento de Absorción de Múltiples Longitudes de Onda para la determinación de Carbono Negro    | 31 |
| <b>Figura 8.</b> (A) Distrito de Jesús María, (B) Campo de Marte, y (C) ubicación donde se llevó a cabo el muestreo | 35 |
| <b>Figura 9.</b> Colocación de filtros de cuarzo en la Mufla                                                        | 37 |
| <b>Figura 10.</b> Colocación del filtro de cuarzo                                                                   | 39 |
| <b>Figura 11.</b> Resguardando los filtros de cuarzo                                                                | 40 |
| <b>Figura 12.</b> Guía acrílica y cortadora de acero inoxidable                                                     | 41 |
| <b>Figura 13.</b> Cabina de flujo laminar horizontal                                                                | 42 |
| <b>Figura 14.</b> Envase de polietileno con la muestra y el comparador en su interior                               | 43 |
| <b>Figura 15.</b> Estación del sistema neumático de irradiación de muestras (SNIM)                                  | 44 |
| <b>Figura 16.</b> Configuración del núcleo del reactor de investigación RP-10                                       | 44 |
| <b>Figura 17.</b> Calibración de Equipo FRXED mediante sus energías del Fe y Mo                                     | 46 |
| <b>Figura 18.</b> Posición de la muestra en la cabina del equipo de FRXED                                           | 47 |
| <b>Figura 19.</b> Material de Referencia                                                                            | 48 |
| <b>Figura 20.</b> Muestra cortadas en 3x3 cm y portamuestra del MABI                                                | 49 |
| <b>Figura 21.</b> Pestaña de medición de la absorción de las 7 longitudes de onda                                   | 50 |
| <b>Figura 22.</b> Orden de ingreso de datos en el Excel                                                             | 52 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 23.</b> Pestaña del PMF para el ingreso de datos                                  | 53 |
| <b>Figura 24.</b> Pestaña del PMF para la selección de datos                                | 54 |
| <b>Figura 25.</b> Pestaña del PMF para el ingreso de factores y ejecuciones                 | 55 |
| <b>Figura 26.</b> Pestaña del PMF para seleccionar la mejor interacción                     | 56 |
| <b>Figura 27.</b> Pestaña del PMF que muestra el resumen de los factores                    | 57 |
| <b>Figura 28.</b> Concentraciones de PM2.5 obtenidas durante el periodo de muestreo.        | 59 |
| <b>Figura 29.</b> Concentraciones obtenidas del aluminio durante la campaña de muestreo     | 60 |
| <b>Figura 30.</b> Concentraciones obtenidas del magnesio durante la campaña de muestreo     | 61 |
| <b>Figura 31.</b> Concentraciones obtenidas del vanadio durante la campaña de muestreo      | 61 |
| <b>Figura 32.</b> Concentraciones obtenidas del disprosio durante la campaña de muestreo    | 62 |
| <b>Figura 33.</b> Concentraciones obtenidas del yodo durante la campaña de muestreo         | 62 |
| <b>Figura 34.</b> Concentraciones obtenidas del cloro durante la campaña de muestreo        | 63 |
| <b>Figura 35.</b> Concentraciones obtenidas del sodio durante la campaña de muestreo        | 63 |
| <b>Figura 36.</b> Concentraciones obtenidas del manganeso durante la campaña de muestreo    | 64 |
| <b>Figura 37.</b> Concentraciones obtenidas del calcio durante la campaña de muestreo       | 65 |
| <b>Figura 38.</b> Concentraciones obtenidas del hierro durante la campaña de muestreo       | 66 |
| <b>Figura 39.</b> Concentraciones obtenidas del cobre durante la campaña de muestreo        | 66 |
| <b>Figura 40.</b> Concentraciones obtenidas del zinc durante la campaña de muestreo         | 67 |
| <b>Figura 41.</b> Concentraciones obtenidas del potasio durante la campaña de muestreo      | 67 |
| <b>Figura 42.</b> Concentraciones obtenidas del cromo durante la campaña de muestreo        | 68 |
| <b>Figura 43.</b> Concentraciones obtenidas de carbono negro durante la campaña de muestreo | 69 |
| <b>Figura 44.</b> Concentraciones obtenidas del CNQ durante la campaña de muestreo          | 70 |
| <b>Figura 45.</b> Contribución de los elementos al Factor 1                                 | 71 |
| <b>Figura 46.</b> Contribución de los elementos al Factor 2                                 | 71 |
| <b>Figura 47.</b> Contribución de los elementos al Factor 3                                 | 72 |

**Figura 48.** Contribución de los elementos al Factor 4 72

**Figura 49.** Concentraciones de los elementos estudiados en relación con los 4 factores. 73

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Resumen de las concentraciones de PM 2.5 obtenidas durante el periodo de muestreo. | 60 |
| <b>Tabla 2.</b> Resumen de las concentraciones del Al obtenidas durante el periodo de muestreo     | 60 |
| <b>Tabla 3.</b> Resumen de las concentraciones del Mg obtenidas durante el periodo de muestreo     | 61 |
| <b>Tabla 4.</b> Resumen de las concentraciones del V obtenidas durante el periodo de muestreo      | 61 |
| <b>Tabla 5.</b> Resumen de las concentraciones del Dy obtenidas durante el periodo de muestreo     | 62 |
| <b>Tabla 6.</b> Resumen de las concentraciones del I obtenidas durante el periodo de muestreo      | 62 |
| <b>Tabla 7.</b> Resumen de las concentraciones del Cl obtenidas durante el periodo de muestreo     | 63 |
| <b>Tabla 8.</b> Resumen de las concentraciones del Na obtenidas durante el periodo de muestreo     | 63 |
| <b>Tabla 9.</b> Resumen de las concentraciones del Mn obtenidas durante el periodo de muestreo     | 64 |
| <b>Tabla 10.</b> Resumen de las concentraciones del Ca obtenidas durante el periodo de muestreo    | 65 |
| <b>Tabla 11.</b> Resumen de las concentraciones del Fe obtenidas durante el periodo de muestreo    | 66 |
| <b>Tabla 12.</b> Resumen de las concentraciones del Mn obtenidas durante el periodo de muestreo    | 66 |
| <b>Tabla 13.</b> Resumen de las concentraciones del Zn obtenidas durante el periodo de muestreo    | 67 |
| <b>Tabla 14.</b> Resumen de las concentraciones del K obtenidas durante el periodo de muestreo     | 68 |
| <b>Tabla 15.</b> Resumen de las concentraciones del Cr obtenidas durante el periodo de muestreo    | 68 |
| <b>Tabla 16.</b> Resumen de las concentraciones del CN obtenidas durante el periodo de muestreo    | 69 |
| <b>Tabla 17.</b> Resumen de las concentraciones del CNQ obtenidas durante el periodo de muestreo   | 70 |

**TABLA DE ANEXOS**

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Anexo 1:</b> Certificado de calibración del equipo muestreador de alto volumen ..... | 97  |
| <b>Anexo 2:</b> Certificado del Material de Referencia Coal Fly Ash .....               | 98  |
| <b>Anexo 3:</b> Tabla del control de calidad de los análisis por AAN .....              | 103 |
| <b>Anexo 4:</b> Certificado del Material de Referencia UCD 47 MLT BLK 103.....          | 104 |
| <b>Anexo 5:</b> Tabla del control de calidad de los análisis por FRXED.....             | 109 |
| <b>Anexo 6:</b> Acrónimos.....                                                          | 110 |

## Resumen

**Objetivos:** Esta investigación tuvo como finalidad identificar las fuentes emisoras de material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) en el distrito de Jesús María durante el año 2023. **Método:** Se realizó una campaña de muestreo entre marzo y septiembre de 2023, utilizando filtros de cuarzo y un muestreador de alto volumen con selector de corte aerodinámico. La concentración de PM<sub>2.5</sub> se determinó por gravimetría. El análisis elemental se llevó a cabo mediante Activación Neutrónica (k<sub>0</sub>-INAA) y Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (FRXED). También se empleó el instrumento MABI para medir carbono negro y se aplicó el modelo de Factorización de Matriz Positiva (PMF) para identificar fuentes. Se evaluaron los elementos según los Criterios de Calidad del Aire de Ontario (AAQC). **Resultados:** Se obtuvieron 80 muestras con una concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> de 22.4 µg/m<sup>3</sup>, superando el valor recomendado por la OMS (15 µg/m<sup>3</sup>). Los elementos con mayores concentraciones fueron Na (1.067 µg/m<sup>3</sup>) y Ca (0.48 µg/m<sup>3</sup>). Las mediciones cumplieron los criterios de calidad analítica. El carbono negro promedió 0.76 µg/m<sup>3</sup>, y el proveniente de biomasa, 0.0159 µg/m<sup>3</sup>. El modelo PMF identificó cuatro factores, siendo el principal el asociado al tráfico vehicular, con una contribución del 63.9%. **Conclusiones:** Las principales fuentes de PM<sub>2.5</sub> en Jesús María fueron el tráfico vehicular (63.9%), seguido por aerosoles marinos (31.1%), quema de biomasa (4.9%) y polvo de construcción (0.1%).

**Palabras claves:** Calidad de aire, aerosoles atmosféricos, fuentes contaminantes

## Abstract

**Objectives:** This research aimed to identify the emission sources of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in the district of Jesús María during the year 2023. **Method:** A sampling campaign was conducted between March and September 2023, using quartz filters and a high-volume sampler with an aerodynamic cut-off selector. PM<sub>2.5</sub> concentrations were determined by gravimetric analysis. Elemental analysis was carried out using  $k_0$ -Instrumental Neutron Activation Analysis ( $k_0$ -INAA) and Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF). The MABI instrument was also used to measure black carbon, and the Positive Matrix Factorization (PMF) model was applied to identify sources. Elements were evaluated according to the Ontario Ambient Air Quality Criteria (AAQC). **Results:** A total of 80 samples were obtained, with an average PM<sub>2.5</sub> concentration of 22.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , exceeding the WHO recommended value (15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The elements with the highest concentrations were Na (1.067  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and Ca (0.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The measurements met analytical quality criteria. The average black carbon concentration was 0.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , with biomass-derived black carbon averaging 0.0159  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The PMF model identified four factors, the main one being associated with vehicular traffic, contributing 63.9%. **Conclusions:** The main sources of PM<sub>2.5</sub> in Jesús María were vehicular traffic (63.9%), followed by marine aerosols (31.1%), biomass burning (4.9%), and construction dust (0.1%).

**Keywords:** Air quality, atmospheric aerosols, polluting sources

## I. Introducción

En los últimos años, la contaminación atmosférica se ha convertido en una preocupación global debido a sus impactos en la salud humana y el medio ambiente. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), este fenómeno es responsable de aproximadamente 7 millones de muertes anuales a nivel mundial, siendo el material particulado (PM<sub>2.5</sub>) uno de los contaminantes más críticos. Estas partículas, definidas como sólidos o líquidos suspendidos en el aire con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras (Liu et al., 2017), pueden penetrar en los alveolos pulmonares y generar enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Duarte et al., 2022). Las fuentes de PM 2.5 son diversas y pueden ser tanto naturales como antropogénicas. Entre las fuentes naturales se incluyen la erosión del suelo, los incendios forestales, el polen y las esporas. (Mora et al., 2021; Ryou et al., 2018). Sin embargo, las fuentes antropogénicas suelen ser las principales responsables de las concentraciones elevadas de PM 2.5 en áreas urbanas y suburbanas. Desde el punto de vista composicional, el PM<sub>2.5</sub> está constituido por una mezcla compleja de compuestos como iones inorgánicos, carbono, metales traza, compuestos minerales, sales marinas, material biológico y agua adsorbida. Los iones más comunes incluyen sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), formados por reacciones químicas atmosféricas vinculadas a emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  (Mora et al., 2021). El carbono presente puede ser orgánico (OC), derivado de fuentes naturales y antropogénicas, o elemental (EC), también conocido como black carbon, producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa (Liu et al., 2017). Además, el PM<sub>2.5</sub> contiene metales y elementos traza como hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb), cobre (Cu), níquel (Ni) y manganeso (Mn), generalmente asociados a actividades industriales, tráfico vehicular y quema de combustibles (Duarte et al., 2022). También incluye una fracción mineral compuesta por óxidos de silicio, aluminio, calcio, magnesio y potasio, provenientes del polvo del suelo,

construcciones y procesos naturales. En zonas costeras es común la presencia de sales marinas como el cloruro de sodio (NaCl). Finalmente, el PM2.5 puede incorporar material biológico (esporas, polen, bacterias, virus) y agua adsorbida en partículas higroscópicas (Ryou et al., 2018).

## **1.1 Descripción y formulación del problema**

### **1.1.1 Descripción del problema**

La contaminación por PM2.5 representa una preocupación ambiental de gran magnitud en entornos urbanos a nivel global, dada su conexión con un aumento significativo en la mortalidad y la prevalencia de diversas enfermedades. Se estima que el 80% de la población urbana se expone a niveles de contaminación que superan las recomendaciones de la OMS, lo que ha llevado a un aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias como asma y bronquitis, junto con la manifestación de síntomas agudos y crónicos (Duarte et al., 2022; Mi et al., 2019).

Esta preocupante situación es evidente en un estudio reciente sobre la calidad del aire en Sudamérica, donde se destaca que el Perú lidera a los países sudamericanos con la peor calidad de aire (Hartinger et al., 2023). En Lima, epicentro de este problema, se ha observado que la exposición breve al material particulado ha resultado en un aumento en la cantidad de personas que buscan atención médica de emergencia en varios hospitales de la ciudad (Tapia et al., 2020). Además, se ha encontrado una alta incidencia de asma en niños en Lima, la cual está asociada con el material particulado emitido por el parque automotor (Carbajal et al., 2007).

El distrito de Jesús María, ubicado en el centro de Lima Metropolitana, se caracteriza por una elevada densidad urbana, tráfico vehicular constante y una alta actividad comercial y

residencial. Estas condiciones favorecen la acumulación de contaminantes en el aire, especialmente de material particulado fino PM<sub>2.5</sub> (Carbajal et al., 2007; Hartinger et al., 2023)

En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo evaluar los componentes químicos del material particulado PM<sub>2.5</sub> e identificar sus fuentes contaminantes en el distrito de Jesús María durante el año 2023.

### ***1.1.2 Formulación del problema***

**1.1.2.1. Problema general.** Cuáles son las fuentes contaminantes que generan PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María, 2023?

**1.1.2.1. Problemas específicos.** ¿Cuáles son las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> determinadas mediante gravimetría en el distrito de Jesús María durante el año 2023 y cómo se comparan con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del Perú y las directrices de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS)?

¿Cuáles son las concentraciones de los componentes de los aerosoles atmosféricos analizados mediante el Análisis de Activación Neutrónica (AAN), la Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (FRXED) y el Instrumento de Carbono Negro de Absorción de Longitud de Onda Múltiple (MABI), y cómo se comparan con los Criterios de Calidad del Aire Ambiental de Ontario (AAQC)?

¿Cuáles son las contribuciones de las principales fuentes de emisión del PM<sub>2.5</sub> determinadas mediante el modelo de Factorización Positiva de la Matriz (PMF)?

## **1.2. Antecedentes**

### ***1.2.1 Nacionales***

Bedregal et al.(2023) identificaron las principales fuentes contaminantes de los aerosoles atmosféricos en el distrito de Carabayllo, mediante un muestreo realizado durante 24 horas con cambio de filtros cada tres días, desde abril de 2019 hasta finales de abril de 2020. El monitoreo se efectuó utilizando un muestreador de alto volumen para partículas de menos de 10 micras (PM10) y un muestreador de bajo volumen Partisol para partículas menores de 2.5 micras (PM2.5), empleando filtros de cuarzo Whatman de 203 mm × 254 mm para PM2.5 y filtros de teflón Whatman de 47 mm de diámetro para PM10. La determinación química de la composición de los aerosoles se realizó mediante el método NIOSH 5040, cromatografía iónica (CI), análisis por activación neutrónica (AAN) y espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). La identificación de las fuentes se llevó a cabo aplicando el modelo estadístico de factorización positiva de la matriz (PMF), que permitió distinguir cinco perfiles fuente. El factor 1, con una contribución del 23 %, fue atribuido a la industria metalúrgica debido a los altos niveles de CO, carbono elemental (CE), Fe, Pb y Zn, entre otros. El factor 2 (18 %) correspondió a sal marina, asociada a la influencia costera y caracterizada por la presencia de Na, Cl<sup>-</sup>, Br y F<sup>-</sup>. El factor 3 (18 %) se vinculó con actividad industrial, dada la presencia de Al, Cu, Hg y V. El factor 4 se relacionó con polvo resuspendido y desgaste vehicular, evidenciado por altas concentraciones de Al, Ca, Fe y K, este último también asociado a la quema de biomasa. Finalmente, el factor 5, con la mayor contribución (32 %), fue asignado a la combustión de combustibles fósiles, reflejada en altos niveles de OC, EC, Cu, Ni, Pb y Sb, comunes en emisiones vehiculares. En conclusión, el estudio evidenció que las actividades industriales, el tráfico vehicular, la influencia costera y la quema de combustibles fósiles representan las principales fuentes de material particulado en Carabayllo, lo que subraya la necesidad de estrategias de mitigación integrales adaptadas a la dinámica local de emisiones.

Ilizarbe et al. (2020) identificaron las fuentes de contaminación atmosférica por PM10 en dos distritos de Lima Metropolitana, uno al norte y otro al noreste de la ciudad. El muestreo se realizó durante 25 días consecutivos, entre abril y mayo de 2017, utilizando un equipo de bajo volumen Thermo Scientific Partisol™ 2000i. Las muestras fueron analizadas mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), y las fuentes contaminantes se determinaron aplicando el modelo de factorización positiva de la matriz (PMF) y análisis de componentes principales (PCA). El primer factor identificado fue el polvo de suelo o factor mineral, caracterizado por altas concentraciones de Al, Si, Ca, Fe y K, típicos de la resuspensión de partículas del suelo, especialmente en zonas no pavimentadas y con actividad constructiva. El segundo factor correspondió al tráfico vehicular, específicamente al desgaste de frenos y llantas, con presencia de elementos como Zn, Cu, Pb, Sb, Ba y Mn. Este factor también incluyó emisiones por combustión de diésel, intensificadas por la antigüedad del parque automotor limeño. El tercer factor fue atribuido a la actividad industrial, particularmente fundiciones y metalmecánica, debido a la presencia de metales como Fe, Zn y Ba. El cuarto factor se relacionó con aerosoles marinos, evidenciado por la detección de Na, Mg y K, elementos que ingresan al ambiente urbano a través del transporte eólico desde el océano Pacífico. El quinto factor se vinculó a la combustión de combustibles fósiles, incluyendo derivados del petróleo, cuyo perfil incluyó elementos como V, Ni y aditivos presentes en el diésel. En conclusión, el estudio mostró que las fuentes de contaminación por PM10 en Lima Metropolitana están asociadas principalmente a la actividad vehicular, industrial, minera, marítima y a la combustión de combustibles fósiles, lo que pone de manifiesto la necesidad de estrategias de control diferenciadas según la fuente.

Álvarez y Suarez (2020) identificaron las fuentes contaminantes de material particulado fino (PM2.5) en las ciudades de Jauja, Concepción y Huancayo, ubicadas en la zona central del

Perú. El muestreo se realizó entre julio de 2007 y octubre de 2008, utilizando un muestreador de bajo volumen Thermo Scientific Partisol™. Las muestras fueron analizadas mediante fluorescencia de rayos X (FRX), y las fuentes se identificaron mediante análisis de componentes principales (PCA). En Jauja se determinaron dos factores: el primer factor (53 %) estuvo compuesto por Al, Ca, Fe, Si, Ti y K, elementos característicos del polvo del suelo; el segundo factor (36 %) agrupó As, Zn, Pb y S, asociados a emisiones de fundición. En Concepción también se identificaron dos factores principales: el primero (59 %) representó al polvo del suelo (Al, Si, Fe, Ca, K) y el segundo (36 %) estuvo relacionado con fundición, por la presencia de S y As. En Huancayo se identificaron cuatro factores: el primer factor (30 %) fue polvo del suelo (Fe, Al, K); el segundo (29 %) correspondió a fundición (As, Pb); el tercero (21 %) se atribuyó a la quema de biomasa (Br); y el cuarto factor (18 %) estuvo asociado a emisiones vehiculares (S). La cuantificación de las fuentes indicó que el polvo del suelo fue el principal emisor en todas las ciudades (50 % en Jauja, 73 % en Concepción y 34 % en Huancayo). En Jauja y Concepción, la fundición ocupó el segundo lugar (33 % y 23 %, respectivamente), mientras que en Huancayo la quema de biomasa (27 %) y los vehículos (26 %) superaron al aporte de la fundición (7 %). En conclusión, el estudio demostró que la composición y jerarquía de fuentes de PM<sub>2.5</sub> varía según la dinámica socioeconómica y ambiental de cada ciudad, lo que resalta la necesidad de políticas de control diferenciadas a nivel regional.

Li et al. (2020) llevaron a cabo un estudio para identificar las fuentes contaminantes en Linfen, China, utilizando un período de muestreo que se extendió desde el año 2018 hasta el 20 de enero de 2019. Para la recopilación y análisis de los datos se empleó el equipo automático AIM URG 9000D, que incluye un sistema de recolección de partículas y dos cromatógrafos de iones (IC) diseñados para el análisis detallado de aniones y cationes. Adicionalmente, se utilizó un analizador semicontinuo de carbono negro y carbono orgánico para una evaluación

exhaustiva de los componentes particulados. Para determinar las fuentes específicas de la contaminación atmosférica en la región se aplicó el modelo de factorización de matriz positiva (PMF). Los hallazgos del estudio sugirieron que las principales contribuciones a la contaminación provienen de fuentes vehiculares, emisiones industriales, nitratos secundarios y quema de biomasa, entre otras. En conclusión, el estudio mostró que la mezcla de emisiones antropogénicas y procesos secundarios atmosféricos incide significativamente en la calidad del aire de Linfen, lo que pone de relieve la necesidad de implementar medidas de control focalizadas en la reducción de emisiones primarias y la formación de contaminantes secundarios.

Huamán et al. (2019) identificaron las fuentes contaminantes en diversas áreas metropolitanas de Huancayo mediante un muestreo realizado diariamente durante un período de 25 días, desde marzo hasta noviembre de 2017. Para esta tarea se utilizaron muestreadores de bajo volumen Partisol emparejados. El análisis químico se efectuó mediante el método gravimétrico, espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y cromatografía iónica (CI). La identificación de las fuentes contaminantes presentes en el ambiente se realizó aplicando el modelo de análisis de conglomerados jerárquicos (HCA) y el análisis de componentes principales (PCA). Los resultados revelaron que las principales fuentes de contaminación en las áreas metropolitanas de Huancayo corresponden a la resuspensión del suelo, la quema de combustible, la abrasión de neumáticos de vehículos y el desgaste de componentes automotrices. En conclusión, el estudio destacó que la interacción de fuentes vehiculares, procesos de combustión y partículas re-suspendidas afecta significativamente la calidad del aire en Huancayo, lo que resalta la necesidad de estrategias de control orientadas al transporte y la gestión de suelos urbanos.

### **1.2.2 Internacionales**

Srivastava et al. (2021) identificaron las fuentes contaminantes en la ciudad de Beijing, China. El muestreo se realizó en dos períodos: del 9 de noviembre al 11 de diciembre de 2016 y del 22 de mayo al 24 de junio de 2017. Para este propósito, se utilizaron muestreadores de volumen alto (Tisch) y de volumen medio (Thermo Scientific Partisol). Para el análisis químico de las muestras recolectadas, se emplearon diversas técnicas, entre las que se incluyen cromatografía iónica, analizador de carbono térmico-óptico de múltiples longitudes de onda, espectrómetro de masas de plasma acoplado (ICP-MS), espectrómetro de fluorescencia de rayos X y cromatografía de gases. Para la identificación de las fuentes contaminantes, los investigadores aplicaron el modelo de factorización de matriz positiva (PMF). Los resultados revelaron que las fuentes contaminantes incluían polvo de carretera, combustión de carbón y biomasa, entre otros. En conclusión, el estudio evidenció que la mezcla de emisiones asociadas a la combustión de carbón, biomasa y polvo urbano representa una contribución significativa a la contaminación atmosférica de Beijing, lo que resalta la importancia de aplicar medidas de mitigación específicas para reducir la exposición de la población a partículas contaminantes.

Franzin et al. (2020) identificaron las fuentes contaminantes en Sao Paulo, Brasil, durante el período comprendido entre marzo y junio de 2008. El muestreo se realizó mediante un muestreador de bajo volumen. Para la determinación química, se emplearon espectroscopia de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda y microscopía electrónica de rastreo. La identificación de las fuentes se llevó a cabo mediante análisis de componentes principales (PCA). Los resultados revelaron que las principales fuentes de material particulado incluían actividades agroindustriales, quema de biomasa y emisiones vehiculares, entre otros. En conclusión, el estudio evidenció que las actividades humanas, especialmente las agroindustriales y las emisiones vehiculares, tienen un impacto significativo en la calidad del

aire en Sao Paulo, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias de control específicas para reducir la concentración de material particulado.

Jain et al. (2020) identificaron las fuentes contaminantes en la ciudad de Delhi, India, en un estudio que abarcó el período desde enero de 2013 hasta diciembre de 2016. Se emplearon diferentes técnicas de muestreo y análisis para evaluar la calidad del aire en la región. Se utilizó un muestreador de polvo respirable de alto volumen Ecotech para la medición de  $PM_{10}$ , así como un muestreador de partículas finas Envirotech para  $PM_{2.5}$ . Para el análisis químico de las muestras recolectadas, se emplearon técnicas como fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda, cromatografía iónica y el método NIOSH 5040 para la determinación de carbono negro y carbono elemental. Para la identificación de las fuentes contaminantes, se aplicó el modelo de factorización de matriz positiva (PMF). Los resultados obtenidos revelaron la presencia de ocho fuentes principales de contaminación, entre las cuales se destacan la quema de biomasa, el polvo de suelo, la quema de combustibles fósiles y las emisiones industriales, entre otros. En conclusión, el estudio mostró que la diversidad de fuentes, tanto de origen antropogénico como natural, contribuye de manera significativa a la contaminación atmosférica en Delhi, lo que subraya la necesidad de implementar políticas integradas de control de emisiones que consideren la complejidad de las fuentes identificadas.

