



Metodologías para la caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}.

Santiago Andrés Franco Carvajal

Trabajo de grado para optar al título de:

Ingeniero Sanitario

Asesor

David Aguiar Gil

Magister en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Ingeniería Sanitaria
Medellín
2023

Cita	(Franco Carvajal, 2023)
Referencia	Franco Carvajal, S. A. (2023). <i>Metodologías para la caracterización de iones y metales en muestras de PM10 y PM2.5</i> . [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



GLIMA - Grupo de Investigación y Laboratorio de Monitoreo Ambiental



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina Maria Berrout Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi madre, la amo.

Agradecimientos

A mi universidad.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Planteamiento del problema	12
2 Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 Marco teórico	14
4 Metodología	18
5 Resultados	20
6 Análisis	24
7 Conclusiones	26
Referencias	27
Anexos	35

Lista de tablas

Tabla 1	Comandos de búsqueda para bases de datos	18
Tabla 2	Características de los filtros	20
Tabla 3	Dispositivos de captación y métodos de extracción	21
Tabla 4	Técnicas de caracterización	22

Lista de figuras

Figura 1 Resumen del procedimiento Proknow-C para obtener portafolio bibliográfico	19
Figura 2 Resultados de la revisión bibliométrica	23

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AAS	Espectrometría de absorción atómica
EPA	Agencia de protección ambiental de Estados Unidos
HPLC	Cromatografía líquida de alto rendimiento
IC	Cromatografía iónica
ICP-AES	Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente
ICP-MS	Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente
ICP-OES	Espectrometría óptica de plasma acoplado inductivamente
LC	Cromatografía líquida
NAA	Análisis por activación de neutrones
OMS	Organización mundial de la salud
PM	Material particulado
PMF	Matriz positiva de factorización
ICP-OES	Espectrometría óptica de plasma acoplado inductivamente
SEM	Microscopio de barrido electrónico
UV-VIS	Espectrometría de rayos ultravioleta
XAS	Espectrometría de absorción de rayos X
XRD	Difracción de rayos X

Resumen

Este documento consiste en una revisión bibliográfica en la cual se realizó el análisis y la identificación de las metodologías utilizadas en la caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}. La investigación fue realizada utilizando la metodología Proknow-C, la cual permite realizar una búsqueda estructurada en bases de datos, seleccionando los documentos más relevantes sobre el tema. Las metodologías para muestrear los contaminantes, los materiales de captación, tipos de filtro, protocolos y técnicas de caracterización fueron documentados. Las principales técnicas de caracterización encontradas fueron la cromatografía iónica, la inducción de plasma acoplado y la espectrometría de absorción atómica. Los iones más reportados en los estudios fueron el sulfato, amonio y nitrato, por su parte, los metales más encontrados fueron el plomo, cadmio y aluminio. El documento también recopila las implicaciones del PM en la salud de las personas y el medio ambiente, encontrando que la exposición a estos contaminantes, incluso en bajos niveles puede traer como consecuencia enfermedades principalmente de tipo respiratorio y cardiovascular. Se encontró que existen diferentes técnicas para identificar de forma precisa las fuentes de emisión de los contaminantes, tales como las matrices de factorización, los balances químicos o el uso de sistemas de información geográfica. En resumen, este documento resalta la importancia de la caracterización química del PM₁₀ y PM_{2.5}, los resultados hallados sugieren que se debe realizar un análisis riguroso para seleccionar los métodos de caracterización de los contaminantes atmosféricos, puesto que hay una gran cantidad de metodologías y protocolos que varían de acuerdo al contaminante de estudio.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, Material particulado, iones, metales.

Abstract

This systematic literature review aimed to identify and analyze the methodologies used for characterizing ions and metals in PM₁₀ and PM