Park et al. (2020) identificaron las fuentes de contaminación en Seúl, Corea del Sur, en un estudio realizado durante el período comprendido entre 2014 y 2015. Para la recolección de  $PM_{2.5}$  y sus componentes químicos, utilizaron un muestreador de sistema de tres canales con paquetes de filtro de 47 mm. El análisis químico de las muestras se efectuó mediante técnicas como fluorescencia de rayos X, transmitancia óptica y cromatografía iónica. La identificación de las fuentes contaminantes se llevó a cabo aplicando el modelo de factorización de matriz

positiva (PMF). Los resultados revelaron la existencia de nueve fuentes principales de contaminación, entre las cuales destacaron las emisiones móviles, el nitrato secundario, el sulfato secundario y la quema de biomasa, entre otras. En conclusión, el estudio resaltó que la contribución combinada de emisiones vehiculares y contaminantes secundarios derivados de procesos atmosféricos agrava significativamente los niveles de PM<sub>2.5</sub> en Seúl, lo que enfatiza la necesidad de políticas de control que aborden tanto las emisiones primarias como la formación secundaria de contaminantes.

Chen et al. (2019) identificaron las fuentes contaminantes en la zona urbana de Harbin, noreste de China, durante el período de abril a junio de 2017. Para el muestreo, se utilizó un impactador en cascada no viable con capacidad de flujo de aire. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a análisis químicos empleando técnicas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (FRXED) y microscopía electrónica de barrido equipada con espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS). La identificación de las fuentes contaminantes se llevó a cabo mediante análisis del factor de enriquecimiento para examinar su variación. Los resultados revelaron la presencia de diversas fuentes, entre ellas calderas de carbón, centrales eléctricas de carbón, polvo del suelo, tráfico y emisiones industriales, entre otros. En conclusión, el estudio evidenció que la dependencia energética del carbón y las emisiones asociadas al tráfico y la industria representan factores determinantes en la calidad del aire de Harbin, lo que subraya la necesidad de estrategias orientadas a reducir el uso de combustibles fósiles y optimizar la gestión de emisiones industria

Sugita et al. (2019) evaluaron la genotoxicidad del material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) recolectado mediante un muestreador de alto volumen (High-Volume, HV) acoplado a un

impactador, con el objetivo de obtener mayores cantidades de muestra respecto al método convencional de bajo volumen (Low-Volume, LV). En el estudio se compararon las concentraciones de carbono elemental (EC), carbono orgánico (OC), iones inorgánicos y compuestos orgánicos semivolátiles como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) en muestras obtenidas por ambos métodos. Se observó que el muestreador HV permitió detectar constituyentes en concentraciones traza que no eran evidentes con el LV, debido a su mayor caudal, aproximadamente 40 veces superior. Además, se evaluó la actividad mutagénica de las muestras mediante el ensayo de Ames modificado por el método de microsuspensión, encontrándose una mayor genotoxicidad en el PM<sub>2.5</sub> recolectado durante el invierno. En conclusión, el estudio evidenció que el uso de sistemas de muestreo de alto volumen mejora la sensibilidad en la detección de contaminantes genotóxicos, resaltando la importancia de considerar tanto la estacionalidad como la capacidad analítica de los equipos utilizados en estudios de calidad del aire.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Identificar las principales fuentes contaminantes que generan PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María 2023.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Determinar las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> mediante la técnica gravimétrica en el distrito de Jesús María durante el año 2023 y compararlas con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del Perú y las directrices de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Determinar las concentraciones de los componentes de los aerosoles atmosféricos mediante el Análisis de Activación Neutrónica (AAN), la Fluorescencia de Rayos X de Energía

Dispersiva (FRXED) y el Instrumento de Carbono Negro de Absorción de Longitud de Onda Múltiple (MABI), y compararlas con los Criterios de Calidad del Aire Ambiental de Ontario (AAQC).

Identificar las principales fuentes de emisión del PM<sub>2.5</sub> y cuantificar su contribución mediante el modelo de Factorización Positiva de la Matriz (PMF)

#### **1.4. Justificación**

Se justifica porque nos proporcionará un conocimiento más exhaustivo acerca de las fuentes de contaminación presentes en el distrito, lo que nos permitirá identificar las actividades humanas responsables del deterioro de la calidad del aire y su impacto negativo en la salud pública. Este conocimiento es crucial para priorizar acciones y políticas que aborden de manera efectiva las causas subyacentes de la contaminación atmosférica.

Al identificar las fuentes específicas de contaminación, estaremos en posición de sugerir acciones concretas para prevenir y reducir la contaminación, así como recomendar tecnologías más limpias y prácticas sostenibles para mitigar su impacto a largo plazo. Esto no solo contribuirá a elevar la calidad del aire y salvaguardar la salud de los residentes de Jesús María, sino que también promoverá el bienestar integral de la comunidad y fomentará el desarrollo sostenible de la capital limeña.

Además, los resultados de esta investigación servirán como una base sólida para la formulación de regulaciones y estándares más rigurosos en cuanto a las emisiones de contaminantes, lo que promoverá la adopción de prácticas industriales más responsables y respetuosas con el medio ambiente. Asimismo, proporcionará información valiosa para el

diseño e implementación de planes de acción concretos destinados a reducir la contaminación del aire y elevar la calidad de vida de los ciudadanos.

## **1.5. Hipótesis**

### ***1.5.1 Hipótesis general***

Las principales fuentes contaminantes que generan PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María durante el año 2023 están significativamente asociadas a actividades asociados al sector vehicular.

## II. Marco Teórico

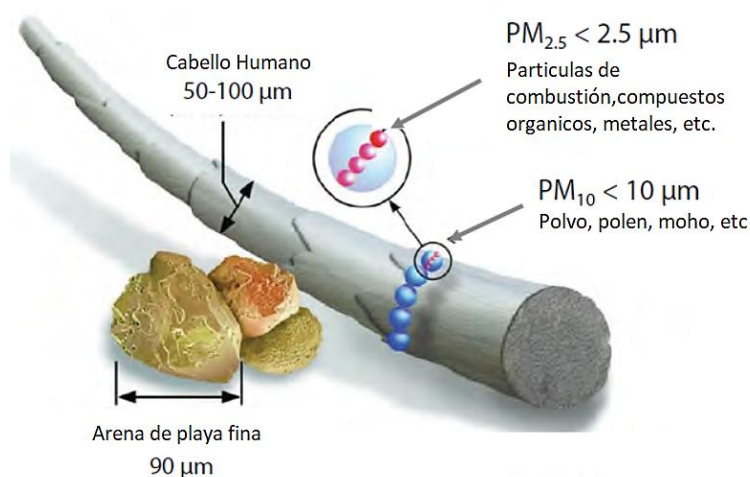
### 2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

#### 2.1.1 Aerosoles Atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos son partículas en estado sólido o líquido cuyos componentes se encuentran suspendidos en la atmósfera, con dimensiones que varían desde 1 nm hasta 100  $\mu\text{m}$  (Duarte et al., 2022). Entre ellos, se destacan el PM<sub>2.5</sub> y el PM<sub>10</sub> (Figura 1), que son consideradas las más peligrosas debido a su alta concentración, capacidad de permanecer en el aire durante períodos prolongados y potencial para ser inhaladas por las personas (Alvarez y Suarez, 2020; Ault y Axson, 2017). Estas partículas forman una compleja composición química y están vinculadas a fenómenos que afectan el clima global, los procesos del ecosistema y la salud humana (Montero et al., 2015; Toledano, 2008).

**Figura 1.**

*Tamaño relativo del PM 2.5 y PM 10*



*Nota:* Tomado de Pollution Prevention and Control, Berthouex y Brown, 2013, bookboon Learning

### **2.2.1 Componentes de los Aerosoles Atmosféricos**

Los aerosoles atmosféricos pueden contener una amplia variedad de componentes químicos, tanto de origen natural como antropogénico. Algunos de los componentes químicos comunes de los aerosoles atmosféricos incluyen sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), carbono negro (hollín), compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y metales y metaloides como plomo, cadmio, mercurio y arsénico (Moreno, 2007; Prather et al., 2008).

Los sulfatos se forman principalmente a partir de la oxidación de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) emitido por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la actividad industrial, así como de fuentes naturales como la actividad volcánica y el transporte de polvo atmosférico. Los nitratos se forman por la oxidación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) emitidos por fuentes antropogénicas como los vehículos, la industria y la agricultura, así como por procesos naturales como la actividad microbiana del suelo.

El carbono negro, o hollín, es generado por la combustión incompleta de materiales orgánicos, como la quema de biomasa, la quema de combustibles fósiles y los incendios forestales (Peralta et al., 2019). Los COV son una amplia variedad de compuestos orgánicos que pueden ser emitidos por fuentes naturales como la vegetación y el suelo, así como por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la industria y la evaporación de disolventes (Berthouex y Brown, 2013; Mellouki et al., 2015)

El amoníaco es emitido por fuentes naturales como la descomposición de materia orgánica y la actividad volcánica, así como por actividades humanas como la agricultura y la quema de combustibles fósiles. Los cloruros provienen de fuentes naturales como el océano y fuentes antropogénicas como la industria química y la sal de carretera (Kolb, 2002;

Manousakas et al., 2017). Además, los aerosoles atmosféricos pueden contener metales y metaloides que pueden ser emitidos por actividades industriales, vehículos, la quema de carbón y otras fuentes antropogénicas.

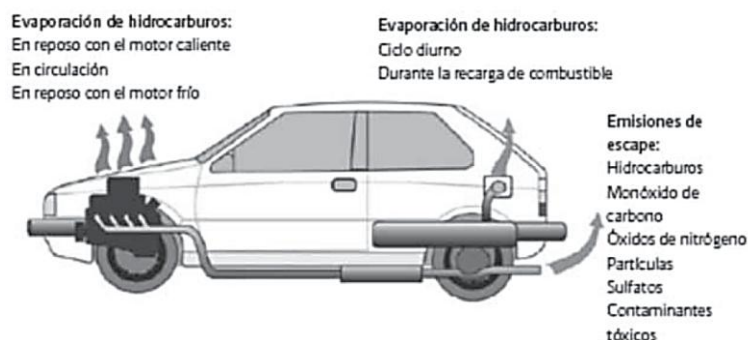
### **2.2.3 PM 2.5**

Las partículas PM<sub>2.5</sub> son aquellos componentes en el aire que presentan un diámetro aerodinámico igual o inferior a 2.5 micrómetros (Thangavel et al., 2022). Este tamaño diminuto las convierte en una amenaza significativa, ya que pueden desencadenar una amplia gama de problemas respiratorios y cardiovasculares (Lelieveld et al., 2015).

### **2.2.4 Fuentes de PM 2.5**

El PM<sub>2.5</sub> proviene tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Entre las fuentes antropogénicas es generada por la quema de combustibles, la industria química, el transporte entre otros (Mora et al., 2021). Por otro lado, las fuentes naturales incluyen el polvo atmosférico, los incendios forestales y las erupciones volcánicas (Ryou et al., 2018).

**2.2.4.1. Emisiones de Vehículo.** Las emisiones de vehículos son la principal fuente contaminación por partículas finas en áreas urbanas y ciudades densamente pobladas (Quijano et al., 2010). Esto se debe a que los vehículos que utilizan combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel, liberan estas partículas durante la quema de combustible y el desgaste de los componentes del motor los cuales son emitidos durante distintas etapas del uso del vehículo (Figura 2) (Herrera et al., 2012).

**Figura 2.***Emisiones producidas por vehículos automotores*

*Nota:* Tomado de “Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica”, Herrera et al., 2012, Tecnología en Marcha,1(25).

La cantidad de PM<sub>2.5</sub> emitido está influenciada por factores como el tipo de combustible, la tecnología de los motores, el mantenimiento adecuado de los vehículos y las condiciones de conducción (Yang et al., 2015). Estas partículas pueden contener carbono negro, compuestos orgánicos volátiles, metales y otros contaminantes (Kleeman et al., 2007).

**2.2.4.2. Incendios Forestales.** Los incendios forestales representan una importante fuente de contaminación debido a la quema de biomasa. Durante este proceso, se emiten principalmente PM<sub>2.5</sub>, que constituye más del 90 % de las emisiones. Además, se liberan diversos gases, como hidrocarburos, dióxido de carbono, monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno y ozono (Ma et al., 2019; Sandoval et al., 2019).

**2.2.4.3. Quema de biomasa.** La quema de biomasa, que incluye la quema de leña, residuos agrícolas y pellets de biomasa, es una fuente significativa de emisiones de partículas

finas (PM<sub>2.5</sub>) en la atmósfera (Mielnicki et al., 2014). Este proceso involucra una serie de reacciones físicas, químicas y de transferencia que resultan en la liberación de estas partículas (Kwon y Man, 2018). Es especialmente común en áreas donde la actividad industrial está muy extendida (Levine, 2014).

**2.2.4.4. Erupciones volcánicas.** En una erupción volcánica se emite una gran variedad de gases y partículas, incluyendo material particulado en grandes cantidades son emitidos a la atmosfera que pueden variar en tamaño, composición y cantidad, dependiendo del tipo de volcán, la intensidad de la erupción y las condiciones meteorológicas, lo que implica un impacto significativo en la calidad del aire y el clima (Moreno, 2007; Toledano, 2008). Los aerosoles emitidos por las erupciones volcánicas pueden incluir cenizas, dióxido de azufre, dióxido de carbono y vapor de agua (OPS, 2021).

**2.2.4.5. Polvo de Sahara.** El polvo del Sahara se forma a partir de la erosión del suelo y la arena en el norte de África y son transportados mediante los vientos que soplan sobre el desierto, el polvo traslada a Océano Atlántico hacia América del Norte, América del Sur y el Caribe (Duarte et al., 2022; UNICEF, 2021)

## **2.2 Efectos del PM<sub>2.5</sub> en la salud**

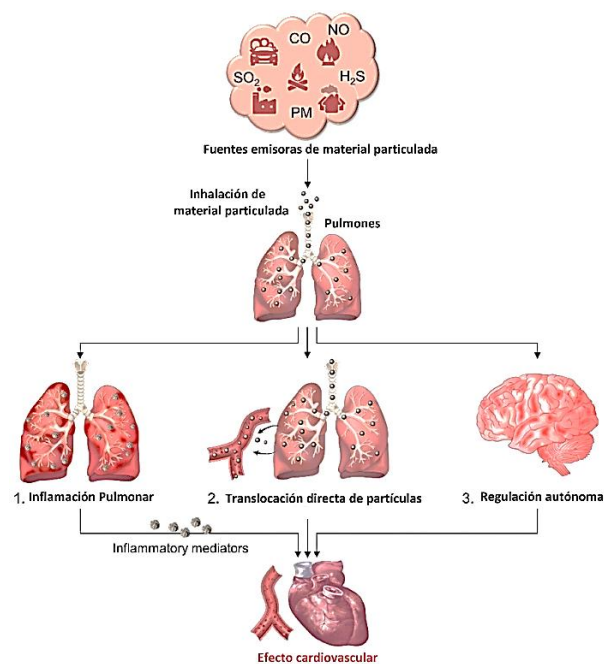
Los impactos de las partículas finas PM<sub>2.5</sub> en la salud están relacionados con su capacidad de ingresar a los pulmones y al sistema cardiovascular, lo que provoca diversos problemas de salud (Grisales et al., 2022). Estas partículas son responsables de desencadenar

enfermedades respiratorias como el asma bronquial y la bronquitis, así como enfermedades del corazón, anemia y dolores de cabeza, entre otras (Becerra y Ramos, 2020).

La aparición de enfermedades respiratorias se atribuye a la inflamación pulmonar, la translocación directa de partículas, así como a una regulación autónoma desencadenada por la inhalación de material particulado, tal como se ilustra en la Figura 3. Además, estos efectos pueden llevar a la pérdida prematura de vidas (Montoya et al., 2013).

### Figura 3.

*Vías primarias de señalización de PM y eventos cardiovasculares.*



*Nota:* Tomado de “The Impact of Fine Particulate Matter 2.5 on the Cardiovascular System: A Review of the Invisible Killer”, Basith et al., 2022, Nanomaterials,12(15).

La emisión de contaminantes y la consiguiente mala calidad del aire tienen graves consecuencias en el sistema respiratorio y circulatorio humano (Keijzer et al., 2016). Los estudios han confirmado que esto ocasiona daño directo en los tejidos, desencadena respuestas inflamatorias agudas y crónicas, genera radicales libres de oxígeno, daña el revestimiento pulmonar y altera la estructura del pulmón (Duarte et al., 2022; Lelieveld et al., 2015). También se observa una disminución en la respuesta inmunitaria celular, caracterizada por la reducción en la liberación de citocinas, que son responsables de la comunicación celular durante la respuesta a agentes infecciosos (Grisales et al., 2022). Además, se produce un proceso de daño genético y mutaciones en el tejido pulmonar (A. J. Cohen et al., 2017).

Las personas vulnerables al PM<sub>2,5</sub> incluyen a aquellos con enfermedades respiratorias crónicas como el asma, la bronquitis crónica y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Fogelbach et al., 2020; Linares y Díaz, 2009). También están en mayor riesgo los individuos con enfermedades cardiovasculares preexistentes, como enfermedad coronaria, hipertensión arterial y enfermedad vascular periférica (Linares et al., 2006). Los niños, especialmente los lactantes y los que tienen sistemas inmunológicos inmaduros, son particularmente sensibles a los efectos del PM<sub>2,5</sub>. Además, los adultos mayores, cuyo sistema respiratorio y defensas inmunológicas pueden estar debilitados, también son más vulnerables a los impactos del PM<sub>2,5</sub> en la salud (Molnár et al., 2007).

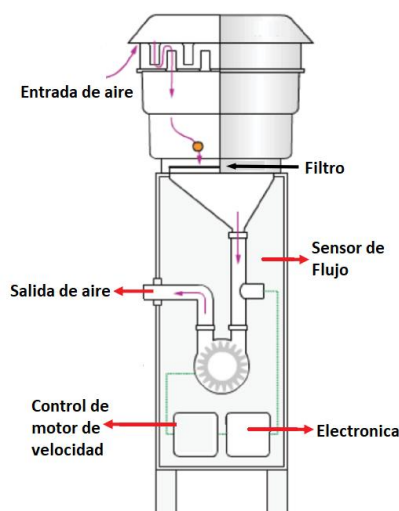
### **2.3 Equipo muestreador de alto volumen**

El equipo muestreador de alto volumen (Figura 4), permite la evaluación de la calidad del aire y la medición de la contaminación atmosférica. Diseñado para recolectar muestras de partículas atmosféricas durante un período específico, generalmente 24 horas, utiliza un filtro para capturar estas partículas y calcula el volumen total de aire muestreado mediante la

velocidad promedio del flujo (Bernstein y Kleinman, 1976; INACAL, 2019). Este tipo de equipo es esencial para comprender y abordar los problemas relacionados con la contaminación atmosférica, proporcionando datos esenciales para la toma de decisiones en materia ambiental (UNE, 2015).

#### **Figura 4.**

*Equipo muestreador de alto volumen*



*Nota:* Tomado de Pollution Prevention and Control, Berthouex y Brown, 2013, bookboon Learning

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos (1999), el equipo muestreador de alto volumen consta principalmente de cinco componentes: el colector de partículas, la bomba de muestreo, el filtro, el sistema de control y el registro de datos. Estos elementos trabajan en conjunto para garantizar la captura efectiva de las partículas y la precisión en la medición del aire ambiente. Desde el mantenimiento del colector hasta la regulación del flujo de aire y la recopilación de datos, cada componente desempeña un papel esencial en el proceso de muestreo, asegurando la fiabilidad y la precisión de los resultados obtenidos para su posterior análisis y evaluación.

Si bien estos equipos fueron originalmente diseñados para el muestreo de partículas con diámetro aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$  (PM10), mediante la incorporación de un selector de tamaño de partículas se pueden adaptar para la recolección de material particulado fino (PM2.5). Este selector, también conocido como impactador, permite que solo las partículas con un diámetro igual o inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  lleguen al filtro, reteniendo las de mayor tamaño. Esta modificación ha sido utilizada eficazmente por Sugita et al. (2019) para recolectar PM2.5 en concentraciones suficientes que permitan su análisis químico y genotóxico, lo cual no es posible con métodos convencionales de bajo volumen debido a las limitaciones en la cantidad de muestra recolectada.

#### **2.4 Análisis por Activación Neutrónica (AAN)**

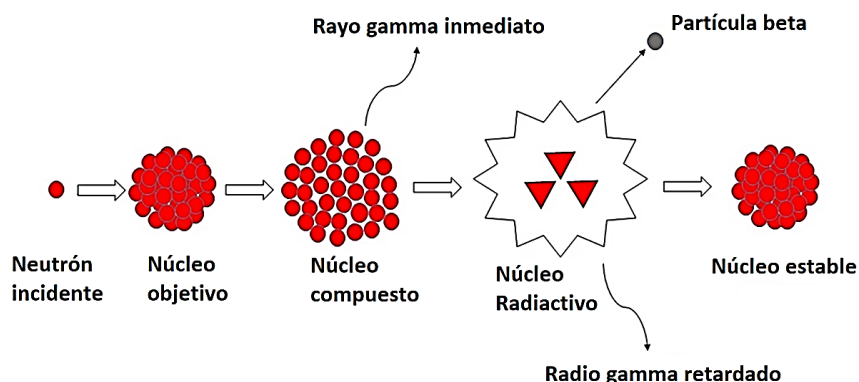
El análisis por activación neutrónica es una técnica que posibilita la determinación de las concentraciones de elementos en diversos materiales. Esta técnica ofrece un muestreo discreto de los elementos, ya que no toma en cuenta la forma química de la muestra, enfocándose exclusivamente en su núcleo (Pino et al., 2013). Al irradiar una muestra con neutrones, el análisis por activación neutrónica permite la cuantificación de elementos mediante la generación de radioisótopos correspondientes a los elementos presentes en la muestra (Viererbl et al., 2015).

Esta técnica se distingue por su proceso en varias etapas (ver Figura 5). En primer lugar, se lleva a cabo la activación de una muestra mediante la exposición a neutrones provenientes de una fuente de neutrones. Posteriormente, la muestra se transfiere a una instalación de recuento de bajo fondo, donde un espectrómetro mide la radiación gamma después de uno o más períodos de descomposición (Montoya Rossi, 1995; Révay y Kennedy, 2012). Finalmente, se interpreta la información de los espectros de rayos gamma resultantes en relación con

radionúclidos, elementos asociados y sus proporciones de masa (Drescher et al., 2018; Greenberg et al., 2011). Las emisiones inducidas por este proceso se pueden medir para cuantificar la concentración de los radioisótopos, permitiendo así determinar la presencia de los isótopos estables iniciales (Bode, 2017).

**Figura 5.**

*Representación gráfica del análisis de activación neutrónica de rayos gamma.*



*Nota:* Tomado de “A comparison of machine learning methods to classify radioactive elements using prompt-gamma-ray neutron activation data”, Mathew et al., 2023, Sci Rep,13(9948).

Además el AAN encuentra aplicaciones significativas en campos como la química analítica, la geología, la biología y las ciencias de la vida y el medio ambiente (Trkov y Radulović, 2015). Esta técnica destaca por una serie de ventajas clave, que incluyen su elevada sensibilidad, la ausencia de contaminación posterior a la irradiación y su destacada selectividad. (Pino et al., 2013).

En la aplicación de la AAN, se utilizan comúnmente dos métodos para determinar la concentración elemental en muestras. El primero es el método comparativo, que requiere materiales de referencia para su análisis. El segundo es el método absoluto conocido como ko,

que permite determinar la concentración utilizando un solo material de referencia y parámetros nucleares (Montoya Rossi, 1995).

#### 2.4.1 Método $K_0$

El método  $K_0$  surgió como una alternativa mejorada a los métodos tradicionales de análisis por activación nuclear. En este enfoque, se simplifica la complejidad de los datos nucleares mediante la parametrización de conjuntos de datos experimentales o teóricos en un solo factor conocido como  $K_0$  (Montoya Rossi, 1995). Este factor, determinado con precisión, permite calcular las concentraciones de elementos en muestras sin la necesidad de múltiples estándares de referencia, utilizando en su lugar un elemento como el oro como comparador (Bedregal et al., 2023).

Una de las ventajas significativas del método  $K_0$  es su independencia de las condiciones específicas de irradiación y conteo, lo cual lo hace aplicable de manera consistente en diferentes laboratorios (Révay y Kennedy, 2012). Esta característica se debe a que los factores  $K_0$  son constantes naturales que no varían significativamente bajo diversas condiciones experimentales (Correa Puerta, 2012). Para determinar la concentración elemental, se utiliza la ecuación 1.

$$\rho = \frac{\left( \frac{N_p / t_m}{W \cdot S \cdot D \cdot C} \right)_x \cdot \frac{k_{0,c}}{k_{0,x}} \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_x} \cdot \frac{f + Q_{0,c}(\alpha)}{f + Q_{0,x}(\alpha)}}{\left( \frac{N_p / t_m}{w \cdot \rho \cdot S \cdot D \cdot C} \right)_c} \quad (1)$$

Dónde:

$X$  = Elemento químico en la muestra

$c$  = Comparador co-irradiado;

$\rho$  = Concentración del elemento,

$N_p$  = Área del pico,

$t_m$  = Tiempo de medición,

$W$  = Masa de muestra,

$S$  = Factor de saturación,  $S = 1 - \exp(-\lambda t_d)$ ,  $t_d$  = tiempo de decaimiento

$D$  = Factor de decaimiento,  $D = 1 - \exp(-\lambda t_d)$

$C$  = Factor de conteo,  $C = [1 - \exp(-\lambda t_c)]/\lambda t_c$

$w\rho$  = Masa del comparador

$k_0$  = Constante tabulada para el nucleído a analizar y del comparador oro,  $\varepsilon$ , es la eficiencia de detección del pico de interés a la distancia de medición y  $f + Q_0$ , son respectivamente, la razón de flujo térmico y epitérmico y la relación entre la sección transversal y la integral de resonancia corregida para una distribución no ideal de flujo de neutrones epitérmicos.  $\alpha$ , parámetro de la posición de irradiación que mide la desviación de la distribución del flujo neutrónico epitérmico de la forma  $1/E$ , aproximando por un dependencia  $1/E^{1+\alpha}Q(\alpha)$ ,  
 $\{(Q_0 - 0.429)\bar{E}_r^{-\alpha} + \frac{0.429}{[(0.55)^\alpha(2\alpha+1)]}\}$ , donde;  $Q_0 = \frac{I_0}{\sigma_0}$ ,

$I_0$  = Integral de resonancia,  $I_0 = \int_{0.55\text{eV}}^{\infty} \sigma(E)dE/E$

$\bar{E}_r$  = Energía efectiva de resonancia en Ev

Si bien el método elimina las incertidumbres asociadas con el uso de múltiples estándares de referencia, introduce pequeñas incertidumbres propias conocidas como incertidumbres de  $K_0$ , que generalmente son incertidumbres manejables y no afectan sustancialmente la precisión del método. (Correa Puerta, 2012).

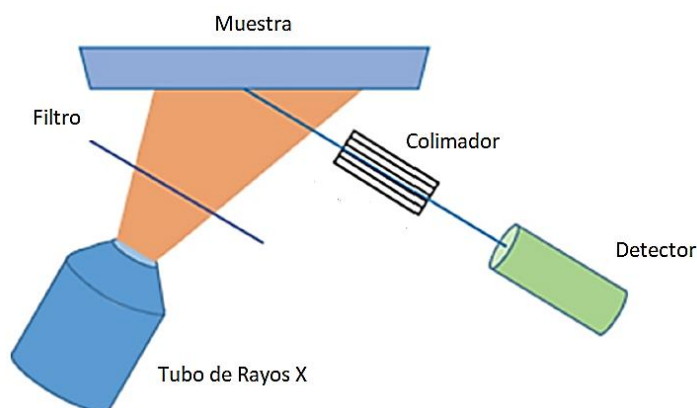
## 2.5 Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (FRXED)

La fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (FRXED) es una técnica analítica ampliamente utilizada para la identificación de elementos químicos presentes en diversas fuentes ambientales (Marguí et al., 2022). Esta técnica, que se ha consolidado como una de las más importantes en este ámbito, consiste en una estructura básica que incluye una fuente de excitación, elementos ópticos para dirigir el haz de rayos X y un detector para registrar y analizar el espectro de fluorescencia de rayos X (Singh et al., 2022).

El procedimiento de la FRXED (Figura 6), implica la excitación directa de la muestra con el tubo de rayos X, seguido por el análisis de la radiación de fluorescencia de rayos X por parte de un detector semiconductor, como el de silicio-litio, diodo PIN o cámara de deriva de silicio (Schramm, 2016; Weindorf et al., 2014). Este detector establece un espectro de altura de pulso que clasifica, según la energía, todos los fotones recibidos, con un tiempo de procesamiento limitado a unos pocos microsegundos. Además, se puede utilizar un filtro para eliminar parte de la radiación excitadora y evitar sobrecargar el detector.

### **Figura 6.**

*Esquema del funcionamiento del FRXED*



*Nota:* Tomado de “Use of X-ray Fluorescence Analysis for the Determination of Rare Earth Elements”, Schramm, R, 2016, Physical Sciences Reviews,1(9).

La versatilidad de la técnica FRXED le permite cuantificar elementos en diversas muestras de manera no destructiva, lo que la hace ampliamente utilizada en campos como la vigilancia ambiental, la medicina, la geología y la industria (Al-Merey et al., 2005). En la aplicación de la FRXED, existen diversos métodos que pueden emplearse para determinar la concentración de los elementos en las muestras. Estos incluyen el método de parámetros fundamentales, la calibración con estándares, la corrección con matriz, el análisis multivariado, entre otros. Estos métodos proporcionan diferentes enfoques para obtener mediciones precisas y confiables de la composición elemental de las muestras (Marguí et al., 2022; Panchuk et al., 2018).

#### ***2.5.1 Método de parámetros fundamentales***

El método de parámetros fundamentales es una técnica analítica avanzada que permite la cuantificación de elementos químicos basándose en un modelo teórico de la interacción de la radiación con la muestra (Panchuk et al., 2018). Este método se destaca por no requerir muestras estándar para su calibración, lo que lo hace especialmente eficiente para el análisis rápido de muestras desconocidas (Marguí et al., 2022).

El enfoque de los parámetros fundamentales se basa en cálculos teóricos que consideran parámetros específicos del equipo y las condiciones de irradiación, además de las intensidades observadas en las líneas características de los elementos (Fuente Merino, 2015). Estos cálculos abarcan factores como la absorción, los efectos interelementales, el espectro generado por la fuente de excitación y la eficiencia del detector (Al-Merey et al., 2005). Sin embargo, el método enfrenta el desafío de la incertidumbre relacionada con los elementos que no se pueden detectar

con fiabilidad mediante XRF, especialmente los elementos ligeros. La cantidad de estos elementos depende del equipo instrumental utilizado.

El método FP se considera integral, ya que una vez medida la intensidad en un material puro, esta medición se puede aplicar a cualquier muestra. En la práctica, es necesario realizar correcciones automáticas para ajustar los efectos de absorción y excitación causados por otros elementos presentes en la muestra (Fuente Merino, 2015). La precisión del método depende de la uniformidad en el procesamiento de la muestra y de una adecuada selección de la muestra estándar para calibrar la sensibilidad (Balasubramanian y Muthukumaraswamy, 2016). La sensibilidad a esta uniformidad puede describirse mediante la siguiente ecuación 2:

$$C_i = K_i * I_i * M_{is} \quad (2)$$

Dónde:

$C_i$  = Concentración del elemento en la muestra

$K_i$  = Coeficiente de calibración

$I_i$  = Intensidad del elemento en la muestra

$M_{is}$  = Factor de corrección de matriz

En el proceso de análisis cuantitativo, primero se convierte la intensidad medida en una escala teórica utilizando la sensibilidad del equipo, lo que permite una estimación preliminar de la composición de la muestra. Luego, se calcula la intensidad teórica basada en esta estimación y se compara con la intensidad medida obtenida. Con base en esta comparación, se ajustan las concentraciones para mejorar la precisión del análisis. Finalmente, se verifica la

convergencia para asegurar la exactitud de la concentración final. Si la diferencia entre la concentración anterior y la actual se reduce a un valor predeterminado, se considera que la concentración final es adecuada. Si la convergencia no es suficiente, el proceso se repite desde el principio hasta alcanzar el nivel de precisión requerido.

## **2.6 Instrumento de Absorción de Múltiples Longitudes de Onda para la determinación de Carbono Negro (MABI)**

Este instrumento, tiene la capacidad de cuantificar y distinguir el carbono negro, cuya procedencia principal puede atribuirse a fuentes vehiculares y a la quema de biomasa (Hristova et al., 2022; Traore et al., 2023). Este logro se alcanza a través de la evaluación de la transmisión de la luz mediante un filtro, utilizando diferentes longitudes de onda que son medidas tanto antes como después del muestreo (Anna Ryś y Samek, 2022).

El proceso de medición se fundamenta en el coeficiente de absorción de masa, el cual se ve directamente influenciado por factores cruciales como el tamaño de partícula, la refracción y la densidad de las partículas de carbono negro (Manohar et al., 2021). La longitud de onda de la luz utilizada en el análisis también desempeña un papel crucial en este proceso, como se refleja la siguiente ecuación 3.

$$D = \frac{M * V}{A} \quad (3)$$

Donde  $D$  es la densidad de área ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $A$  es el área recolectada del material particulado ( $\text{cm}^2$ ) y  $V$  es el volumen del aire ( $\text{m}^3$ ) muestreado. Además, la densidad está intrínsecamente correlacionada con la transmisión de la luz, como lo indica la siguiente ecuación 4.

$$I = I_0 * e^{\frac{-\epsilon D}{100}} \quad (4)$$

Aquí,  $I_0$  representa la transmisión obtenida antes del muestreo, e  $I$  es la transmisión después del muestreo, ambas a través del filtro. En esta ecuación,  $D$  representa la densidad del material absorbente, y  $\epsilon$  es el coeficiente de absorción de masa.

Esto permite determinar las variaciones en el tamaño de partícula y en la distribución de la densidad en las muestras recolectadas, directamente vinculadas a las fuentes predominantes de carbono negro en el entorno de muestreo específico.

La principal ventaja de este instrumento es su naturaleza no destructiva, que facilita mediciones tanto rápidas como precisas (Cohen et al., 2000). Este método innovador no se limita a cuantificar el carbono negro; también ofrece datos cruciales sobre su procedencia y distribución. Además, destaca por su versatilidad y portabilidad, tal como se ilustra en la Figura

**Figura 7.**

*Instrumento de Absorción de Múltiples Longitudes de Onda para la determinación de Carbono Negro*



*Nota:* Tomado de “MABI - A multi-wavelength absorption black carbon instrument for the measurement of fine light absorbing carbon particles”, Manohar et al.,2021, Atmospheric Pollution Research,4(12).

## **2.7 Factorización de Matriz Positiva (PMF)**

El PMF se destaca como un método de análisis estadístico que posibilita la identificación de las contribuciones presentes en un conjunto de datos (Jaeckels et al., 2007). Este enfoque, comúnmente empleado en la identificación de fuentes de contaminación, es particularmente útil en el estudio del material particulado. Una de las ventajas fundamentales de esta técnica radica en su capacidad para manejar tanto las concentraciones de los datos ambientales como las incertidumbres asociadas a ellos, siendo especialmente relevante en el ámbito de la ecología y la gestión medioambiental (Reff et al., 2007).

Este método funciona mediante análisis factorial para resolver un grupo de problemas teniendo en cuenta que los valores no pueden ser negativos, y para ello permite minimizar la carga de datos utilizando las incertidumbres de las mediciones de las concentraciones. Este

método proporciona una flexibilidad en el modelado y permite una utilización efectiva de la información contenida en los datos. Además, ha demostrado su eficacia en la modelización de receptores en diversas ubicaciones fuentes.(Gugamsetty et al., 2012).

## **2.8 Normativas de calidad de aire**

Las normativas de calidad del aire son el resultado de décadas de investigación científica sobre los efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud humana y el medio ambiente. Estas regulaciones se basan en estudios epidemiológicos, toxicológicos y de evaluación de riesgos que demuestran la relación entre la exposición a contaminantes y enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras (OMS, 2021).

### **2.8.1 Estándares Nacionales: ECA Aire (Perú)**

En el caso de Perú, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire, establecidos mediante el Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM, se fundamentan en evidencia epidemiológica local, como los estudios realizados en Lima y otras ciudades del país, los cuales han evidenciado una correlación directa entre los niveles elevados de PM<sub>2.5</sub> y el aumento de hospitalizaciones por afecciones respiratorias, particularmente en poblaciones vulnerables como niños y adultos mayores (Ilizarbe et al., 2020; SENAEMI, 2022) Nacional de Información Ambiental (SINIA) relacionada con emisiones vehiculares e industriales, con el objetivo de establecer límites que fueran técnica y económicamente alcanzables (MINAM, 2017).

A pesar de ser menos exigentes que las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), los ECA peruanos se alinean con el principio de progresividad ambiental, establecido en la Ley General del Ambiente (Ley N.º 28611, Art. V), permitiendo una adecuación gradual en función de las capacidades del país. Este marco legal establece además

la obligatoriedad del cumplimiento de los ECA, respaldado por el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (D.S. N.º 003-2017-MINAM), que detalla las metodologías de medición y los plazos para su implementación.

### **2.8.2 Estándares Internacionales. AAQC (Canadá)**

Por otro lado, los Ambient Air Quality Criteria (AAQC) de Canadá, administrados por Environment and Climate Change Canada (ECCC), constituyen un enfoque normativo basado en la evaluación integrada del riesgo. Estos criterios emplean modelos probabilísticos para determinar concentraciones de contaminantes consideradas "aceptables", basándose en estudios de cohorte a largo plazo, como el Canadian Census Health and Environment Cohort, y en datos específicos de contaminación recolectados en ciudades como Toronto y Vancouver (Health Canada, 2019).

Los AAQC se actualizan de forma bianual bajo el amparo del Canadian Environmental Protection Act (CEPA, 1999), incorporando constantemente hallazgos recientes, como la asociación entre la exposición a PM<sub>2.5</sub> y la diabetes reportada en investigaciones del año 2020. Asimismo, el modelo canadiense considera la diferenciación regional al aplicar estándares más estrictos en zonas con poblaciones vulnerables, como aquellas cercanas a escuelas u hospitales, en concordancia con el principio de justicia ambiental (ECCC, 2020).

### **2.8.3 Directrices de la OMS**

Las Directrices Globales de Calidad del Aire de la OMS (2021) constituyen el referente científico más riguroso a nivel internacional. Estas directrices se basan en metaanálisis de más de 500 estudios realizados en regiones como China, India y Europa, los cuales han demostrado que no existe un umbral seguro de exposición a partículas finas, ya que se han observado efectos negativos en la salud incluso a concentraciones tan bajas como 3 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> anual

(OMS, 2021). Además, estudios como el de Burnett et al.(2018) citado en la OMS, evidencian que por cada incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la exposición crónica a  $\text{PM}_{2.5}$  se puede reducir la expectativa de vida en aproximadamente 2.2 años.

El enfoque de la OMS es multidisciplinario, integrando conocimientos de toxicología como los efectos celulares de las  $\text{PM}_{2.5}$ , incluyendo inflamación y estrés oxidativo y de economía de la salud, al considerar el ahorro potencial en gastos sanitarios evitables, estimado en alrededor del 4.5 % del PIB global. Para los países en vías de desarrollo, la OMS propone metas intermedias por ejemplo, un límite anual de  $\text{PM}_{2.5}$  igual o menor a  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que permiten avanzar progresivamente hacia los valores ideales de calidad del aire (OMS, 2021).

### III. Método

#### 3.1 Tipo de investigación

El tipo investigación será experimental y explicativa, puesto que se realizará una recolección muestras y serán analizados en el laboratorio y con los datos obtenidos se determinará las fuentes contaminantes.

#### 3.2 Ámbito temporal y espacial

El estudio se llevó a cabo en el distrito de Jesús María, en la estación de Campo de Marte, la cual es operada por el SENAMHI. La estación se encuentra en las coordenadas -12.0705, -77.0433, localización que se ilustra en la Figura 8.

Para la realización de los análisis químicos, se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de Técnicas Analíticas, perteneciente al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), ubicado en la Av. José Saco Km. 13, Carabayllo.

**Figura 8.**

*(A) Distrito de Jesús María, (B) Campo de Marte, y (C) ubicación donde se llevó a cabo el muestreo*



*Nota: Las imágenes se obtuvieron de Google Earth*

### **3.3 Variables**

#### **3.3.1 Variable independiente**

Componentes de los aerosoles atmosféricos

#### **3.3.2 Variable dependiente**

Fuente contaminantes

### **3.4 Población y muestra**

#### **3.4.1 Población**

Los aerosoles atmosféricos dispersos en el área circundante a la estación Campo de Marte, ubicada en el distrito de Jesús María.

#### **3.4.2 Muestra**

Los aerosoles atmosféricos recolectados utilizando 80 filtros de cuarzo, cada uno con dimensiones de 203 mm x 254 mm.

### **3.5 Instrumentos**

- Muestreador de Alto Volumen (TISH TE – 6070DBLX-2,5)
- Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (EXP-1 de Amptek)
- Instrumento de Absorción de Múltiples Longitudes de Onda para la determinación de Carbono Negro (MABI)
- Detector Gamma (Canberra GC4018)
- Balanza Analítica (Mettler Toledo XP 205)
- Selladora (Impulse Sealer)
- Mufla (ISOLAB)
- Cabina de flujo laminar horizontal de la marca (AH-100 TELSTAR)
- Estufa (Memmert)

### 3.6 Procedimiento

#### 3.6.1 Procedimiento para el tratamiento de los filtros

Primero se realiza un pretratamiento con el fin de eliminar restos de materia orgánica en los filtros para lo cual se retiraron los filtros de los sobres manila usando guantes de nitrilo y pinzas de teflón. Posteriormente, se colocaron los filtros en un recipiente de pírex, asegurando que no entren en contacto directo con las paredes de la mufla como se muestra en la Figura 9. Luego, los filtros fueron sometidos a un tratamiento térmico en la mufla de a una temperatura de 500 °C y se mantiene durante un período de 5 horas.

**Figura 9.**

*Colocación de filtros de cuarzo en la Mufla*



*Nota: Elaboración propia*

Después de este proceso en la mufla, se examinarán las características del filtro, como su apariencia, forma y espesor. Luego, se inspeccionaron en busca de posibles rasgaduras, torceduras u otras imperfecciones, utilizando pinzas de teflón para manipular el filtro desde las esquinas. Si no se encontraron defectos, los filtros se transportarán en sobres manila, protegidos entre dos hojas bond, hasta el laboratorio.

Allí, los filtros son acondicionados a la temperatura y humedad del laboratorio durante un periodo de 24 horas. Posteriormente, se determina su peso por triplicado mediante el uso de una balanza analítica de 5 decimales. Una vez completada esta fase, los filtros son cuidadosamente colocados en sus respectivos sobres de manila. Finalmente, se transportan a la estación de Campo de Marte.

### **3.6.2 Procedimiento para el muestreo de PM<sub>2.5</sub>**

El procedimiento de muestreo comenzó con la calibración previa del equipo muestreador de alto volumen, cuyo certificado de calibración se puede consultar en el ANEXO 1. Posteriormente, se avanzó a la toma de muestras. Este paso se efectuó colocando cuidadosamente un filtro de cuarzo en el soporte del muestreador de alto volumen, detalle que se ilustra en la Figura 10. Una vez instalados, los filtros se expusieron al ambiente para muestrear durante 24 horas, permitiendo un margen de error de  $\pm 1$  hora. El ciclo de muestreo se estableció cada tres días, comenzando el 14 de marzo y finalizando el 29 de septiembre de 2023. A lo largo de este periodo, se mantuvo un flujo constante de aire a través del sistema de  $1600 \frac{m^3}{día}$ , asegurando así la precisión de los datos recolectados.

**Figura 10.**

*Colocación del filtro de cuarzo*



*Nota: Elaboración propia*

Una vez completado el proceso de muestreo, se registró el tiempo y volumen muestreado, anotando estos datos y almacenándolos junto con el filtro en un sobre designado. Subsiguientemente, los sobres que contienen los filtros fueron cuidadosamente envueltos en papel aluminio y colocados en un recipiente de polietileno, como se ilustra en la Figura 11. Luego, se resguardaron en una cámara climática, donde se mantuvieron a una temperatura constante de 18 °C, con un margen de  $\pm 3$  grados, y una humedad relativa del 65%. Finalmente, los filtros se transportaron en cajas acondicionadas al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

**Figura 11.***Resguardando los filtros de cuarzo**Nota: Elaboración propia*

### **3.6.3 Procedimiento para la determinación de la concentración de PM<sub>2.5</sub>**

En el laboratorio, los filtros fueron sometidos a un período de acondicionamiento de 24 horas. Este proceso se lleva a cabo en un entorno controlado, con la temperatura mantenida a 20 °C, con un margen de  $\pm 2$  grados y una humedad relativa del 65%. Posteriormente, utilizando pinzas de teflón y guantes de nitrilo, se procedió a colocar el filtro en la balanza analítica de 5 decimales. La medición se realizó en triplicado, anotando el peso del filtro de cuarzo.

Con base en los datos obtenidos durante el proceso de muestreo, se procedió a calcular la concentración de PM<sub>2.5</sub> utilizando la ecuación 5.

$$PM_{2.5} \left( \frac{\mu g}{m^3} \right) = \left( \frac{Pf - Pi}{V} \right) \quad (5)$$

Dónde:

Pf: = Peso del filtro de cuarzo después del muestreo ( $\mu g$ )

Pi = Peso del filtro de cuarzo antes del muestreo ( $\mu g$ )

V = Volumen de aire muestreado a través del filtro ( $m^3$ )

### 3.6.4 Procedimiento para el almacenamiento de los filtros muestreados

Las muestras se posicionaron en un dispositivo hecho de material acrílico, el cual actuó como guía para la cortadora de acero inoxidable, tal como se muestra en la Figura 12. Posteriormente, se procedió a cortar las muestras en dimensiones de 3x13 cm, obteniendo así tres piezas de estas medidas y una de 10x13 cm. Todo este proceso se llevó a cabo en el interior de una cabina de flujo laminar horizontal, como se observa en la Figura 13.

**Figura 12.**

*Guía acrílica y cortadora de acero inoxidable*



*Nota: Elaboración propia*

**Figura 13.***Cabina de flujo laminar horizontal**Nota: Elaboración propia*

Posteriormente, los bloques se envolvieron en papel mantequilla para garantizar su protección. Finalmente, las muestras fueron almacenadas en un cuarto con una temperatura constante de 18 °C. Estas condiciones controladas de almacenamiento aseguran la preservación adecuada de las muestras hasta su posterior análisis.

### **3.6.5 Procedimiento para el Análisis por Activación Neutrónica, utilizando el método del $k_{\text{subcero}}$ ( $k_0$ -INAA)**

Para la preparación de la muestra, se procedió a cortar los filtros obtenidos del muestreo a dimensiones de 3x3 cm utilizando tijeras de titanio. Tras el corte, estos se colocan en bolsas de polietileno de 4x4 cm. En la fase siguiente, dedicada a la preparación de los comparadores, se elaboró una solución de oro con una concentración de  $0.86025 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$ . Utilizando una micropipeta, se adicionaron 100  $\mu\text{l}$  de esta solución a un filtro de Whatman 42, previamente recortado a un tamaño de 3x3 cm. Tras pesar el filtro impregnado con la solución, se llevó a cabo un proceso de secado durante 24 horas, seguido de su empaque en bolsas de polietileno.

Posteriormente, la muestra y el comparador se colocaron en un contenedor de polietileno, como se muestra en la Figura 14, y se sellaron antes de ser introducidos en el sistema neumático de irradiación de muestras (SNIM) según se observa en la Figura 15 para su envío al reactor. Se programó un tiempo de 240 segundos para este proceso. La cápsula de polietileno fue transportada por el sistema y expuesta a una irradiación en la posición C7-2Y tal como se muestra en la Figura 16 de la piscina del reactor durante 238 segundos, a una potencia de 0.2 MW.

***Figura 14.***

*Envase de polietileno con la muestra y el comparador en su interior*



*Nota: Elaboración propia*

**Figura 15.***Estación del sistema neumático de irradiación de muestras (SNIM)**Nota: Elaboración propia***Figura 16.***Configuración del núcleo del reactor de investigación RP-10*

**Grilla del núcleo del reactor**

**Posición de irradiación**

|   | B | C  | D      | E       | F       | G       | H      | I  | J  |
|---|---|----|--------|---------|---------|---------|--------|----|----|
| 2 |   |    | Be     | Be      | Be      | Be      | Be     |    |    |
| 3 |   | CF | Be     | ECN-010 | ECC-001 | ECN-012 | Be     |    | CF |
| 4 |   | Be | Cl     | ECC-003 | ECN-010 | ECC-004 | Cl     | Be |    |
| 5 |   | Be | Cl     | ECN-003 | Cl      | ECN-005 | Cl     | Be |    |
| 6 |   | Be | ECN-22 | ECC-006 | ECN-010 | ECC-007 | ECN-17 | Be |    |
| 7 |   | Cl | Be     | ECN-015 | Cl      | ECN-019 | BCF    | Cl |    |
| 8 |   |    | Be     | Be      | Be      | Be      | Be     |    |    |
| 9 |   |    | CF     |         |         |         |        |    |    |

*Nota: Elaboración propia*

Para la medición de las muestras irradiadas, se utilizó un sistema de espectrometría gamma con detector de germanio hiperpuro de 70% de eficiencia relativa, Canberra GC7019 y FWHM = 1,9 keV a 1332,5 keV  $^{60}\text{Co}$ . La calibración del sistema se realizó con una fuente certificada de Eu-152, posicionada a 185 mm del detector.

Después de un adecuado tiempo de decaimiento, las muestras se midieron a 185 mm de distancia del detector, asegurando un tiempo muerto no mayor del 8%. Las muestras y comparadores se midieron por 3000 y 1000 segundos, respectivamente. Para adquisición de los datos de la medición se utilizó el software Genie 2000 y para los cálculos de la fracción de masa se utilizó el software NUCLI, elaborado en el laboratorio en macros - Excel.

Para asegurar la validez de los resultados, cada 20 muestras analizadas se realizó un control de calidad utilizando material de referencia SRM 1633c –NIST Coal Fly Ash (National Institute of Standard and Technology, 2011), preparando el SRM en bolsitas de polietileno, de las mismas dimensiones que las de la muestra, con una masa de aproximadamente  $0.270 \pm 0.004$  gramos del material de referencia, para su irradiación por 40 segundos. Los valores obtenidos se compararon con los valores certificados del material de referencia, aceptándose únicamente aquellos con un margen de error inferior al 3%. Los cálculos de concentración se realizaron utilizando la ecuación 1.

### ***3.6.7 Procedimiento para el Análisis por Fluorescencia de Rayos X Energía Dispersiva (FRXED)***

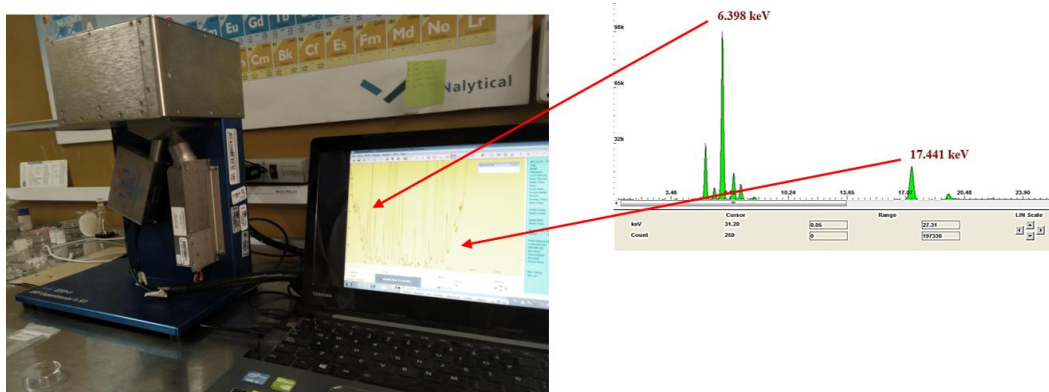
La calibración del sistema se realizó mediante la medición del material de referencia de acero inoxidable 316 del National Institute of Standards and Technology (NIST) durante 1000 segundos. Se empleó un voltaje de 80 kV y un amperaje de 40  $\mu$ A para este propósito. Este material tiene una composición que incluye 65.19% Fe, 18.45% Cr, 12.18% Ni, 2.38% Mo, 1.63% Mn y 0.16% Cu.

Se decidió seleccionar las energías  $K\alpha_1$  del Fe y Mo, con valores de 6.398 keV y 17.441 keV, respectivamente. Esta elección se basa en la amplia diferencia de energías entre todos los elementos presentes en el material de referencia 316. Esta selección permite calibrar un amplio

rango de energías y simplifica la determinación de múltiples elementos en una muestra. La Figura 17 ilustra estas energías seleccionadas como referencia para la calibración.

**Figura 17.**

*Calibración de Equipo FRXED mediante sus energías del Fe y Mo*

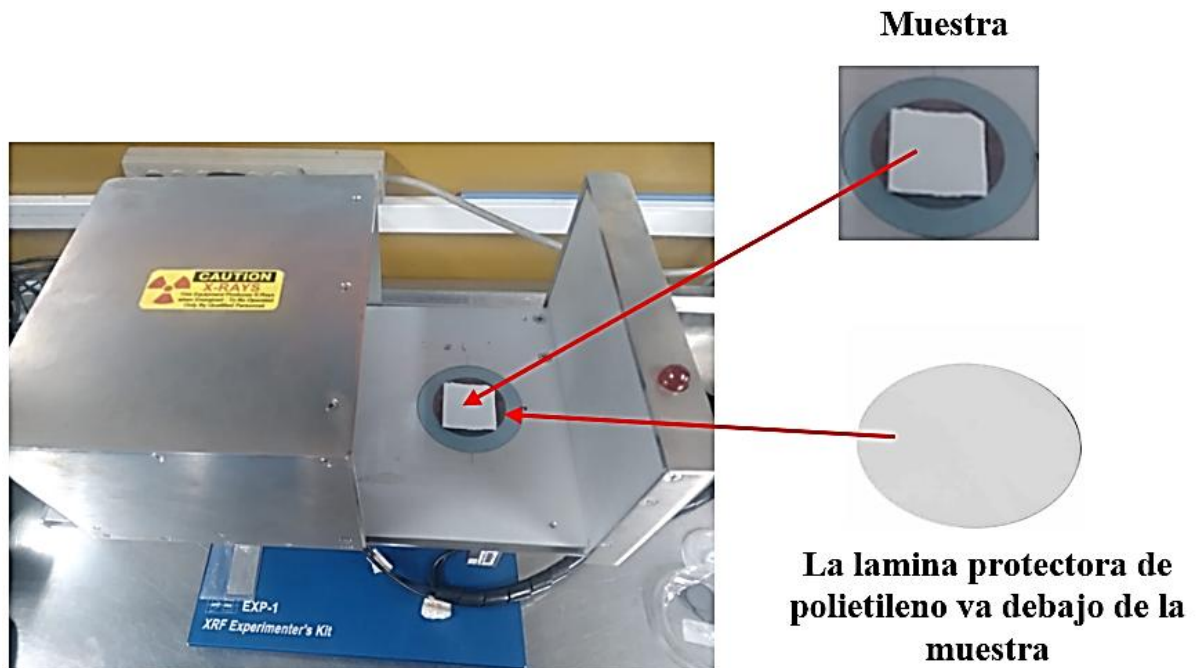


*Nota: Obtenido del software DppMCA*

La preparación de la muestra implicó cortar el filtro de cuarzo en dimensiones de 3x3 cm y posteriormente colocarlo dentro del equipo EXP-1 Complete XRF Experimenter's Kit, ver Figura 18. Se protegió la muestra con una lámina para disminuir el riesgo de contaminación del detector, como se ilustra en la Figura 18.

**Figura 18.**

*Posición de la muestra en la cabina del equipo de FRXED*



*Nota: Elaboración propia*

La medición se llevó a cabo durante 3000 segundos, utilizando un voltaje de 80 kV y un amperaje de 40  $\mu\text{A}$ . Luego, el software XRS-FP2 calculó las cuentas por segundo de las energías  $\text{K}\alpha_1$  correspondientes a varios elementos. Posteriormente, el software procesará los datos obtenidos para determinar la concentración utilizando el método de parámetros fundamentales mediante la ecuación 6.

$$I_i = \frac{I_0 C_i \mu_i Q \left( \frac{\Omega}{4\pi} \right)}{\mu_s + \mu_{s,Ei}} (1 - \exp(-\rho h(\mu_s + \mu_{s,Ei}))) \quad (6)$$

Donde:

$I_i$  = Intensidad del elemento i

$I_0$  = Intensidad inicial

$C_i$  = Concentración del elemento  $i$  ( $\frac{mg}{kg}$ )

$\mu$  = Coeficiente de absorción másica del elemento  $i$  ( $\frac{cm^2}{kg}$ )

$Q$  = Factor de excitación

$\mu_s$  = Coeficiente de absorción de la muestra ( $\frac{cm^2}{kg}$ )

$\mu_{s,Ei}$  = Coeficiente de absorción de la muestra a la energía de elemento  $i$  ( $\frac{cm^2}{kg}$ )

$\rho$  = Densidad de la muestra ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$h$  = recorrido del haz dentro de la muestra (m)

Para asegurar la validez de los resultados, cada 20 muestras analizadas se realizó un control de calidad utilizando material de referencia UCD 47 MLT BLK 103 el cual se puede observar en la Figura 19. Finalmente, se compararon los valores certificados por el material de referencia con aquellos obtenidos mediante los cálculos para el análisis por Fluorescencia de Rayos X Energía Dispersiva (FRXED) considerando válido únicamente aquellos valores con un margen de error inferior al 7%.

### Figura 19.

*Material de Referencia*



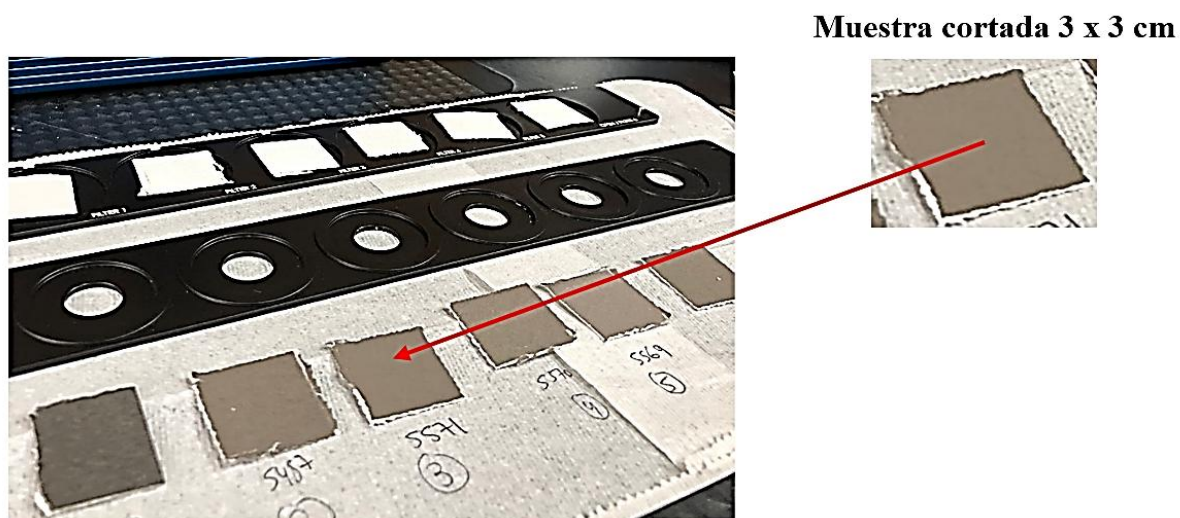
*Nota: Elaboración propia*

### 3.6.8 Procedimiento para el Análisis por el Instrumento de Carbono Negro de Absorción de Longitud de Onda Múltiple (MABI)

El primer paso consiste en la preparación de la muestra, la cual implica cortar tanto el filtro en blanco como la muestra en dimensiones de 3 x 3 cm. Este corte garantiza que el filtro encaje adecuadamente en el portamuestras del MABI, tal como se describe en la Figura 20.

**Figura 20.**

*Muestra cortadas en 3x3 cm y portamuestra del MABI*

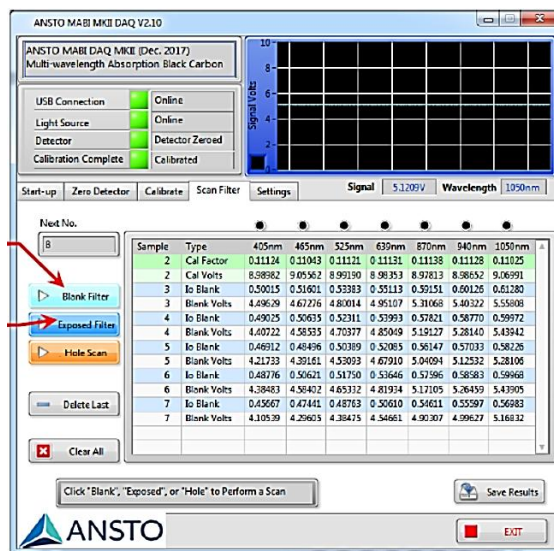


*Nota: Elaboración propia*

A continuación, se procede a la etapa de medición, para la cual se empleará el software MABI MKII DAQ V2.20 en la pestaña de medición, tal como se ilustra en la Figura 21. En esta fase inicial, se lleva a cabo la medición del filtro en blanco. El valor obtenido por su absorción en la longitud de onda de 639 nm se designa como  $I_0$ . Posteriormente, se realiza la medición en el filtro que contiene la muestra, y el valor resultante se asigna como  $I$ .

**Figura 21.**

*Pestaña de medición de la absorción de las 7 longitudes de onda*



*Nota: Obtenido del software MABI MKII DAQ V2.20*

El software detecta las siguientes absorciones en diferentes longitudes de onda: 405 nm, 465 nm, 525 nm, 639 nm, 870 nm, 940 nm y 1050 nm. De entre ellas, solo se empleará la absorción a 639 nm para determinar la concentración de Carbono Negro (CN), mientras que para el Carbono Negro proveniente de la quema de Biomasa (CNQ) se utilizarán las absorciones a 405 nm y 1050 nm.

Una vez recolectados los valores de absorción correspondientes a las longitudes de onda mencionadas, así como los datos de volumen, área y coeficiente de absorción de masa, se procederá a calcular la concentración de masa de CN, empleando el método propuesto por Ryś y Samek. (2021) , el cual hace uso de la siguiente ecuación 7.

$$CN(ngm^{-3}) = \frac{10^5 \cdot A}{\varepsilon \cdot V} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \quad (7)$$

Dónde:

A = área del filtro en ( $cm^2$ )

V = volumen de aire muestreado a través del filtro en ( $m^3$ )

E = Coeficiente de absorción de masa para el filtro ( $\frac{m^2}{gr}$ )

$I_0$  = transmisión de luz medida a través del filtro antes del muestreo

I = transmisión de luz medida a través del filtro después del muestreo

Para determinar la concentración de masa de CNQ, se utilizó el método propuesto por Ryś y Samek. (2021) , el cual hace uso de la siguiente ecuación 8.

$$CNQ(ngm^{-3}) = \lambda_{405} - \lambda_{1050} \quad (8)$$

### **3.6.9 Procedimiento para el análisis por el modelo de Factorización de Matriz Positiva (PMF)**

En el proceso de modelación, el primer paso fue dar el formato adecuado a la base de datos. Esto implicaba organizar la información en un archivo Excel de manera que el primer bloque del archivo, se incluía el código de la muestra, la fecha del muestreo y, posteriormente, las concentraciones de los elementos. Este formato fue diseñado para que el modelo de Factorización Matricial Positiva (PMF, por sus siglas en inglés) pudiera interpretar la

información de manera precisa y efectiva. El orden de los datos se encuentra detallado en la Figura 22.

**Figura 22.**

*Orden de ingreso de datos en el Excel*

|    | A    | B          | C      | D        | E          | F          | G          | H          | I          |
|----|------|------------|--------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1  | Site | Date       | PM 2.5 | BC       | Ca (ug/m3) | Pb (ug/m3) | Fe (ug/m3) | As (ug/m3) | Cr (ug/m3) |
| 2  | 1007 | 14/03/2023 | 30.53  | 1.546965 | 0.38       | 0.01       | 0.08       | 0.02       | 0.00       |
| 3  | 1008 | 16/03/2023 | 25.09  | 0.820167 | 0.19       | 0.01       | 0.07       | 0.01       | 0.00       |
| 4  | 1009 | 19/03/2023 | 18.62  | 0.78839  | 0.30       | 0.01       | 0.07       | 0.01       | 0.00       |
| 5  | 1010 | 21/03/2023 | 25.80  | 1.052096 | 0.33       | 0.01       | 0.08       | 0.01       | 0.00       |
| 6  | 1011 | 23/03/2023 | 26.70  | 1.097581 | 0.27       | 0.01       | 0.08       | 0.01       | 0.00       |
| 7  | 1012 | 26/03/2023 | 20.83  | 0.549293 | 0.24       | 0.01       | 0.08       | 0.01       | 0.00       |
| 8  | 1013 | 28/03/2023 | 33.18  | 0.95374  | 0.31       | 0.01       | 0.07       | 0.02       | 0.00       |
| 9  | 1014 | 30/03/2023 | 27.62  | 0.688236 | 0.37       | 0.01       | 0.07       | 0.01       | 0.00       |
| 10 | 1015 | 02/04/2023 | 18.07  | 0.828094 | 0.35       | 0.01       | 0.08       | 0.00       | 0.00       |
| 11 | 1016 | 04/04/2023 | 29.39  | 0.975127 | 0.35       | 0.01       | 0.06       | 0.01       | 0.00       |
| 12 | 1017 | 09/04/2023 | 30.25  | 0.494302 | 0.25       | 0.01       | 0.06       | 0.01       | 0.00       |
| 13 | 1018 | 11/04/2023 | 25.68  | 0.862666 | 0.29       | 0.00       | 0.07       | 0.01       | 0.00       |
| 14 | 1019 | 13/04/2023 | 43.92  | 0.629938 | 0.30       | 0.01       | 0.08       | 0.01       | 0.00       |
| 15 | 1020 | 16/04/2023 | 34.78  | 0.51665  | 0.28       | 0.01       | 0.06       | 0.01       | 0.00       |
| 16 | 1021 | 18/04/2023 | 19.90  | 0.614148 | 0.31       | 0.01       | 0.07       | 0.01       | 0.01       |
| 17 | 1022 | 20/04/2023 | 32.47  | 0.650874 | 0.33       | 0.00       | 0.07       | 0.00       | 0.00       |
| 18 | 1023 | 23/04/2023 | 66.81  | 1.133012 | 0.34       | 0.01       | 0.08       | 0.01       | 0.00       |

*Nota: Obtenido del software PMF – EPA.*

Una vez ordenado los datos se crean los 2 archivos para el modelo PMF. El primero, denominado archivo de datos de las concentraciones, contenía las concentraciones de las especies medidas. El segundo archivo, conocido como archivo de datos de incertidumbre, incluyó las incertidumbres asociadas a cada medición.

Para ingresar los datos al software, se procedió seleccionando la pestaña correspondiente en la Figura 23, la cual mostraba el apartado "Concentración Data File". Luego, se hizo clic en el botón "Browse" para seleccionar el archivo que contenía los datos de concentración. Posteriormente, se accedió a la pestaña "Uncertainty Data File", donde se repitió el proceso al hacer clic en "Browse" y se eligió el archivo que contenía las incertidumbres de los elementos.

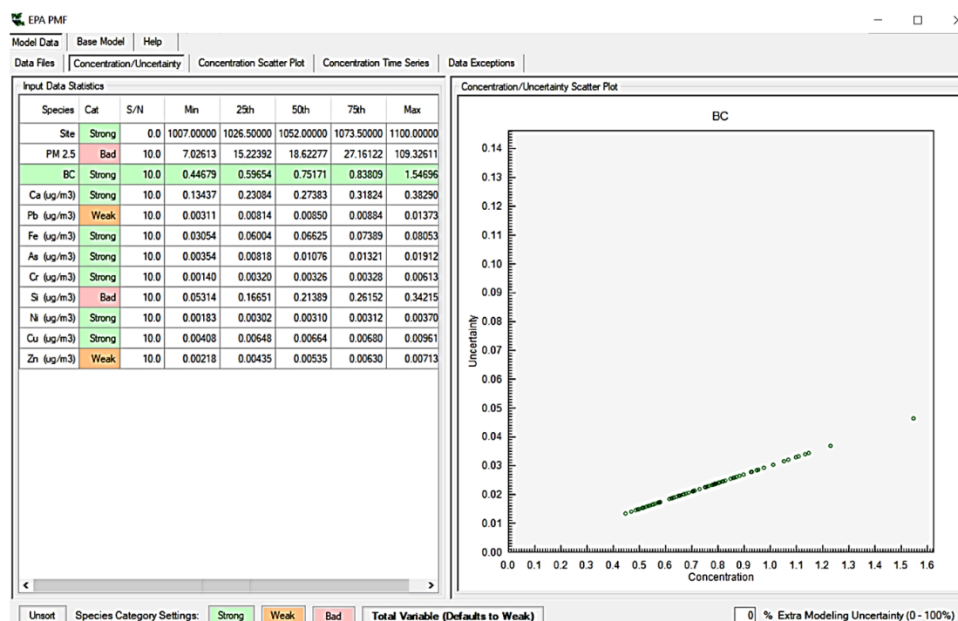
**Figura 23.**

*Pestaña del PMF para el ingreso de datos*

The screenshot shows the 'Data Files' tab in the PMF software. The 'Input Files' section contains two main entries: 'Concentration Data File' and 'Uncertainty Data File', both pointing to 'C:\Users\Rafael\Desktop\PMF DATOS.xls'. Below these are options for 'Date/Time Column' (set to 'Date'), 'ID/Species Column' (empty), and 'Missing Value Indicator' (set to '999'). The 'Output Files' section includes an 'Output Folder' field and an 'Output File Prefix' field. The 'Save File Locations and Settings' section has a 'Save' button and a 'Load' button. The bottom status bar shows 'HAVE Concentration Data' and 'HAVE Uncertainty Data'.

*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

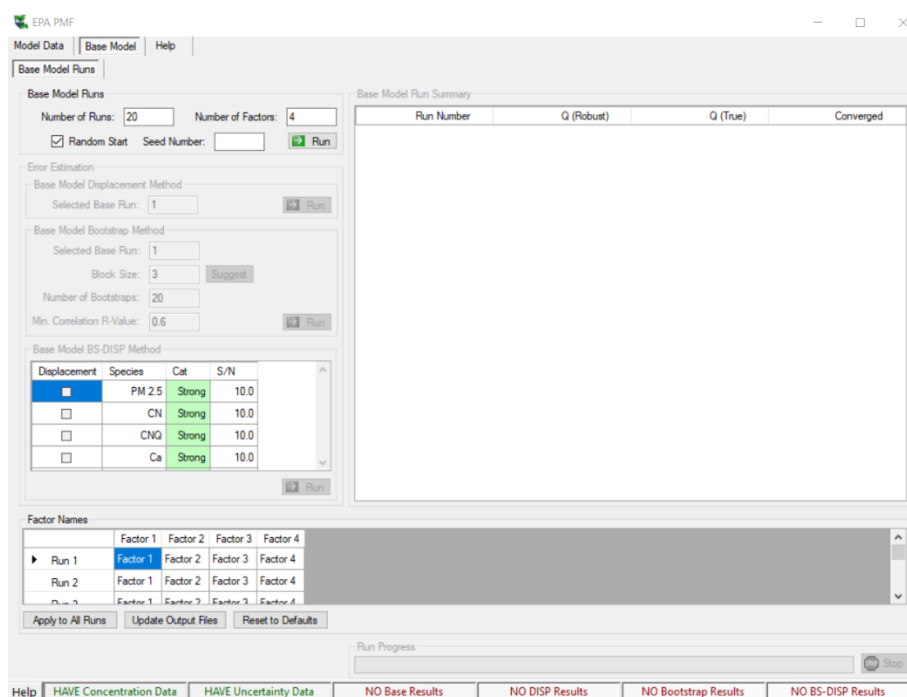
Con los datos ya ingresados en el software de PMF, el siguiente paso fue clasificar los elementos como "Strong" (fuerte), "Weak" (débil) o "Bad" (malo) según su nivel de correlación. Este proceso se realizó con el objetivo de trabajar exclusivamente con aquellos elementos que presentaran una baja incertidumbre y que representaran de manera más fidedigna el conjunto de datos para la identificación de fuentes contaminantes. La selección de datos según su correlación de la concentración versus su incertidumbre se visualiza en la Figura 24.

**Figura 24.***Pestaña del PMF para la selección de datos**Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

Para llevar a cabo el modelamiento, se seleccionó la opción "Base Model" dentro de la misma pestaña y se accedió a la sección "Base Model Runs" para proporcionar valores iniciales que permitieran ajustar el modelo de la manera más realista posible. Se estableció un valor de "Number of Runs" de 20 y un "Number of Factors" de 4, dejando los demás valores en modo automático para su ajuste, ver Figura 25.

**Figura 25.**

*Pestaña del PMF para el ingreso de factores y ejecuciones*

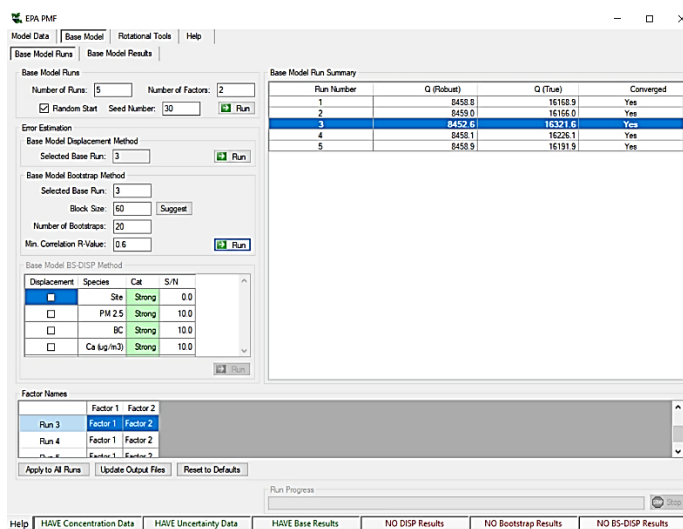


*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

Después de iniciar la interfaz y hacer clic en "Run", se generó un resumen del modelo base que comprendía 20 iteraciones para minimizar el margen de error estadístico. El software seleccionó automáticamente el valor óptimo para el modelo, basándose en el hecho de que tuviera un Q Robust menor. En este caso, el valor seleccionado fue "Run Number 1", como se muestra en la Figura 26.

**Figura 26.**

*Pestaña del PMF para seleccionar la mejor interacción*

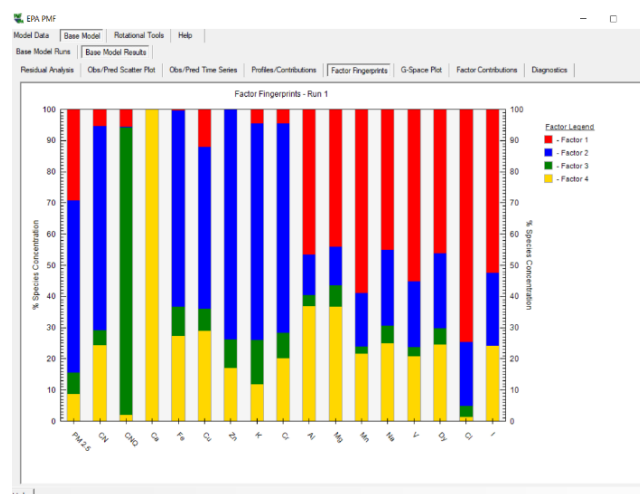


*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

Finalmente, al obtener los resultados, se accede a la sección de "Base Model Results", donde se encuentran habilitados los resultados. Dentro de esta sección, se encuentra la pestaña de "Profiles/Contributions", la cual analiza la influencia de cada especie en el factor identificado. Por otro lado, en la pestaña de "Factor Fingerprints", se muestra un resumen de todas las contribuciones. Esto se puede observar en la Figura 27.

**Figura 27.**

*Pestaña del PMF que muestra el resumen de los factores*



*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

### 3.7 Análisis de datos

Se procedió al análisis de los datos con el fin de obtener las incertidumbres y calcular los promedios, como la media aritmética, media geométrica, desviación estándar además de aplicar técnicas de regresión y correlación lineal utilizando tanto Microsoft Excel como SPSS. Estas herramientas se utilizaron para evaluar los elementos detectados mediante técnicas como la FRXED, AAN y MABI. También se utilizaron para generar diagramas de dispersión e histogramas, lo que facilitó la observación del comportamiento de los contaminantes y proporcionó una comprensión más completa de los mismos.

### 3.8 Consideraciones éticas

La presente investigación no involucró la participación directa de seres humanos ni animales, ni implicó el manejo de información personal o datos sensibles. Por tanto, no se presentaron consideraciones éticas relacionadas con consentimiento informado o confidencialidad de participantes. El estudio se desarrolló respetando los principios de

integridad científica, objetividad y transparencia en la obtención, procesamiento, análisis y presentación de los resultados.

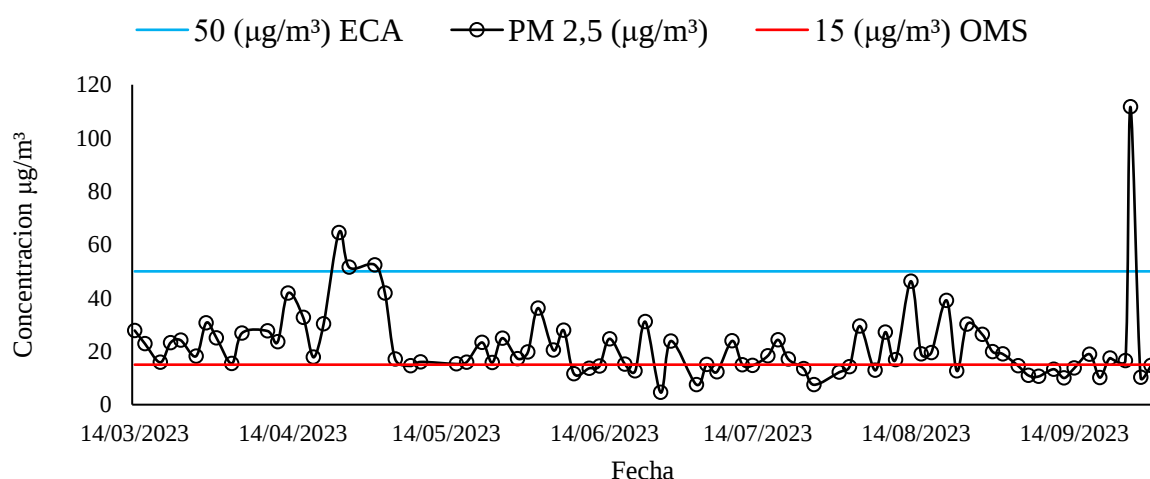
## IV. Resultados

### 4.1 Resultados de la concentración de PM2.5

Durante el periodo comprendido entre el 14 de marzo y el 29 de septiembre de 2023, se llevó a cabo el muestreo de PM2.5, registrando un total de 80 muestras. Las concentraciones obtenidas se muestran en la Figura 28, donde los círculos en negro representan la concentración de PM2.5 en  $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ . En dicha figura, se traza una línea azul que indica el valor máximo permitido de contaminantes en el ambiente de PM2.5 para un periodo de 24 horas, de acuerdo con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire establecidos por el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM del Perú. Asimismo, se traza una línea roja que representa el límite establecido en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) con respecto al promedio durante 24 horas de PM2.5, el cual es de  $15 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ .

**Figura 28.**

*Concentraciones de PM2.5 obtenidas durante el periodo de muestreo.*



La Tabla 1, proporcionando un resumen general del nivel de contaminación por PM 2.5 a lo largo del periodo de muestreo.

**Tabla 1.**

*Resumen de las concentraciones de PM 2.5 obtenidas durante el periodo de muestreo.*

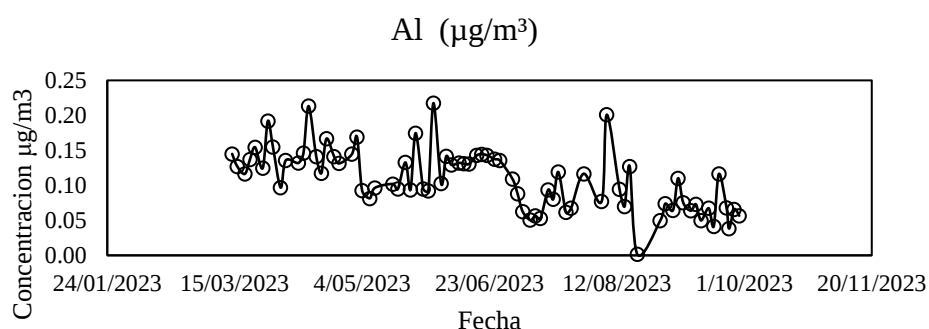
| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mediana<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| PM 2.5  | 22.4                                     | 18.2                                    | 4.6                                    | 111.7                                  | 14.7                                 |

#### 4.2 Resultados de los Análisis por Activación Neutrónica (AAN)

Mediante esta técnica se obtuvieron las concentraciones de los siguientes elementos Aluminio (Al), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Vanadio (V), Disprosio (Dy), Yodo (I), Cloro (Cl) y Manganeseo (Mn). Las concentraciones obtenidas durante el periodo de muestreo pueden ser visualizadas en las figuras del 29 al 36, acompañadas de sus correspondientes cuadros resumen del 2 al 9. Además, en la tabla correspondiente se incluyen los valores de concentración de Mn comparados con los Criterios de Calidad del Aire Ambiental de Ontario (AAQC), lo que permite evaluar si dichas concentraciones se encuentran dentro de los límites establecidos para la protección de la salud pública y el medio ambiente.

**Figura 29.**

*Concentraciones obtenidas del aluminio durante la campaña de muestreo*

**Tabla 2.**

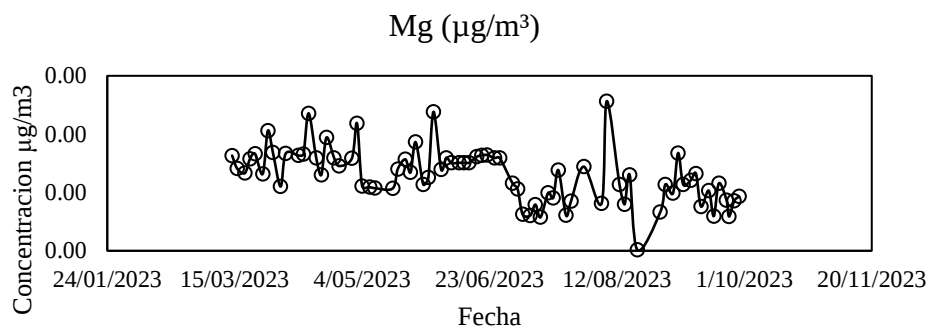
*Resumen de las concentraciones del Al obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|

|    |      |       |      |      |
|----|------|-------|------|------|
| Al | 0.11 | 0.002 | 0.22 | 0.04 |
|----|------|-------|------|------|

**Figura 30.**

*Concentraciones obtenidas del magnesio durante la campaña de muestreo*

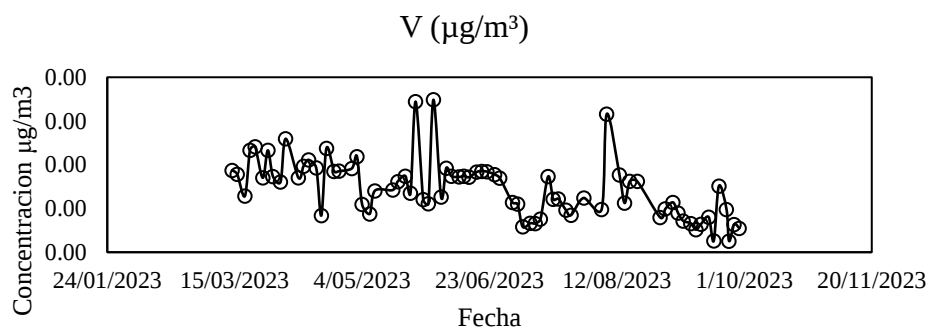
**Tabla 3.**

*Resumen de las concentraciones del Mg obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Mg      | 6.51E-04                              | 8.01E-06                            | 1.28E-03                            | 2.31E-04                          |

**Figura 31.**

*Concentraciones obtenidas del vanadio durante la campaña de muestreo*

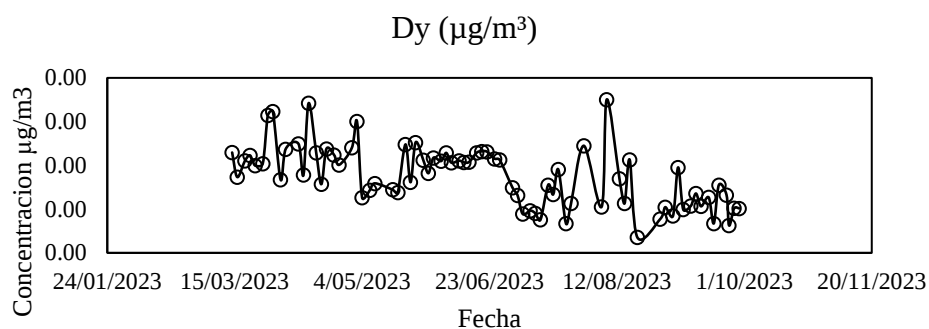
**Tabla 4.**

*Resumen de las concentraciones del V obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| V       | 7.33E-04                              | 1.28E-04                            | 1.74E-03                            | 3.35E-04                          |

**Figura 32.**

*Concentraciones obtenidas del disprosio durante la campaña de muestreo*

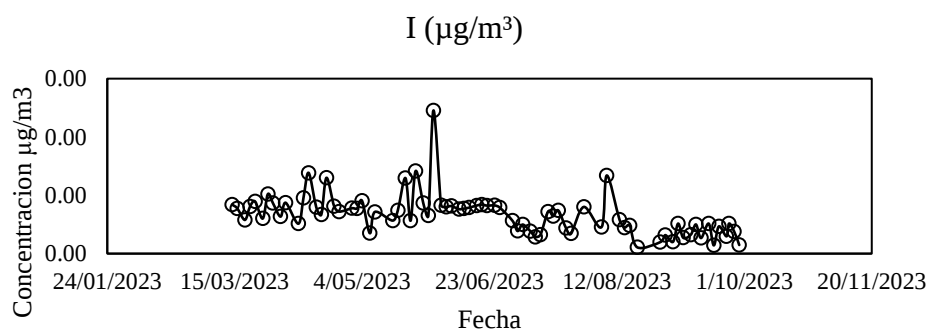
**Tabla 5.**

*Resumen de las concentraciones del Dy obtenidas durante el periodo de muestreo*

| <b>Especie</b> | <b>Promedio (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Mínimo (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Máximo (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Desv (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|----------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Dy             | 1.76E-03                                              | 3.56E-04                                            | 3.51E-03                                            | 6.91E-04                                          |

**Figura 33.**

*Concentraciones obtenidas del iodo durante la campaña de muestreo*

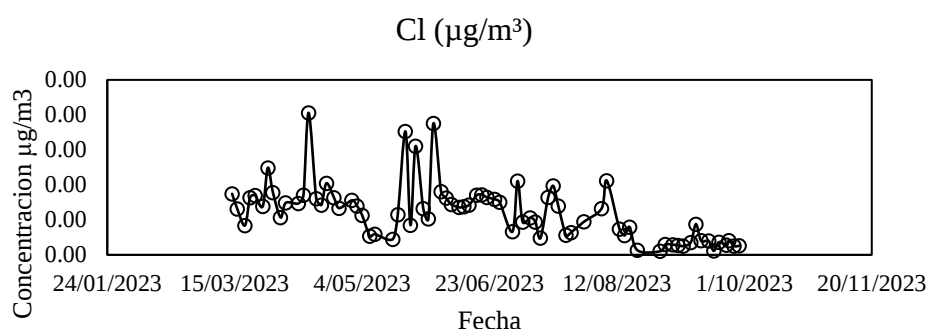
**Tabla 6.**

*Resumen de las concentraciones del I obtenidas durante el periodo de muestreo*

| <b>Especie</b> | <b>Promedio (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Mínimo (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Máximo (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Desv (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|----------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| I              | 3.37E-04                                              | 5.37E-05                                            | 1.23E-03                                            | 1.79E-04                                          |

**Figura 34.**

*Concentraciones obtenidas del cloro durante la campaña de muestreo*

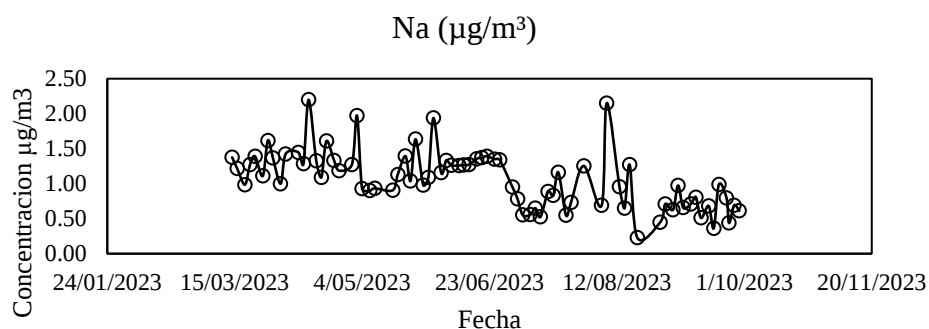
**Tabla 7.**

*Resumen de las concentraciones del Cl obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Cl      | 6.16E-04                              | 5.14E-05                            | 2.03E-03                            | 4.09E-04                          |

**Figura 35.**

*Concentraciones obtenidas del sodio durante la campaña de muestreo*

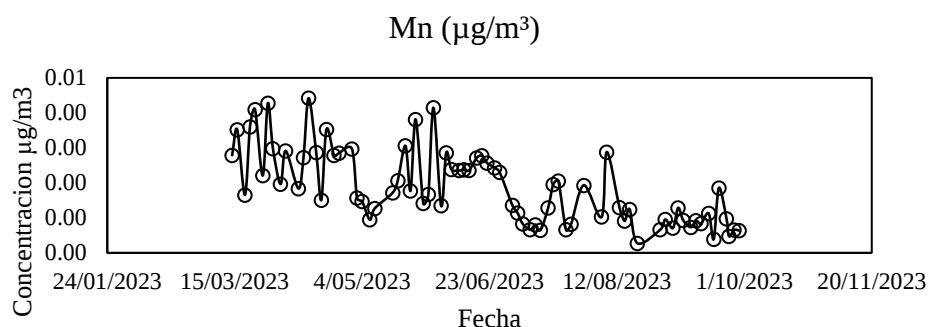
**Tabla 8.**

*Resumen de las concentraciones del Na obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Na      | 1.06783                               | 0.22791                             | 2.19877                             | 0.40692                           |

**Figura 36.**

*Concentraciones obtenidas del manganeso durante la campaña de muestreo*

**Tabla 9.**

*Resumen de las concentraciones del Mn obtenidas durante el periodo de muestreo*

| <b>Especie</b> | <b>Promedio<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Mínimo<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Máximo<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Desv<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>AAQC<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|----------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Mn             | 1.89E-03                                                  | 2.76E-04                                                | 4.42E-03                                                | 1.05E-03                                              | 2.00×-01                                              |

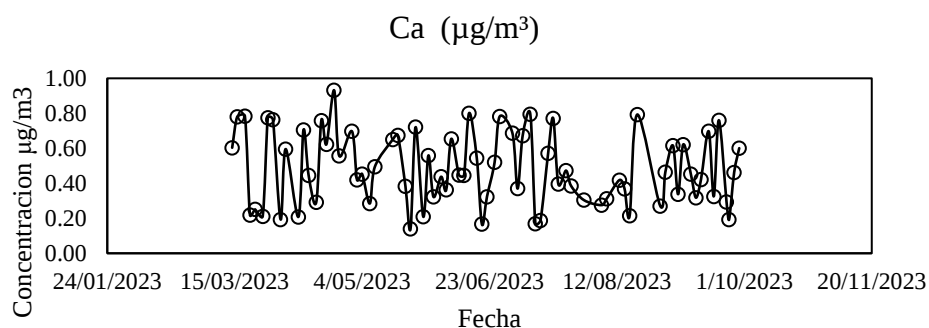
Finalmente, se llevó a cabo un control de calidad para verificar la confiabilidad y precisión del análisis mediante AAN. Para este propósito, se utilizaron el material de referencia Coal Fly Ash, cuyos valores certificados están disponibles en el ANEXO 2. Los resultados obtenidos se presentan en el ANEXO 3, los cuales indican que el porcentaje de desviación estándar relativa (% RSD) para los análisis de Al es del 6.2%, Mg 3.7%, Na 5.2%, V 2.4%, Dy 2.4%, y Mn 2.8%. De acuerdo con las normas de control de calidad, como la ISO 5725-2:1994, un % RSD inferior al 10% indica que los resultados son precisos y dentro de un rango aceptable para este tipo de análisis. Los valores obtenidos en este estudio cumplen con este criterio, lo que garantiza la confiabilidad de los resultados.

### 4.3 Resultados de Fluorescencia de Rayos X Energía Dispersiva (FRXED)

Mediante esta técnica se obtuvieron las concentraciones de los siguientes elementos Calcio (Ca), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Potasio (K) y Cromo (Cr). Las concentraciones obtenidas durante el periodo de muestreo pueden ser visualizadas en las figuras del 37 al 42, acompañadas de sus correspondientes cuadros resumen del 10 al 15. Asimismo, en la tabla correspondiente se incluyen los valores de concentración de Fe, Cu, Zn y Cr, comparados con los Criterios de Calidad del Aire Ambiental de Ontario (AAQC), lo que permite evaluar si dichas concentraciones se encuentran dentro de los límites establecidos para proteger la salud pública y el medio ambiente.

**Figura 37.**

*Concentraciones obtenidas del calcio durante la campaña de muestreo*



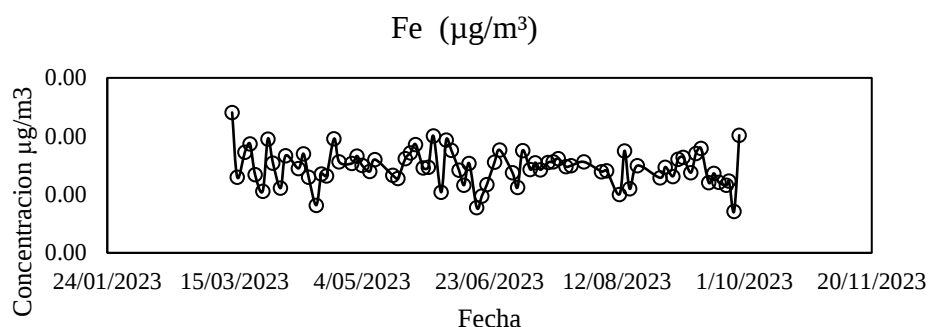
**Tabla 10.**

*Resumen de las concentraciones del Ca obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Ca      | 0.48                                  | 0.14                                | 0.93                                | 0.21                              |

**Figura 38.**

*Concentraciones obtenidas del hierro durante la campaña de muestreo*

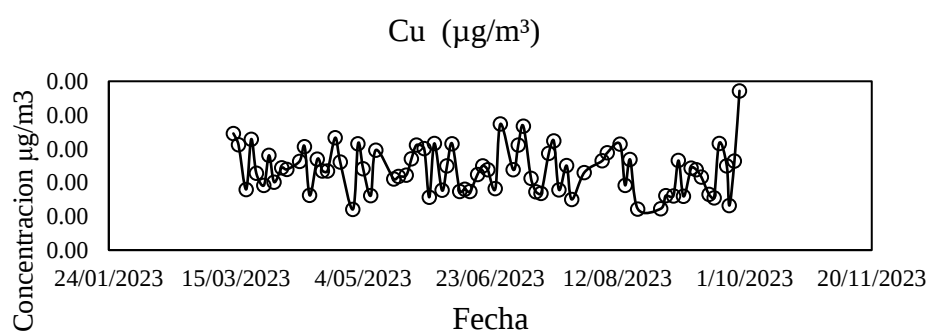
**Tabla 11.**

*Resumen de las concentraciones del Fe obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | AAQC<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Fe      | 1.47E-03                                 | 7.14E-04                               | 2.41E-03                               | 3.03E-04                             | 4.00× E-00                           |

**Figura 39.**

*Concentraciones obtenidas del cobre durante la campaña de muestreo*

**Tabla 12.**

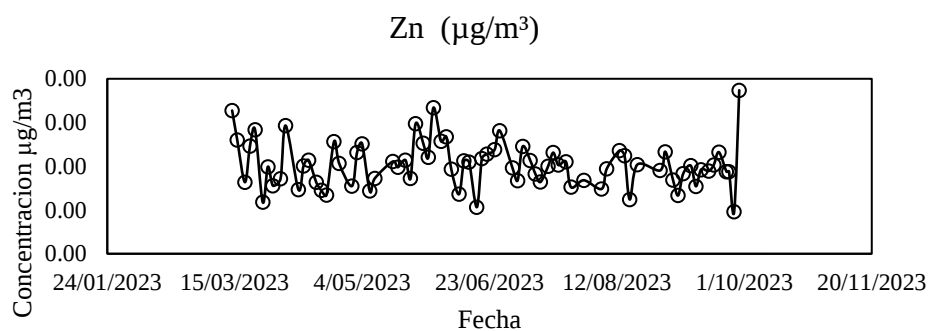
*Resumen de las concentraciones del Mn obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | AAQC<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|

Cu      1.20E-03      6.04E-04      2.36E-03      3.43E-04      5× E+01

**Figura 40.**

*Concentraciones obtenidas del zinc durante la campaña de muestreo*



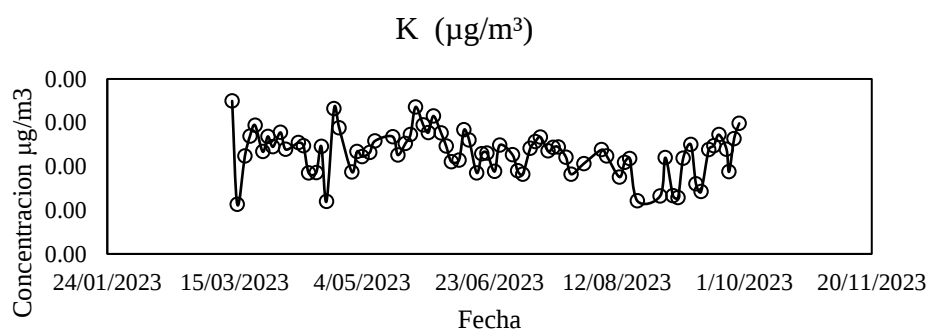
**Tabla 13.**

*Resumen de las concentraciones del Zn obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | AAQC<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Zn      | 1.02E-04                                 | 4.79E-05                               | 1.87E-04                               | 2.63E-05                             | 1.20E+02                             |

**Figura 41.**

*Concentraciones obtenidas del potasio durante la campaña de muestreo*



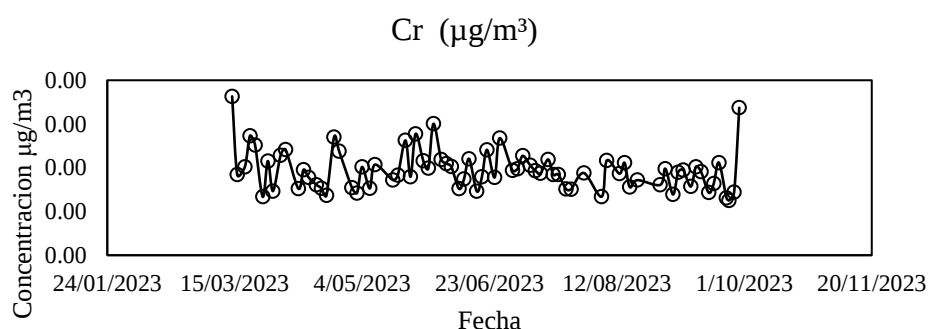
**Tabla 14.**

*Resumen de las concentraciones del K obtenidas durante el periodo de muestreo*

| <b>Especie</b> | <b>Promedio<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Mínimo<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Máximo<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Desv<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|----------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| K              | 2.31E-04                                                  | 1.14E-04                                                | 3.50E-04                                                | 5.04E-05                                              |

**Figura 42.**

*Concentraciones obtenidas del cromo durante la campaña de muestreo*

**Tabla 15.**

*Resumen de las concentraciones del Cr obtenidas durante el periodo de muestreo*

| <b>Especie</b> | <b>Promedio<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Mínimo<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Máximo<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Desv<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>AAQC<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|----------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Cr             | 9.74E-05                                                  | 6.26E-05                                                | 1.82E-04                                                | 2.34E-05                                              | 5.00E-01                                              |

Finalmente, se llevó a cabo un control de calidad para verificar la confiabilidad y precisión del análisis mediante FRXED. Para este propósito, se utilizaron el material de referencia UCD 47 MLT BLK 103, cuyos valores certificados están disponibles en el ANEXO 4. Los resultados obtenidos se presentan en el ANEXO 5, los cuales indican que el porcentaje de desviación estándar relativa (% RSD) para los análisis de Ca es del 3.8%, Fe 2%, Cu 5.5%, Zn 7%, K 2.1%, y Cr 5%. De acuerdo con las normas de control de calidad, como la ISO 5725-

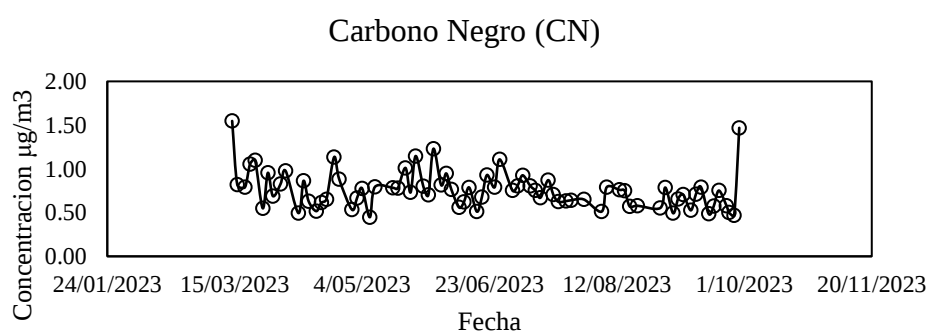
2:1994, un % RSD inferior al 10% indica que los resultados son precisos y dentro de un rango aceptable para este tipo de análisis. Los valores obtenidos en este estudio cumplen con este criterio, lo que garantiza la confiabilidad de los resultados.

#### 4.4 Resultados de los análisis mediante el MABI

Utilizando esta técnica, se han obtenido las concentraciones de Carbono Negro (CN) y Carbono Negro proveniente de la quema de Biomasa (CNQ), las cuales pueden ser visualizadas en las figuras 43 y 44 respectivamente, acompañadas de sus correspondientes cuadros resumen en las figuras 16 y 17.

**Figura 43.**

*Concentraciones obtenidas de carbono negro durante la campaña de muestreo*



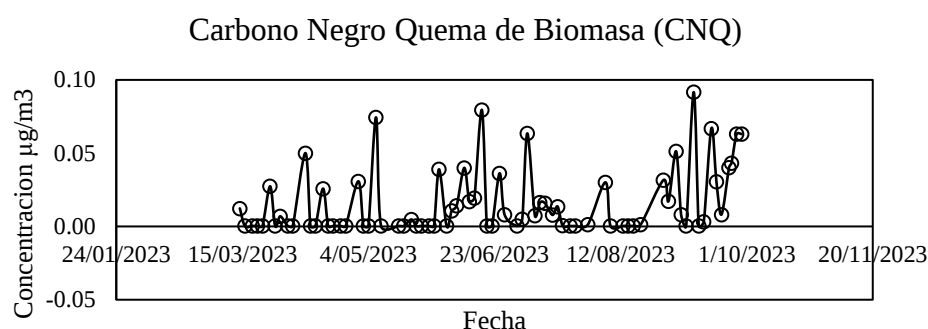
**Tabla 16.**

*Resumen de las concentraciones del CN obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| CN      | 0.76                                     | 0.45                                   | 1.55                                   | 0.22                                 |

**Figura 44.**

*Concentraciones obtenidas del CNQ durante la campaña de muestreo*

**Tabla 17.**

*Resumen de las concentraciones del CNQ obtenidas durante el periodo de muestreo*

| Especie | Promedio<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Mínimo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Máximo<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Desv<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| CNQ     | 1.59E-02                                 | 3.42E-04                               | 9.16E-02                               | 2.29E-02                             |

#### 4.5 Resultados de la evaluación mediante el PMF

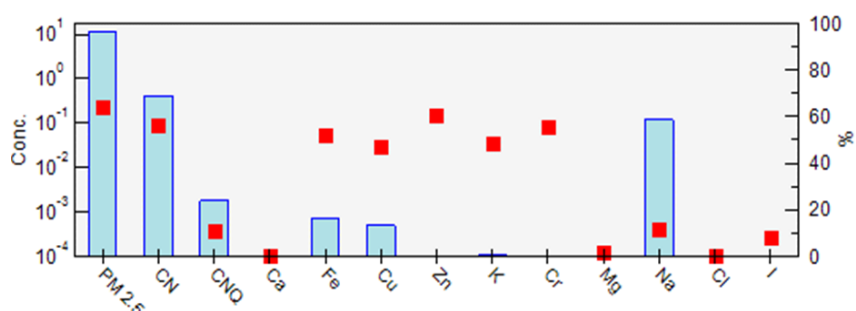
En el análisis realizado con el modelo de factorización de matrices positivas (PMF), se determinó que los elementos V, Mn, Al, así como Dy, exhibían altas incertidumbres y carencias de datos. Esta selección permitió excluir a estos elementos como el objetivo de reducir el impacto adverso que datos poco fiables podrían tener sobre la modelización, asegurando así la validez de los resultados finales.

El análisis mediante el software de PMF permitió identificar 4 factores distintos. La Figura 45 ilustra el Factor 1, donde se visualizan las barras azules indicando la concentración de cada especie y los cuadrados rojos señalando su contribución, al factor. Este primer factor destaca por la contribución porcentual significativa de varias especies, con Zn aportando un

60.4%, Fe 52%, Cr 55.7%, CN 56.2%, K 48.7%, Cu 46.9%, Na 11.6%, CNQ 11.3%, I 8.2%, Mg 1.5%, y Cl 0.1%.

**Figura 45.**

*Contribución de los elementos al Factor 1*

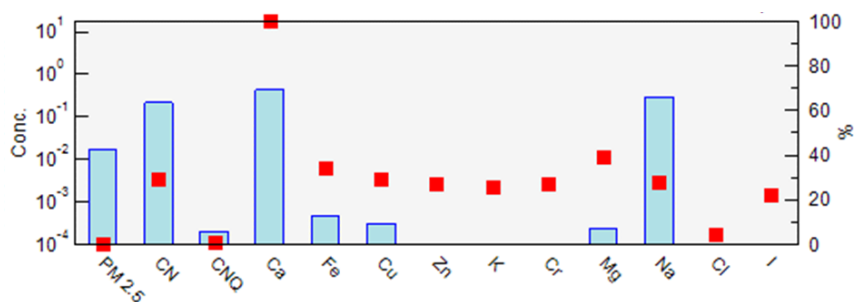


*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

Para el Factor 2, representado en la Figura 46, se observa que la contribución de cada especie es el siguiente Ca 100%, Mg 39%, Fe 34.7%, CN 29.7%, Cu 29.7%, Na 28.2%, Cr 27.6%, Zn 27.1%, I 22.3%, K 25.8%, Cl 4.4% y CNQ 1.2%.

**Figura 46.**

*Contribución de los elementos al Factor 2*

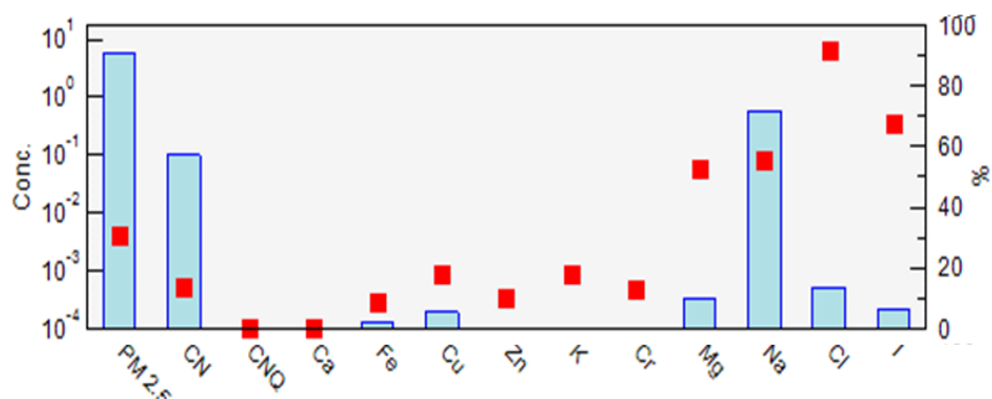


*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

Para el Factor 3, representado en la Figura 47, se observa que la contribución de cada especie es la siguiente: Cl 91.7%, I 67.4%, Na 55.6%, Mg 53.1%, Cu 18%, K 18%, CN 14.1%, Cr 13.2%, Zn 10.3%, y Fe 9.1%.

**Figura 47.**

*Contribución de los elementos al Factor 3*

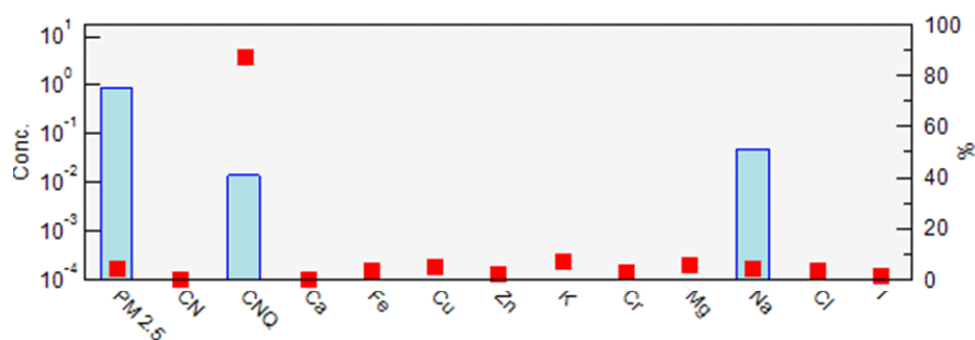


*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

Para el Factor 4, representado en la Figura 48, se observa que la contribución de cada especie es la siguiente: CNQ 87.5%, K 7.5%, Mg 6.3%, Cu 5.5%, Na 4.6%, Fe 4.1%, Cl 3.7%, Cr 3.5%, Zn 2.1%, e I 2.1%.

**Figura 48.**

*Contribución de los elementos al Factor 4*

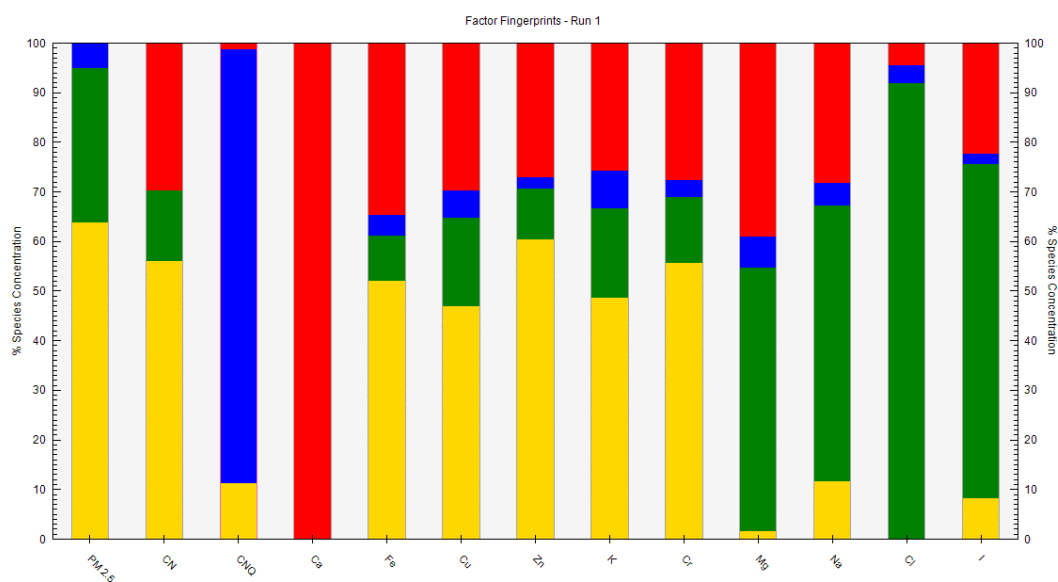


*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

En la Figura 49 se pueden visualizar las contribuciones de los elementos hacia los factores estudiados. El color amarillo representa el Factor 1, el rojo el Factor 2, el verde el Factor 3 y el azul el Factor 4. La contribución de estos 4 factores al PM2.5 es del 63.9 % para el Factor 1, 0.1 % para el Factor 2, 31.1 % para el Factor 3 y 4.9 % para el Factor 4.

**Figura 49.**

*Concentraciones de los elementos estudiados en relación con los 4 factores.*



*Nota: Obtenido del software PMF – EPA*

## V. Discusión de resultados

El promedio de concentración de PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María durante el período comprendido entre el 14 de marzo y el 29 de septiembre de 2023 fue de 22.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor es superior al promedio registrado para el mismo distrito durante el período 2010–2016, el cual fue de 16.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y también supera las concentraciones promedio reportadas para otros distritos del centro de Lima evaluados en ese mismo período, donde ningún distrito registró valores superiores a 21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tapia et al., 2020). Asimismo, al comparar los resultados del presente estudio con los reportados por Tapia et al. (2020) para Jesús María, se evidencia un incremento de 5.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración promedio de PM<sub>2.5</sub>, lo que podría indicar un deterioro de la calidad del aire en el distrito y un aumento en la exposición de la población al material particulado fino.

En comparación con otros distritos de Lima Metropolitana, la concentración promedio obtenida en este estudio fue inferior a la registrada en San Juan de Lurigancho, con 32.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Ate, con 29.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y La Molina, también con 29.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Asimismo, fue inferior al promedio de Lima Este, que alcanzó 29.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero superior al promedio de Lima Centro, que fue de 18.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , área geográfica a la que pertenece el distrito de Jesús María (Tapia et al., 2020).

Aunque este promedio se encuentra por debajo del límite máximo anual permitido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECAS) de Perú, que es de 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sugiere que, de acuerdo con las normativas peruanas, no hay un riesgo significativo para la salud pública ni para el medio ambiente debido a la concentración de PM<sub>2.5</sub> en el aire. No obstante, el promedio registrado no cumple con las directrices más estrictas establecidas en 2021 por la Organización

Mundial de la Salud (OMS), que fijan el límite de concentración anual de PM<sub>2.5</sub> en 5 µg/m<sup>3</sup>. Esta actualización se basa en investigaciones recientes que han demostrado los efectos adversos para la salud asociados con el PM<sub>2.5</sub>, incluso en concentraciones bajas, y en el aumento preocupante de enfermedades no transmisibles a nivel mundial, fenómeno vinculado con el envejecimiento demográfico y cambios en los estilos de vida (OMS, 2021).

En cuanto a los metales pesados presentes en el PM<sub>2.5</sub> (Fe, Mn, Cu, Zn y Cr), las concentraciones promedio fueron: Mn ( $1.89 \times 10^{-3}$  µg/m<sup>3</sup>), Fe ( $1.47 \times 10^{-3}$  µg/m<sup>3</sup>), Cu ( $1.20 \times 10^{-3}$  µg/m<sup>3</sup>), Zn ( $1.02 \times 10^{-4}$  µg/m<sup>3</sup>) y Cr ( $9.74 \times 10^{-5}$  µg/m<sup>3</sup>). Al compararse con los Criterios de Calidad del Aire Ambiental de Ontario (AAQC), cuyas referencias son Mn ( $2.00 \times 10^{-1}$  µg/m<sup>3</sup>), Fe (4.00 µg/m<sup>3</sup>), Cu (50 µg/m<sup>3</sup>), Zn (120 µg/m<sup>3</sup>) y Cr (0.5 µg/m<sup>3</sup>), se observa que todos los valores están muy por debajo de los límites permisibles. Esto indica que, aunque la concentración total de PM<sub>2.5</sub> excede el valor recomendado por la OMS, la fracción metálica no representa un riesgo según estándares internacionales.

El análisis de fuentes mediante el modelo PMF permitió identificar claramente los principales contribuyentes al PM<sub>2.5</sub> en la zona. Cada factor refleja la influencia de actividades específicas sobre la composición del material particulado, lo que brinda una base sólida para definir medidas de control.

De acuerdo a la Figura 45 el factor 1 se destaca por la contribución de los siguientes elementos Zn (60.4%), Fe (52%), CN (56.2%), K (48.7%) y Cu (46.9%). El CN, un contaminante indicador generado por la quema de gasolina y diésel (Li et al., 2020). El Zn es emitido por aceites de motor, mientras que el Cu y Fe también están asociados a emisiones por resuspensión del tráfico y el desgaste de frenos (Park et al., 2020). El K también está asociado

a las emisiones vehiculares, aunque en menor medida (Manousakas et al., 2017; Park et al., 2020). Por lo tanto, el factor 1 se identifica como emisiones vehiculares que contribuye con un 63.9% al PM<sub>2.5</sub>, tal como se muestra en la Figura 49. Este hallazgo es coherente con la información proporcionada por la Autoridad de Transporte Urbano en Lima y Callao (ATU), que indica que el parque automotor contribuye con el 58% de la contaminación del aire en Lima, según su segundo boletín de calidad ambiental (MTC, 2023).

De acuerdo a la Figura 46, el factor 2 se destaca por la contribución exclusiva del elemento Ca (100%). El calcio se considera un indicador de actividades de construcción (Liu et al., 2017). El Ca está presente en diversos materiales de construcción como tejas, paneles de yeso y cemento, y posee la capacidad de generar polvos finos que pueden liberarse al ambiente (McGee et al., 2003). Por lo tanto, el factor 2 se identifica como polvo de construcción y contribuye con un 0.1% al PM<sub>2.5</sub>, tal como se muestra en la Figura 49.

De acuerdo a la Figura 47, el factor 3 se destaca por la contribución de los siguientes elementos Cl (91.7%), I (67.4%), Na (55.6%) y Mg (53%). El Na, Cl y Mg están estrechamente relacionados con los aerosoles marinos, los cuales se generan debido a la interacción entre el viento y la superficie del océano (Manousakas et al., 2017; O'Dowd y de Leeuw, 2007; Song et al., 2001). La Tabla 8 muestra que las concentraciones de Na alcanzan 1.06 µg/m<sup>3</sup>, mientras que las de Cl son de 0.0061 µg/m<sup>3</sup>. Según Manousakas et al. (2017) estas bajas concentraciones del cloro sugieren que la sal marina detectada es una sal envejecida. Además, la presencia de iodo identificada en este factor ha sido descrita por Kolb (2020) en estudios sobre aerosoles marinos, donde se indica que procede de la fotólisis de CH<sub>2</sub>I<sub>2</sub>, un compuesto emitido por las algas que se descompone bajo la exposición a la luz solar. Esta incidencia se explica por la ubicación geográfica del distrito de Jesús María, cercano al mar.

La dirección predominante de los vientos, indicada por las rosas de los vientos como NOR-ESTE, refleja la influencia del anticiclón del Pacífico, tal como documentan (Aspajo, 2020; Erik, 2019). Por lo tanto, el factor 3 se identifica como aerosoles marinos y contribuye con un 31.1% al PM<sub>2.5</sub>, tal como se muestra en la Figura 49.

De acuerdo con la Figura 48, el factor 4 destaca por la significativa contribución del Carbono Negro proveniente de la quema de biomasa (CNQ), que representa el 87.5% de este factor. Este factor 4 contribuye con un 4.9% al PM<sub>2.5</sub>, como se ilustra en la Figura 49. Durante el período de muestreo, se registró una concentración promedio de 0.059  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , según se detalla en la Tabla 17. Esta cifra es notablemente baja en comparación con otras áreas donde la quema de biomasa es más prevalente; por ejemplo, en Cracovia, Polonia, donde en invierno se quema madera, la concentración promedio asciende a 0.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Ryś y Samek, 2022).

Esta diferencia subraya la relativamente baja presencia de este contaminante en el entorno urbano de Jesús María, lo cual era de esperarse, dado que en esta zona no suelen llevarse a cabo actividades de quema de materiales orgánicos, como madera, residuos agrícolas, desechos forestales y estiércol, que son más comunes en áreas rurales.

No obstante, la presencia de Carbono Negro proveniente de la quema de biomasa (CNQ) en Jesús María sugiere la posible influencia de los restaurantes del distrito, que a menudo utilizan leña y carbón como fuentes de combustible para cocinar. Además, es posible que la quema ocasional de maleza o hojas secas, así como la entrada de contaminantes desde otros distritos atraídos por los vientos, también contribuyan a la detección de este contaminante.

## VI. Conclusiones

- ❖ Se identificaron cuatro fuentes principales de emisión de PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María durante el año 2023 mediante el modelo de Factorización Positiva de la Matriz (PMF). Las emisiones vehiculares constituyeron la fuente predominante, con una contribución del 63.9 %, seguidas por los aerosoles marinos con 31.1 %, la quema de biomasa con 4.9 % y el polvo de construcción con 0.1 %. Estos resultados evidencian que el tránsito vehicular es la principal fuente de contaminación por PM<sub>2.5</sub> en el distrito, mientras que la contribución de los aerosoles marinos refleja la influencia de la ubicación geográfica y de las condiciones meteorológicas en la composición del material particulado.
- ❖ Se determinó que la concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María durante el período comprendido entre el 14 de marzo y el 29 de septiembre de 2023 fue de 22.4 µg/m<sup>3</sup>. Este valor fue superior al promedio histórico reportado para el distrito durante el período 2010–2016 (16.5 µg/m<sup>3</sup>), evidenciando un incremento en los niveles de material particulado fino. Asimismo, la concentración promedio se mantuvo por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) anual vigente en el Perú (25 µg/m<sup>3</sup>), pero superó en más de cuatro veces el valor guía anual establecido por la Organización Mundial de la Salud (5 µg/m<sup>3</sup>), lo que evidencia la persistencia de un potencial riesgo para la salud de la población expuesta.
- ❖ Se determinaron las concentraciones de los componentes del PM<sub>2.5</sub> mediante el Análisis de Activación Neutrónica (AAN), la Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (FRXED) y el Instrumento de Carbono Negro de Absorción de Longitud de Onda Múltiple (MABI). Las concentraciones promedio de los metales pesados

evaluados (Fe, Mn, Cu, Zn y Cr) fueron considerablemente inferiores a los valores establecidos por los Criterios de Calidad del Aire Ambiental de Ontario (AAQC), indicando que la fracción metálica analizada no representa un riesgo significativo de acuerdo con dichos criterios internacionales.

- ❖ El modelo de Factorización Positiva de la Matriz (PMF) permitió cuantificar la contribución de las principales fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub> en el distrito de Jesús María, determinándose que las emisiones vehiculares aportaron el 63.9 %, los aerosoles marinos el 31.1 %, la quema de biomasa el 4.9 % y el polvo de construcción el 0.1 %, confirmando el predominio de las emisiones vehiculares como principal fuente de contaminación por PM<sub>2.5</sub> en el área de estudio.

## **VII. Recomendaciones**

- ❖ Monitoreo a largo plazo de partículas PM2.5: Se sugiere realizar un monitoreo continuo y extendido en el tiempo de las partículas PM2.5 para asegurar la fiabilidad de los datos recopilados sobre la calidad del aire.
- ❖ Establecimiento de una red de monitoreo: Se recomienda la creación de una red de monitoreo en cada distrito representativo de la contaminación atmosférica. Esta medida aumentaría la precisión de los datos obtenidos y permitiría realizar predicciones más certeras sobre la calidad del aire en esas áreas.
- ❖ Análisis exhaustivo de emisiones: Es recomendable llevar a cabo un estudio detallado de las emisiones provenientes de las fuentes identificadas en el área de estudio. Esto permitirá comprender mejor el impacto de cada fuente en la contaminación del aire y orientar las medidas de mitigación adecuadas.
- ❖ Inventario de fuentes contaminantes: Se sugiere elaborar un inventario completo de las fuentes de contaminación, incluyendo fuentes puntuales, móviles y de área en cada distrito bajo investigación. Este inventario servirá como base para desarrollar estrategias de gestión ambiental efectivas.
- ❖ Estudio de la variabilidad temporal de las partículas: Es importante llevar a cabo un estudio detallado sobre la variabilidad temporal del material particulado, considerando factores como tamaño, forma y textura, con el fin de comprender mejor su impacto en la contaminación del aire a lo largo del tiempo.

- ❖ Cuantificación del material particulado: Se sugiere cuantificar el material particulado para determinar su impacto según su tamaño y variación horaria, lo cual proporcionará información crucial para evaluar y gestionar la calidad del aire de manera efectiva.

### VIII. Referencias

- Al-Merey, R., Karajou, J., & Issa, H. (2005). X-ray fluorescence analysis of geological samples: exploring the effect of sample thickness on the accuracy of results. *Applied Radiation and Isotopes*, 62(3), 501–508.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.04.020>
- Alvarez, D., & Suarez, L. (2020). Aporte cuantitativo de las fuentes de PM 10 y PM 2.5 en sitios urbanos del Valle del Mantaro, Perú. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(July 2007), 875–892.
- Asociacion de Española de Normalizacion (UNE). (2015). Método de medición gravimétrico normalizado para el determinación de la concertación másica PM10 o PM2,5 de la materia partícula suspensión. *Normas Españolas*.
- Aspajo, N. (2020). *Asociación entre la contaminación ambiental de exteriores por PM2.5 Y NO2 y los conteos mensuales de anemia en niños de 6 a 59 meses residentes en las zonas este y norte de la ciudad de Lima* [Universidad Peruano Cayetano Heredia].  
[https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/11561/Asociacion\\_AspajoVidal\\_Norma.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/11561/Asociacion_AspajoVidal_Norma.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ault, A. P., & Axson, J. L. (2017). Atmospheric Aerosol Chemistry: Spectroscopic and Microscopic Advances. *Analytical Chemistry*, 89(1), 430–452.  
<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04670>
- Balasubramanian, G., & Muthukumaraswamy, S. A. (2016). Element Analysis with Fundamental Parameters using an XRF Spectrum Analysis MATLAB Algorithm. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3.  
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212476583>

- Basith, S., Manavalan, B., Shin, T. H., Park, C. B., Lee, W.-S., Kim, J., & Lee, G. (2022). The Impact of Fine Particulate Matter 2.5 on the Cardiovascular System: A Review of the Invisible Killer. *Nanomaterials*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/nano12152656>
- Becerra, L., & Ramos, R. (2020). Evaluación del impacto en la salud por partículas pm 2.5 en sinaloa, méxico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 249–259. <https://doi.org/10.20937/RICA.53463>
- Bedregal, P., Ubillus, M., Olivera, P., Garay, R., Rojas, J., Zafra, R., & Urdanivia, R. (2023). Determination of atmospheric aerosol components in an urban area to evaluate the air quality and identify the sources of contamination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10967-023-08805-8>
- Bernstein, D. M., & Kleinman, M. (1976). A High-Volume Sampler for the Determination of Particle Size Distributions in Ambient Air. *Air Pollution Control Association, February 2015*. <https://doi.org/10.1080/00022470.1976.10470362>
- Berthouex, P., & Brown, L. (2013). *Pollution Prevention and Control II - Material and Energy Balances*. bookboon Learning.
- Bode, P. (2017). *Neutron Activation Analysis (NAA) BT - Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage* (N. Kardjilov & G. Festa (eds.); pp. 209–219). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33163-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33163-8_10)
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., ... Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38), 9592–9597.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>

Carbajal, L., Barraza-Villarreal, A., Durand-Pardo, R., Moreno-Macías, H., Espinoza-Lain, R., Chiarella-Ortigosa, P., & Romieu, I. (2007). Impact of traffic flow on the asthma prevalence among school children in Lima, Peru. *Journal of Asthma*, 44(3), 197–202. <https://doi.org/10.1080/02770900701209756>

Chen, Q. X., Huang, C. L., Xiao, T., Yuan, Y., Mao, Q. J., & Tan, H. P. (2019). Characterization of atmospheric aerosols and source apportionment analyses in urban Harbin, northeast China. *Infrared Physics and Technology*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103109>

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Morawska, L., Iii, C. A. P., Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., Dingenen, R. Van, Donkelaar, A. Van, Vos, T., Murray, C. J. L., & Forouzanfar, M. H. (2017). Articles Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 6736(17), 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)

Cohen, D., Taha, G., Stelcer, E., Garton, D., & Box, G. (2000). The measurement and sources of fine particle elemental carbon at several key sites in NSW over the past eight years. *Journal of Geophysical*, 102.

Correa Puerta, D. (2012). *Aplicação do método K.-INAA no laboratório de análise por ativação com nêutrons do IPEN utilizando o programa K<sub>o</sub> -IAEA. Análise de amostras biológicas* [Universidade de São Paulo]. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-22082013-143640/publico/2013PuertaAplicacao.pdf>

- Drescher, A., Yoho, M., & Landsberger, S. (2018). Gamma–gamma coincidence in neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 318(1), 527–532. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6033-8>
- Duarte, A. L., Schneider, I. L., Artaxo, P., & Oliveira, M. L. S. (2022). Spatiotemporal assessment of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) and ozone in a Caribbean urban coastal city. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 101168. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101168>
- Environment and Climate Change Canada. (2020). *Guidance on Considering Vulnerable Populations in Air Quality Management*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-pollution/pollutants/common-contaminants/particulate-matter/guidance-vulnerable-populations.html>
- EPA. (1999). Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM<sub>10</sub> using high volume (HV) sampler. *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air*, June.
- Erik, M. (2019). *Modelo Estocástico para el pronóstico de la concentración del Material Particulado (PM<sub>10</sub>) en los distritos de Jesús María y Ate Vitarte, 2019* [Universidad César Vallejo]. [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/64909/Merino\\_NEG-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/64909/Merino_NEG-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fogelbach, G. G., Ramon, G. D., Staffeld, P. L., Mario, A., Sarabia, C., Augusto, C., Reyes, S., Duarte, P. A., Calderón, O. M., Helena, F., Romero, C., & Diaz, S. G. (2020). *Contaminación atmosférica en América Latina : impacto en la salud Y regulación actual - reporte del grupo del Comité de Aerobiología de la Sociedad Latinoamericana de Asma*

, *Alergia e Inmunología*. 4(4), 423–434.

- Franzin, B. T., Guizellini, F. C., de Babos, D. V., Hojo, O., Pastre, I. A., Marchi, M. R. R., Fertonani, F. L., & Oliveira, C. M. R. R. (2020). Characterization of atmospheric aerosol (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) from a medium sized city in São Paulo state, Brazil. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 89(October), 238–251. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.09.014>
- Fuente Merino, I. (2015). *Puesta a punto de un equipo de fluorescencia de rayos X portátil con fuentes radiactivas: Aplicaciones medioambientales* [Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/6787>
- Government of Canada. (1999). *Canadian Environmental Protection Act, 1999 (CEPA)*. <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/c-15.31/>
- Greenberg, R. R., Bode, P., & De Nadai Fernandes, E. A. (2011). Neutron activation analysis: A primary method of measurement. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 66(3), 193–241. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2010.12.011>
- Grisales, H., Montealegre, N., Ospina, D., Piñeros, J., & Nieto, E. (2022). Relación de PM<sub>2.5</sub> y Enfermedad Respiratoria Aguda en un territorio de Colombia: Modelos Aditivos Generalizados Resumen Introducción. *Universidad y Salud*. <https://doi.org/10.22267/rus.222401.256>
- Gugamsetty, B., Wei, H., Liu, C.-N., Awasthi, A., Hsu, S.-C., Tsai, C.-J., Roam, G.-D., Wu, Y.-C., & Chen, C.-F. (2012). Source Characterization and Apportionment of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>0.1</sub> by Using Positive Matrix Factorization. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(4), 476–491. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.04.0084>
- Hartinger, S. M., Yglesias-González, M., Blanco-Villafuerte, L., Palmeiro-Silva, Y. K.,

- Lescano, A. G., Stewart-Ibarra, A., Rojas-Rueda, D., Melo, O., Takahashi, B., Buss, D., Callaghan, M., Chesini, F., Flores, E. C., Gil Posse, C., Gouveia, N., Jankin, S., Miranda-Chacon, Z., Mohajeri, N., Helo, J., ... Romanello, M. (2023). The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act. *The Lancet Regional Health - Americas*, 20, 100470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lana.2023.100470>
- Health Canada. (2019). *Health Impacts of Air Pollution in Canada: Estimates of Morbidity and Premature Mortality Outcomes*. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/health-impacts-air-pollution.html>
- Herrera, J., Rodríguez, S., & Rojas, J. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 25(506), 54–63.
- Hristova, E., Georgieva, E., Veleva, B., Neykova, N., Naydenova, S., Gonsalvesh-Musakova, L., Neykova, R., & Petrov, A. (2022). Black Carbon in Bulgaria—Observed and Modelled Concentrations in Two Cities for Two Months. *Atmosphere*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/atmos13020213>
- Huamán De La Cruz, A., Bendezu Roca, Y., Suarez-Salas, L., Pomalaya, J., Alvarez Tolentino, D., & Gioda, A. (2019). Chemical Characterization of PM<sub>2.5</sub> at Rural and Urban Sites around the Metropolitan Area of Huancayo (Central Andes of Peru). *Atmosphere*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/atmos10010021>
- Ilizarbe, G., Rojas, J., Cabello, R., Ugarte, C., Reynoso, P., & Valdiviezo, L. (2020). Chemical characteristics and identification of PM<sub>10</sub> sources in two districts of Lima, Peru. *DYNA (Colombia)*, 87(215), 57–65. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.83688>

INACAL. (2019). *MONITOREO DE CALIDAD AMBIENTAL. Calidad de aire. Método de referencia para la determinación de material particulado respirable como PM10 en la atmósfera. Lima 27.*

Jaeckels, J. M., Bae, M.-S., & Schauer, J. J. (2007). Positive Matrix Factorization (PMF) Analysis of Molecular Marker Measurements to Quantify the Sources of Organic Aerosols. *Environmental Science & Technology*, 41(16), 5763–5769. <https://doi.org/10.1021/es062536b>

Jain, S., Sharma, S. K., Vijayan, N., & Mandal, T. K. (2020). Seasonal characteristics of aerosols (PM2.5 and PM10) and their source apportionment using PMF: A four year study over Delhi, India. *Environmental Pollution*, 262, 114337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114337>

Keijzer, C. De, Agis, D., Ambrós, A., Arévalo, G., Baldasano, J. M., Bande, S., Barrera-gómez, J., Benach, J., Cirach, M., & Dadvand, P. (2016). The association of air pollution and greenness with mortality and life expectancy in Spain : A small-area study. *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.009>

Kleeman, M., Robert, M., Riddle, S., & Jakoraber, C. (2007). Source Apportionment of Fine and Ultrafine Particles in California. *REPORT TO THE CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD, August 2007.*

Kolb, C. E. (2002). Iodine's air of importance. *Nature*, 417(6889), 597–598. <https://doi.org/10.1038/417597a>

Kwon, L., & Man, W. (2018). Vertical Profiling of Aerosol Optical Properties From LIDAR Remote Sensing, Surface Visibility, and Columnar Extinction Measurements. In *Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation*. Elsevier Inc.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810437-8.00002-5>

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *LETTER*. <https://doi.org/10.1038/nature15371>

Levine, J. S. (2014). 5 . 5 Biomass Burning : The Cycling of Gases and Particulates from the Biosphere to the Atmosphere. In *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 4, Issue 1990). Published by Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00405-8>

Li, Y., Liu, B., Xue, Z., Zhang, Y., Sun, X., Song, C., Dai, Q., Fu, R., Tai, Y., Gao, J., Zheng, Y., & Feng, Y. (2020). Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> using PMF modelling coupled with 1-hr resolution online air pollutant dataset for Linfen, China. *Environmental Pollution*, 263, 114532. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114532>

Linares, C., & Díaz, J. (2009). Efecto de las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras (PM<sub>2.5</sub>) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid. *Gac Sanit*, 23(3), 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2008.04.006>

Linares, C., Díaz, J., Tobías, A., Miguel, M., & Otero, A. (2006). Impact of urban air pollutants and noise levels over daily hospital admissions in children in Madrid : a time series analysis. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 143–152. <https://doi.org/10.1007/s00420-005-0032-0>

Liu, B., Wu, J., Zhang, J., Wang, L., Yang, J., Liang, D., Dai, Q., Bi, X., Feng, Y., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2017). Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> based on error estimation from EPA PMF 5 . 0 model at a medium city in China. *Environmental Pollution*, 222, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.005>

- Ma, Y., Tigabu, M., Guo, X., Zheng, W., Guo, L., & Guo, F. (2019). Water-Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Emission During Forest Fires in Chinese Boreal and Subtropical Forests: An Indoor Experiment. *Forests*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/f10110994>
- Manohar, M., Atanacio, A., Button, D., & Cohen, D. (2021). MABI - A multi-wavelength absorption black carbon instrument for the measurement of fine light absorbing carbon particles. *Atmospheric Pollution Research*, 12(4), 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.02.009>
- Manousakas, M., Papaefthymiou, H., Diapouli, E., Migliori, A., & Karydas, A. G. (2017). Science of the Total Environment Assessment of PM<sub>2.5</sub> sources and their corresponding level of uncertainty in a coastal urban area using EPA PMF 5.0 enhanced diagnostics. *Science of the Total Environment*, 574, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.047>
- Marguí, E., Queralt, I., & de Almeida, E. (2022). X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: Basic principles, instrumentation, applications and recent trends. *Chemosphere*, 303, 135006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135006>
- Mathew, J., Kshirsagar, R., Abidin, D. Z., Griffin, J., Kanarachos, S., James, J., Alamaniotis, M., & Fitzpatrick, M. E. (2023). A comparison of machine learning methods to classify radioactive elements using prompt-gamma-ray neutron activation data. *Scientific Reports*, 13(1), 9948. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36832-8>
- McGee, J. K., Chen, L. C., Cohen, M. D., Chee, G. R., Prophete, C. M., Haykal-Coates, N., Wasson, S. J., Conner, T. L., Costa, D. L., & Gavett, S. H. (2003). Chemical analysis of World Trade Center fine particulate matter for use in toxicologic assessment.

- Environmental Health Perspectives*, 111(7), 972–980. <https://doi.org/10.1289/ehp.5930>
- Mellouki, A., Wallington, T. J., & Chen, J. (2015). Atmospheric Chemistry of Oxygenated Volatile Organic Compounds: Impacts on Air Quality and Climate. *Chemical Reviews*, 115(10), 3984–4014. <https://doi.org/10.1021/cr500549n>
- Mi, K., Zhuang, R., Zhang, Z., Gao, J., & Pei, Q. (2019). Spatiotemporal characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its associated gas pollutants, a case in China. *Sustainable Cities and Society*, 45, 287–295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.004>
- Mielnicki, D., Canziani, P., Drummond, J., & Skalany, J. (2014). *La quema de biomasa en sudamérica vista desde el espacio*. May.
- Molnár, P., Bellander, T., Sallsten, G., & Boman, J. (2007). Indoor and outdoor concentrations of PM<sub>2.5</sub> trace elements at homes, preschools and schools in Stockholm, Sweden. *Journal of Environmental Monitoring*, 2, 348–357. <https://doi.org/10.1039/b616858b>
- Montero, G., Blanca, M., Hèctor, V., Fernando, G., Javier, M., Telma, C., & Oscar, P. (2015). Aerosol Atmosférico, Nubes Y Cambio Climático. In *Reporte Mexicano de Cambio Climático* (Issue December).
- Montoya, M. L., Zapata, P. M., & Correa, M. A. (2013). *Contaminación ambiental por PM<sub>10</sub> dentro y fuera del domicilio y capacidad respiratoria en Puerto Nare, Colombia*. 15(1), 103–115.
- Montoya Rossi, E. H. (1995). *Evaluacion y estandarizacion del analisis por activacion neutronica segun el meotod k-sub cero en el reactor nuclear RP-10* [Universidad Peruana Cayetano Heredia]. <https://repositorio.ipen.gob.pe/handle/20.500.13054/121>
- Mora, J. C., Sibaja, J. P., & Borbón, H. (2021). Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del

agua de lluvia y de niebla. *Revista Tecnología En Marcha*, 34(1), 92–103.

Moreno, T. (2007). Aerosoles atmosféricos: Problemas ambientales. *Aulados.Net*, 1–3.

[http://www.aulados.net/Temas\\_ambientales/Particulado\\_aereo/Particulado\\_aereo.pdf](http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Particulado_aereo/Particulado_aereo.pdf)

MTC. (2023). *MTC: El 58% de la contaminación del aire en Lima y Callao es provocado por*

*el Parque Automotor*. Plataforma Digital Única Del Estado Peruano.

<https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/819851-mtc-el-58-de-la-contaminacion-del-aire-en-lima-y-callao-es-provocado-por-el-parque-automotor>

O'Dowd, C. D., & de Leeuw, G. (2007). Marine aerosol production: a review of the current

knowledge. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical*

*and Engineering Sciences*, 365(1856), 1753–1774.

<https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2043>

OMS. (2021). *Ambient (outdoor) air pollution*. Organización Mundial de La Salud.

[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

OPS. (2021). Reducción de la exposición a la contaminación del aire y agua debida a las

erupciones volcánicas. *Organizacion Panamericana de Salud*.

Panchuk, V., Yaroshenko, I., Legin, A., Semenov, V., & Kirsanov, D. (2018). Application of

chemometric methods to XRF-data – A tutorial review. *Analytica Chimica Acta*, 1040,

19–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.05.023>

Park, E. H., Heo, J., Kim, H., & Yi, S.-M. (2020). Long term trends of chemical constituents

and source contributions of PM<sub>2.5</sub> in Seoul. *Chemosphere*, 251, 126371.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>

Peralta, O., Ortínez-Alvarez, A., Basaldud, R., Santiago, N., Alvarez-Ospina, H., de la Cruz,

- K., Barrera, V., de la Luz Espinosa, M., Saavedra, I., Castro, T., Martínez-Arroyo, A., Páramo, V. H., Ruíz-Suárez, L. G., Vazquez-Galvez, F. A., & Gavilán, A. (2019). Atmospheric black carbon concentrations in Mexico. *Atmospheric Research*, 230, 104626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104626>
- Pino, F., Sajo-Castelli, A. M., Barros, H., Vermaercke, P., Sneyers, L., Sajo Bohus, L., Mackowiak de Antczak, M. M., & Antczak, A. (2013). k0-INAA of Venezuelan ceramics and complete statistical analysis to establish their provenance. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 298(2), 1257–1272. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2603-y>
- Prather, K. A., Hatch, C. D., & Grassian, V. H. (2008). Analysis of Atmospheric Aerosols. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 1(Volume 1, 2008), 485–514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.anchem.1.031207.113030>
- Quijano, P., Quinajo, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM<sub>2.5</sub> en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua*, 8, 53–66.
- Reff, A., Eberly, S. I., & Bhave, P. V. (2007). Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: Review of existing methods. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(2), 146–154. <https://doi.org/10.1080/10473289.2007.10465319>
- Révay, Z., & Kennedy, G. (2012). Application of the k0 method in neutron activation analysis and in prompt gamma activation analysis. *Radiochimica Acta*, 100(8–9), 687–698. <https://doi.org/doi:10.1524/ract.2012.1957>
- Ryou, H. G., Heo, J., & Kim, S.-Y. (2018). Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> air pollution, and possible impacts of study characteristics in South Korea. *Environmental*

- Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 240, 963–972.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.066>
- Ryś, A, & Samek, L. (2021). Measurement report: Determination of Black Carbon concentration in PM<sub>2.5</sub> fraction by Multi-wavelength absorption black carbon instrument (MABI). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2021(October), 1–14.  
<https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2021-766/%0Ahttps://acp.copernicus.org/preprints/acp-2021-766/acp-2021-766.pdf>
- Ryś, Anna, & Samek, L. (2022). Yearly Variations of Equivalent Black Carbon Concentrations Observed in Krakow, Poland. In *Atmosphere* (Vol. 13, Issue 4).  
<https://doi.org/10.3390/atmos13040539>
- Sandoval, B., Reyes, T., & Oyarzún, M. (2019). Mecanismos de los efectos nocivos para la salud de la contaminación atmosférica proveniente de incendios forestales. *Chil Enferm Respir*, 49–57.
- Schramm, R. (2016). Use of X-ray Fluorescence Analysis for the Determination of Rare Earth Elements. *Physical Sciences Reviews*, 1(9). <https://doi.org/doi:10.1515/psr-2016-0061>
- SENAHMI. (2022). *Monitoreo de la Calidad de Aire, para Lima Metropolitana*. Ministerio Del Ambiente [MINAM]. <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=calidad-del-aire>
- Singh, V., Sharma, N., & Singh, V. K. (2022). Application of X-ray fluorescence spectrometry in plant science: Solutions, threats, and opportunities. *X-Ray Spectrometry*, 51(3), 304–327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/xrs.3260>
- Song, X., Polissar, A. V, & Hopke, P. K. (2001). *Sources of fine particle composition in the northeastern US*. 35(January), 5277–5286.
- Srivastava, D., Xu, J., Vu, T. V, Liu, D., Li, L., Fu, P., Hou, S., Moreno Palmerola, N., Shi, Z.,

- & Harrison, R. M. (2021). Insight into PM<sub>2.5</sub> sources by applying positive matrix factorization (PMF) at urban and rural sites of Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(19), 14703–14724. <https://doi.org/10.5194/acp-21-14703-2021>
- Sugita, K., Kin, Y., Yagishita, M., Ikemori, F., Kumagai, K., Ohara, T., Kinoshita, M., Nishimura, K., Takagi, Y., & Nakajima, D. (2019). Evaluation of the genotoxicity of PM<sub>2.5</sub> collected by a high-volume air sampler with impactor. *Genes and Environment*, 41(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s41021-019-0120-0>
- Tapia, V., Steenland, K., Vu, B., Liu, Y., Vásquez, V., & Gonzales, G. F. (2020). PM<sub>2.5</sub> exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima, Peru, from 2010 to 2016. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 19(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00618-6>
- Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) -Mediated Toxicity in Humans : An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- Toledano, C. (2008). Los aerosoles atmosféricos y su influencia en la Península Ibérica. *Manuales Formativos de ACTA*, 48, 9–20.
- Traore, A., Kebe, M., Sow, M., Vasilatou, V., Ndao, A. S., & Eleftheriadis, K. (2023). Analysis of Black Carbon Concentrations in PM<sub>2.5-10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Fractions by MABI Instrument in Two Urban Areas of Dakar, Senegal. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*, 7(2), 23–30. <https://doi.org/10.11648/j.ijaos.20230702.11>
- Trkov, A., & Radulović, V. (2015). Nuclear reactions and physical models for neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 304(2), 763–778. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3892-5>

UNICEF. (2021). Calidad del aire ¡Es el momento de actuar! *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 2013–2015.

Viererbl, L., Vinš, M., Lahodová, Z., Fuksa, A., Kučera, J., Kolečka, M., & Voljanskij, A. (2015). Mercury mass measurement in fluorescent lamps via neutron activation analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 116, 56–59.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.03.041>

Weindorf, D. C., Bakr, N., & Zhu, Y. (2014). Chapter One - Advances in Portable X-ray Fluorescence (PXRF) for Environmental, Pedological, and Agronomic Applications. In D. L. B. T.-A. in A. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 128, pp. 1–45). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9>

Yang, Z., Wang, H., Shao, Z., & Muncrief, R. (2015). *Review of Beijing 's Comprehensive Motor Vehicle Emission Control Programs*. October.

## IX. Anexos

## Anexo 1: Certificado de calibración del equipo muestreador de alto volumen


 R :  
 I. V. : 2020-Ago-19

| CONSTANCIA DE SERVICIO, EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN                                                                                               |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| ALAB                                                                                                                                                     | Empresa :                                                                                                                                                                   | SENAMHI.                                                                               |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | Servicio :                                                                                                                                                                  | <input type="checkbox"/> Mantenimiento <input checked="" type="checkbox"/> Calibración |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | Persona de contacto / Responsable :                                                                                                                                         | JOSE                                                                                   |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | OTI :                                                                                                                                                                       | 2023-00                                                                                |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                 | ITEM OTI :                                                                             | ITEM OTI : | ITEM OTI : | ITEM OTI : |
|                                                                                                                                                          | EQUIPO / INSTRUMENTO                                                                                                                                                        | H1-Vol másico                                                                          |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | MARCA                                                                                                                                                                       | Tisch                                                                                  |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | MODELO                                                                                                                                                                      | TE-5005BLX                                                                             |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | SERIE                                                                                                                                                                       | 1273 (3866)                                                                            |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | CÓDIGO                                                                                                                                                                      | No indica (2478)                                                                       |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | CAPACIDAD NOMINAL                                                                                                                                                           | —                                                                                      |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | UBICACIÓN                                                                                                                                                                   | Campo de Marte                                                                         |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | FECHA DE CALIBRACIÓN                                                                                                                                                        | 2023-03-10                                                                             |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | PUNTOS DE CALIBRACIÓN                                                                                                                                                       | 1,13 m <sup>3</sup> /min                                                               |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | Nº ETIQUETA /                                                                                                                                                               | EM-00350                                                                               |            |            |            |
| Nº PRECINTO                                                                                                                                              | —                                                                                                                                                                           |                                                                                        |            |            |            |
| Todos los campos deben llenarse OBLIGATORIAMENTE, de no aplicar colocar N.A o de no haber información colocar NO INDICA.                                 |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| <b>DESCRIPCIÓN DEL SERVICIO REALIZADO</b> Se realizó la calibración del                                                                                  |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| equipo en Jr. Nazca S/N. lado Sur campo de Marte - Jesus María                                                                                           |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| <b>OBSERVACIONES :</b> Se colocó una etiqueta de calibración EM-00350                                                                                    |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| Nota: Indicar OBLIGATORIAMENTE si realizó el ajuste al equipo. / Los cambios de los puntos de calibración deben ser comunicados con anticipación a ALAB. |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| Leo León Moya                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| Nombre del responsable / Ejecutor del servicio<br>ALAB                                                                                                   |                                                                                                                                                                             | FIRMA                                                                                  |            |            |            |
| CLIENTE                                                                                                                                                  | <b>CONSTANCIA DE SERVICIO</b>                                                                                                                                               |                                                                                        |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | Se deja constancia que la empresa ALAB ha realizado el servicio de mantenimiento y/o calibración solicitado, quedando los equipos / instrumentos en estado de operatividad. |                                                                                        |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | <b>OBSERVACIONES :</b>                                                                                                                                                      |                                                                                        |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | Nombre de la persona de contacto / responsable : José Hitoshi Inoue Velarde                                                                                                 |                                                                                        |            |            |            |
|                                                                                                                                                          | DNI : 47607655<br>FECHA : 2023-03-10<br>(Año - mes - día)                                                                                                                   |                                                                                        |            |            |            |
|                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |
| FIRMA                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                             |                                                                                        |            |            |            |

## Anexo 2: Certificado del Material de Referencia Coal Fly Ash



National Institute of Standards &amp; Technology

## Certificate of Analysis

## Standard Reference Material® 1633c

## Trace Elements in Coal Fly Ash

This Standard Reference Material (SRM) is intended for use in the evaluation of analytical methods for the determination of constituent elements in coal fly ash or materials of a similar matrix. SRM 1633c is a bituminous coal fly ash that was sieved through a nominal sieve opening of 74  $\mu\text{m}$  (200 mesh) and then blended to assure homogeneity. A unit of SRM 1633c consists of 75 g of powdered material.

**Certified Mass Fraction Values:** Certified values for 20 constituents of SRM 1633c are reported in Table 1 as mass fractions on a dry-mass basis [1]. A NIST certified value is a value for which NIST has the highest confidence in its accuracy, in that all known or suspected sources of bias have been investigated or taken into account [2]. A certified value is the present best estimate of the true value based on the results of analyses performed at NIST and collaborating laboratories using instrumental and classical test methods.

**Reference Mass Fraction Values:** Reference values for 16 constituents are reported in Table 2 as mass fractions on a dry-mass basis. Reference values are non-certified values that are the present best estimates of the true values. However, the values do not meet the NIST criteria for certification and are provided with associated uncertainties that may not include all sources of uncertainty [2].

**Information Values:** Eight information values are reported in Table 3 as mass fractions on a dry-mass basis. An information value is considered to be a value that may be of interest to the SRM user, but insufficient information is available to assess the uncertainty associated with the value.

**Expiration of Certification:** The certification of SRM 1633c is valid, within the uncertainty specified, until 01 March 2026, provided the SRM is handled and stored in accordance with the instructions given in this certificate (see "Instructions for Use"). The certification is nullified if the SRM is damaged, contaminated, or otherwise modified.

**Maintenance of SRM Certification:** NIST will monitor this SRM over the period of its certification. If substantive changes occur that affect the certification before the expiration of this certificate, NIST will notify the purchaser. Registration (see attached sheet or register online) will facilitate notification.

The coordination of technical measurements for certification was performed by E.A. Mackey and J.L. Molloy of NIST.

Analyses leading to the certification of this SRM were performed by A.F. Marlow, K.E. Murphy, R.L. Paul, S.A. Rabb, J.R. Sieber, and L.L. Yu of the NIST Chemical Sciences Division, E.A. Mackey of NIST, and R.G. Brennan, S.E. Long, R.O. Spatz, and B.E. Tomlin, formerly of NIST. Analytical results were also provided by Quality Associates International, Ltd., (Sechelt, BC Canada) administering the Coal and Ash Sample Proficiency Exchange (CANSPEX) proficiency testing program.

Statistical consultation for this SRM was provided by A.L. Pintar of the NIST Statistical Engineering Division and S.D. Leigh, formerly of NIST.

Support aspects involved in the issuance of this SRM were coordinated through the NIST Office of Reference Materials.

Carlos A. Gonzalez, Chief  
Chemical Sciences Division

Steven J. Choquette, Director  
Office of Reference Materials

Gaithersburg, MD 20899  
Certificate Issue Date: 02 February 2021  
Certificate Revision History on Page 5  
SRM 1633c

Page 1 of 8

## INSTRUCTIONS FOR USE

The SRM should be thoroughly mixed by rotating the bottle before sampling. A minimum dry sample mass of 250 mg should be used for analytical determinations to be related to the certified values on this Certificate of Analysis.

To obtain the certified values, sample preparation procedures should be designed to achieve complete dissolution. If volatile elements (e.g., Hg, As, Se) are to be determined, precautions should be taken in the dissolution of SRM 1633c to avoid volatilization losses.

**Instructions for Drying:** When non-volatile elements are being determined, this material should be dried to constant mass before using. Recommended procedures for drying are: (1) vacuum drying for 24 h at ambient temperature using a cold trap at or below  $-50^{\circ}\text{C}$  and a pressure not greater than 30 Pa (0.2 mm Hg) and (2) drying for 2 h in an oven at  $105^{\circ}\text{C}$ . Samples of the dried material weighing at least 250 mg should be used for analysis. When not in use, the material should be kept in a tightly sealed bottle. Volatile elements should be determined on an as-received basis, and corrected to dry mass. Correction should be based on a separate determination of moisture using one of the above drying procedures.

## SOURCE, PREPARATION, AND HOMOGENEITY ASSESSMENT<sup>(1)</sup>

**Source and Preparation of the Material:** The fly ash was supplied by a coal-fired power plant and is the product of western Pennsylvania bituminous coal. The material was air dried, sieved, and blended for 24 h before being placed in a series of bulk containers. X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and prompt gamma activation analysis (PGAA) were performed on 19 and 10 grab samples, respectively. Grab samples were taken from the bulk using a stratified random sampling methodology for a preliminary homogeneity assessment before proceeding with bottling the material in 75 g units.

**Homogeneity Assessment:** The homogeneity of the bottled material was assessed using XRF and PGAA. In some cases, statistically significant differences among samples were observed. This component of uncertainty was captured adequately by the analytical technique(s) used for values assignments. The exception is Pb for which an additional component of variance, obtained from the XRF homogeneity assessment, was included in the uncertainty calculations.

## VALUE ASSIGNMENT

The analytical techniques used for measurement of each element are listed in Table 4.

**Certified Mass Fraction Values:** The certified values for Al, As, Ba, Ca, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Rb, Sb, Sr, Ti, and V are weighted means of the results from two to four methods [3,4]. The uncertainty listed with each certified value is an expanded uncertainty about the mean with coverage factor 2 (approximately 95 % confidence) calculated by combining a between-method variance incorporating inter-method bias with a pooled, within-method variance following the ISO Guide [5,6]. The certified mass fraction values for Hg, Pb, and Cd are unweighted mean values based on results from a single NIST method for which a complete evaluation of all sources of uncertainty has been performed. The uncertainties for these certified values are two-sided 95 % confidence intervals for the mean (coverage factor,  $k = 2$ ).

<sup>(1)</sup>Certain commercial equipment, instruments, or materials are identified in this certificate in order to adequately specify the experimental procedure. Such identification does not imply recommendation or endorsement by the National Institute of Standards and Technology, nor does it imply that the materials or equipment identified are necessarily the best available for the purpose.

Table 1. Certified Mass Fraction Values (Dry-Mass Basis) for SRM 1633c

| Constituent    | Mass Fraction (%) | Constituent    | Mass Fraction (mg/kg) |
|----------------|-------------------|----------------|-----------------------|
| Aluminum (Al)  | 13.28 ± 0.61      | Arsenic (As)   | 186.2 ± 3.0           |
| Barium (Ba)    | 0.1126 ± 0.0033   | Cadmium (Cd)   | 0.758 ± 0.005         |
| Calcium (Ca)   | 1.365 ± 0.040     | Cobalt (Co)    | 42.9 ± 3.5            |
| Iron (Fe)      | 10.49 ± 0.39      | Copper (Cu)    | 173.7 ± 6.4           |
| Potassium (K)  | 1.773 ± 0.066     | Mercury (Hg)   | 1.005 ± 0.022         |
| Magnesium (Mg) | 0.498 ± 0.052     | Manganese (Mn) | 240.2 ± 3.4           |
| Sodium (Na)    | 0.1707 ± 0.0059   | Nickel (Ni)    | 132 ± 10              |
| Titanium (Ti)  | 0.724 ± 0.030     | Lead (Pb)      | 95.2 ± 2.5            |
|                |                   | Rubidium (Rb)  | 117.42 ± 0.53         |
|                |                   | Antimony (Sb)  | 8.56 ± 0.29           |
|                |                   | Strontium (Sr) | 901 ± 56              |
|                |                   | Vanadium (V)   | 286.2 ± 7.9           |

**Reference Mass Fraction Values:** The reference values for Cr, Cs, Dy, Eu, La, Lu, Sc, Se, Si, Ta, Tb, Th, and U are the mean of results obtained using one analytical technique performed at NIST. The expanded uncertainties associated with these reference values are two-sided intervals with coverage factor 2 (approximately 95 % confidence) calculated from the combined uncertainty expressed at the level of one standard deviation following NIST Technical Note 1297 [6]. The Zn and P reference values are weighted means of the results from two or more methods. The S value and uncertainty were calculated from a round robin exercise involving multiple labs with the weighted means from each lab combined. The uncertainty listed for each P, S, and Zn value is an expanded uncertainty about the mean with coverage factor 2 (approximately 95 % confidence) calculated by combining a between-method variance incorporating inter-method bias with a pooled, within-method variance following the ISO Guide [3–6].

Table 2. Reference Mass Fraction Values (Dry-Mass Basis) for SRM 1633c

| Constituent    | Mass Fraction (%) | Constituent     | Mass Fraction (mg/kg) |
|----------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Sulfur (S)     | 0.110 ± 0.019     | Chromium (Cr)   | 258 ± 6               |
| Silicon (Si)   | 21.30 ± 0.57      | Cesium (Cs)     | 9.39 ± 0.22           |
| Phosphorus (P) | 0.192 ± 0.010     | Dysprosium (Dy) | 18.70 ± 0.30          |
|                |                   | Europium (Eu)   | 4.67 ± 0.07           |
|                |                   | Lanthanum (La)  | 87.0 ± 2.6            |
|                |                   | Lutetium (Lu)   | 1.32 ± 0.03           |
|                |                   | Scandium (Sc)   | 37.6 ± 0.6            |
|                |                   | Selenium (Se)   | 13.9 ± 0.5            |
|                |                   | Tantalum (Ta)   | 1.58 ± 0.03           |
|                |                   | Terbium (Tb)    | 3.12 ± 0.06           |
|                |                   | Thorium (Th)    | 23.0 ± 0.4            |
|                |                   | Uranium (U)     | 9.25 ± 0.45           |
|                |                   | Zinc (Zn)       | 235 ± 14              |

Table 3. Information Mass Fraction Values (Dry-Mass Basis) for SRM 1633c

| Constituent    | Mass Fraction<br>(mg/kg) |
|----------------|--------------------------|
| Beryllium (Be) | 16                       |
| Cerium (Ce)    | 180                      |
| Gallium (Ga)   | 55                       |
| Hafnium (Hf)   | 6.0                      |
| Indium (In)    | 0.14                     |
| Neodymium (Nd) | 87                       |
| Samarium (Sm)  | 19                       |
| Ytterbium (Yb) | 7.7                      |

Table 4. Analytical Methods Used For Value Assignment

| Element | Methods                  | Element | Methods                       |
|---------|--------------------------|---------|-------------------------------|
| Al      | WDXRF, INAA, CANSPEx     | Mn      | WDXRF, INAA, CANSPEx          |
| As      | WDXRF, INAA, CANSPEx     | Na      | WDXRF, INAA, CANSPEx          |
| Ba      | WDXRF, INAA, CANSPEx     | Nd      | INAA                          |
| Be      | CANSPEx                  | Ni      | ICP-OES, ICP-MS, CANSPEx      |
| Ca      | WDXRF, INAA, CANSPEx     | P       | ICP-OES, WDXRF, CANSPEx       |
| Cd      | ID-ICP-MS                | Pb      | ID-ICP-MS                     |
| Ce      | INAA                     | Rb      | WDXRF, INAA                   |
| Co      | INAA, CANSPEx            | S       | CANSPEx                       |
| Cr      | WDXRF                    | Sb      | INAA, CANSPEx                 |
| Cs      | INAA                     | Sc      | INAA                          |
| Cu      | ICP-OES, ICP-MS, CANSPEx | Se      | INAA                          |
| Dy      | INAA                     | Si      | WDXRF                         |
| Eu      | INAA                     | Sm      | INAA                          |
| Fe      | WDXRF, INAA              | Sr      | WDXRF, INAA, CANSPEx          |
| Ga      | INAA                     | Ta      | INAA                          |
| Hf      | INAA                     | Tb      | INAA                          |
| Hg      | ID-CV-ICP-MS             | Th      | INAA                          |
| In      | INAA                     | Ti      | WDXRF, INAA, CANSPEx          |
| K       | WDXRF, INAA, CANSPEx     | U       | INAA                          |
| La      | INAA                     | V       | ICP-OES, WDXRF, INAA, CANSPEx |
| Lu      | INAA                     | Yb      | INAA                          |
| Mg      | WDXRF, INAA, CANSPEx     | Zn      | INAA, CANSPEx                 |

## Key to Methods:

|              |                                                                                                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WDXRF        | Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry after borate fusion at NIST                                 |
| ICP-OES      | Inductively coupled plasma optical emission spectrometry at NIST                                                  |
| ICP-MS       | Inductively coupled plasma mass spectrometry at NIST                                                              |
| ID-ICP-MS    | Isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry at NIST                                             |
| ID-CV-ICP-MS | Isotope dilution cold vapor inductively coupled plasma mass spectrometry at NIST                                  |
| INAA         | Instrumental neutron activation analysis at NIST                                                                  |
| CANSPEx      | Coal and Ash Sample Proficiency Exchange program combining data from at least 17 labs using a variety of methods. |

## SUPPLEMENTAL INFORMATION

Summary statistics reported by Quality Assurance International, Ltd. for the CANSPEx 2008-4 Round Robin using SRM 1633c as an unknown fly ash sample are provided in the Appendix to this certificate to demonstrate user experience with this material using conventional methods and to better characterize the matrix. The CANSPEx Round Robin results should NOT be used as substitutes for NIST values.

## REFERENCES

- [1] Thompson, A.; Taylor, B.N.: *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*; NIST Special Publication 811; U.S. Government Printing Office: Washington, DC (2008); available at <https://www.nist.gov/pml/products-services/special-publications-tutorials> (accessed Feb 2021).
- [2] May, W.; Parris, R.; Beck, C.; Fassett, J.; Greenberg, R.; Guenther, F.; Kramer, G.; Wise, S.; Gills, T.; Colbert, J.; Gettings, R.; MacDonald, B.: *Definitions of Terms and Modes Used at NIST for Value-Assignment of Reference Materials for Chemical Measurements*; NIST Special Publication 260-136; U.S. Government Printing Office: Washington, DC (2000); available at <https://www.nist.gov/srm/publications-sp260s> (accessed Feb 2021).
- [3] DerSimonian, R.; Laird, N.: *Meta-analysis in Clinical Trials*; Control. Clin. Trials, Vol. 7, pp. 177–188 (1986).
- [4] Rukhin, A. L.: *Weighted Means Statistics in Interlaboratory Studies*; Metrologia, Vol. 46, No. 3, pp 323–331 (2009).
- [5] Horn, R.A.; Horn, S.A.; Duncan, D.B.: *Estimating Heteroscedastic Variance in Linear Models*; J. Am. Stat. Assoc., Vol. 70, pp. 380–385 (1975).
- [6] JCGM 100:2008; *Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (ISO GUM 1995 with Minor Corrections); Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (2008); available at [https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf) (accessed Feb 2021); see also Taylor, B.N.; Kuyatt, C.E.: *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*; NIST Technical Note 1297; U.S. Government Printing Office: Washington, DC (1994); available at <https://www.nist.gov/pml/nist-technical-note-1297> (accessed Feb 2021).

|                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Certificate Revision History: 02 February 2021 (Change of expiration date, editorial changes), 23 June 2011 (Original certificate date) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Users of this SRM should ensure that the Certificate of Analysis in their possession is current. This can be accomplished by contacting the SRM Program at: telephone (301) 975-2200; e-mail [srminfo@nist.gov](mailto:srminfo@nist.gov); or via the Internet at <http://www.nist.gov/srm>.*

Anexo 3: Tabla del control de calidad de los análisis por AAN

| <b>Elemento</b> | <b>Valor Certificado<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>%RSD</b> | <b>Límite de Detec-<br/>ción (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Límite de Cuanti-<br/>ficación (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Aluminio        | 1.33E-02                                                           | 6.2         | 7.84E-04                                                               | 1.57E-03                                                                    |
| Magnesio        | 4.98E-04                                                           | 3.7         | 4.00E-06                                                               | 8.01E-06                                                                    |
| Sodio           | 3.80E-05                                                           | 5.2         | 1.14E-01                                                               | 2.28E-01                                                                    |
| Vanadio         | 286                                                                | 2.4         | 6.41E-05                                                               | 1.28E-04                                                                    |
| Disproso        | 19                                                                 | 2.4         | 1.78E-04                                                               | 3.56E-04                                                                    |
| Manganeso       | 240                                                                | 2.8         | 1.38E-04                                                               | 2.76E-04                                                                    |

## Anexo 4: Certificado del Material de Referencia UCD 47 MLT BLK 103

**AIR QUALITY RESEARCH CENTER****CERTIFICATION FOR  
MULTI-ELEMENT REFERENCE MATERIALS****Contact Information:**

Nicole Hyslop  
Air Quality Research Center  
[nmhyslop@ucdavis.edu](mailto:nmhyslop@ucdavis.edu)  
(530)754-8979

Krystyna Trzepla  
Air Quality Research Center  
[ktrzepla@ucdavis.edu](mailto:ktrzepla@ucdavis.edu)  
(530)752-4232

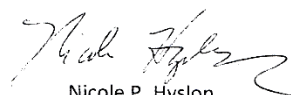
Jason Giacomo  
Air Quality Research Center  
[jagiaco@ucdavis.edu](mailto:jagiaco@ucdavis.edu)  
(530)752-2329

| RM TYPE       | DESCRIPTION                    |
|---------------|--------------------------------|
| Multi-element | Multi-element on Teflon Filter |

Document number: 2020-ME-001-029

Customer: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)  
WAGRAMER STRASSE 5, P.O. BOX 100  
1400 VIENNA, AUSTRIA  
TEL: (+43-1) 2600-0  
FAX: (+43-1) 2600-7

Date: January 21<sup>st</sup>, 2020



Nicole P. Hyslop  
Principal Investigator

**GLOSSARY OF TERMS:**

|                                          |                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aerosol generation system                | Aerosol generation and deposition system with a Met One Super SA sampler used to prepare reference materials of PM <sub>2.5</sub> particulates on PTFE filters.   |
| Filter                                   | The filters made of polytetrafluoroethylene (PTFE), on which the aerosols are deposited.                                                                          |
| Multi Element-Reference Material (ME-RM) | A ME-RM in this context is a material that is stable and of known composition with elemental mass loadings that have been determined within a quoted uncertainty. |
| Certified Solutions                      | Certified multi-element solutions with 28 elements produced following NIST traceable procedure.                                                                   |
| Element Mass                             | The mass of the element of interest on RM.                                                                                                                        |
| $U_r$                                    | Relative uncertainty induced from XRF measurement. Calculated as:                                                                                                 |

$$U_r = \frac{\text{standard deviation of repetitive XRF measurements}}{\text{mean of repetitive XRF measurements}} \times 100 \%$$

**REFERENCES:**

1. Indresand, H.; White, W. H.; Trzepla, K.; Perley, B. P.; Dillner, A. M., *X-ray Spectrom.*, 2012
2. Yarkin, S.; Amin, H. S.; Trzepla, K.; Dillner, A. M., *Aerosol Sci & Technol.*, 2016
3. Yarkin, S., H. S. Amin, K. Trzepla, and A. M. Dillner. 2016. Preparation of lead (Pb) X-ray fluorescence reference materials for the EPA Pb monitoring program and the IMPROVE network using an aerosol deposition method. *Aerosol Sci. Technol.* 50 (4):309–320. doi:10.1080/02786826.2016.1150956
4. Yarkin, S., K. T. Trzepla, W. H. White, and N. P. Hyslop. 2018. Generation of multi-elemental reference materials on PTFE filters mimicking ambient aerosol characteristics. *Atmos. Environ.* 189:41–49. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.06.034
5. Hyslop N., Trzepla K., Yarkin, S., White, W., Ancelet T., Davy P., Butler O., Gerboles, M., Kohl S., McWilliams A., Saucedo L., Van Der Haar M., Jonkers A.. An Inter-laboratory evaluation of new multi-element reference materials for atmospheric particulate matter measurements. *Aerosol Science and Technology* (2019) DOI: [10.1080/02786826.2019.1606413](https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1606413)

**GENERAL INFORMATION:**

This document contains information about the mass loadings of Multi-Element Reference Materials (ME-RMs) prepared in Air Quality Research Center at University of California Davis (UCD-AQRC). The ME-RMs are appropriate for calibration and quality control of X-ray fluorescence (XRF) analyzers used to analyze particulate matter samples collected on PTFE filters.

**PREPARATION OF ME-RMs:**

The multi-element aerosols were collected on PTFE membrane filters (Teflon, 47 mm, 2.0  $\mu\text{m}$  pore size, Measurement Technology Laboratories Corp., Minneapolis, MN, USA). The multi-element solution was prepared by dilution of certified solutions (High Purity Standards, Charleston, SC, USA) using Type I deionized water (18.2  $\mu\text{S/cm}$  conductivity and <5 ppb total organic carbon) generated by MilliQ Academic system (Millipore Inc, USA).

ME-RMs were produced using an aerosol generation and deposition system, which aerosolizes a solution or suspension using an atomizer nozzle. The aerosols are dried and diluted in a mixing chamber. An air quality sampler (Super SASS sampler, Met One Instruments, USA) is used to collect aerosol samples from the mixing chamber. Prior to the ME-RM production, de-ionized water was aerosolized into the mixing chamber and a chamber blank was collected. Then, the multi-element solution was aerosolized and the ME-RMs were produced.

The chamber blank was analyzed by energy-dispersive X-ray fluorescence (EDXRF, Epsilon-5, Malvern Panalytical Ltd., Almelo, The Netherlands) to check for possible elemental contamination from the chamber and water. EDXRF verified that there is no elemental contamination on the chamber blank.

**ELEMENTAL MASS LOADINGS**

***Certified values:*** The certified elemental loadings of the ME-RMs in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  are listed in Table 1. The certified loadings are the values for which we have the highest confidence in their accuracy. Their relative uncertainties are below 10 %.

Table 1. The certified mass loadings of ME-RMs ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

| Element | Certified loading<br>( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) | $U_r$ (%) |
|---------|----------------------------------------------------|-----------|
| Na      | 0.874                                              | 9.2       |
| Al      | 0.281                                              | 3.8       |
| Si      | 0.413                                              | 1.8       |
| S       | 1.533                                              | 0.8       |
| Cl      | 0.039                                              | 4.8       |
| K       | 0.269                                              | 0.7       |
| Ca      | 0.219                                              | 1.8       |
| Ti      | 0.021                                              | 8.1       |
| V       | 0.040                                              | 2.8       |
| Cr      | 0.016                                              | 4.9       |
| Mn      | 0.022                                              | 7.7       |
| Fe      | 0.222                                              | 1.8       |
| Co      | 0.029                                              | 5.5       |
| Ni      | 0.012                                              | 6.4       |
| Cu      | 0.038                                              | 2.9       |
| Zn      | 0.016                                              | 5.7       |
| As      | 0.095                                              | 3.4       |
| Se      | 0.016                                              | 6.2       |
| Rb      | 0.027                                              | 7.0       |
| Sr      | 0.030                                              | 5.4       |
| Pb      | 0.041                                              | 8.6       |

**Reference values:** The reference mass loadings of the ME-RMs in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  are listed in Table 2. The relative uncertainties of these elements are between 10 % and 20 %.

Table 2. The reference mass loadings of ME-RMs ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

| Element | Reference loading<br>( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) | $U_r$ (%) |
|---------|----------------------------------------------------|-----------|
| Mg      | 0.233                                              | 18.8      |
| Cd      | 0.058                                              | 13.2      |
| Ba      | 0.080                                              | 18.7      |

**Informative values:** The informative mass loadings of the ME-RMs in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  are listed in Table 3. These elements show relative uncertainties higher than 20 %.

Table 3. The informative mass loadings of ME-RMs ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

| Element | Informative loading<br>( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) | $U_r$ (%) |
|---------|------------------------------------------------------|-----------|
| P       | 0.000                                                | 102.4     |
| Br      | 0.014                                                | 32.9      |
| Zr      | 0.013                                                | 42.6      |
| Mo      | 0.014                                                | 40.4      |

#### **EXPIRATION OF CERTIFICATION:**

This certification of ME-RMs is valid until February 1, 2021, provided each ME-RM is handled in accordance with instructions given in this certificate. The certification is voided if the ME-RM is damaged, contaminated, or otherwise modified.

#### **MAINTENANCE OF THE ME-RM CERTIFICATION:**

Our control methods ensure that the ME-RMs are stable for the period of certification (EDXRF analysis does not alter the element loadings on filters except Cl and Br).

#### **INSTRUCTIONS FOR USE:**

**Handling:** The ME-RMs should be handled to avoid direct contact with the deposit, which could result in material loss or contamination. PTFE coated tweezers are suggested for handling.

**Storage:** The ME-RMs should be kept in their original containers. When not in use, the ME-RM should be stored in petri slides, in a re-sealable plastic bag at room temperature.

**Usage:** The ME-RMs deposit is loaded on the side of the filter with red dots. The ME-RMs must be oriented in the XRF instrument with the deposit facing the exciting X-ray beam. Wiping of the XRF filter holder with alcohol prior to placement is highly recommended. The particle deposition area ( $11.86 \text{ cm}^2$  as US-EPA uses for 47 mm filters) to convert the loading to total element mass.

**Blank:** Laboratory blanks free of elements are provided with the ME-RMs to be utilized for blank subtraction.

Anexo 5: Tabla del control de calidad de los análisis por FRXED

| <b>Elemento</b> | <b>Valor Certificado<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^2</math>)</b> | <b>%RSD</b> | <b>Límite de Detec-<br/>ción (<math>\mu\text{g}/\text{m}^2</math>)</b> | <b>Límite de Cuantifi-<br/>cación (<math>\mu\text{g}/\text{m}^2</math>)</b> |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Calcio          | 0.22                                                               | 3.8         | 0.07                                                                   | 0.14                                                                        |
| Hierro          | 0.22                                                               | 2.0         | 3.57E-04                                                               | 7.14E-04                                                                    |
| Cobre           | 0.04                                                               | 5.5         | 3.02E-04                                                               | 6.04E-04                                                                    |
| Zinc            | 0.02                                                               | 7.0         | 2.39E-05                                                               | 4.79E-05                                                                    |
| Potasio         | 0.27                                                               | 2.1         | 5.68E-05                                                               | 1.14E-04                                                                    |
| Cromo           | 0.02                                                               | 5.0         | 3.13E-05                                                               | 6.26E-05                                                                    |

## Anexo 6:Acrónimos

**ACRÓNIMOS**

|            |                                                                                      |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| PM 2.5     | Material particulado menor a 2.5 micras                                              |
| PM 10      | Material particulado menor a 10 micras                                               |
| OMS        | Organización Mundial de la Salud                                                     |
| FRXED      | Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva                                       |
| EPA        | Agencia de Protección Ambiental                                                      |
| IPEN       | Instituto Peruano de Energía Nuclear                                                 |
| CDM        | Campo de Marte                                                                       |
| SENAMHI    | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú                              |
| CN         | Carbono Negro                                                                        |
| CNQ        | Carbono Negro proveniente de Quema de Biomasa                                        |
| CI         | Cromatografía Iónica                                                                 |
| ACP        | Análisis de Componentes Principales                                                  |
| ACJ        | Análisis de Conglomerados Jerárquicos                                                |
| SPSS       | Paquete Estadístico para Ciencias Sociales                                           |
| EPA        | Agencia de Protección Ambiental                                                      |
| SEM-EDS    | Microscopio Electrónico de Barrido Equipado con un Espectro de Dispersión de Energía |
| MABI       | Instrumento de Carbono Negro de Absorción de Longitud de Onda Múltiple               |
| PMF        | Factorización de Matriz Positiva                                                     |
| NIOSH 5040 | Método para analizar carbono del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional |
| OEFA       | Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental                                    |

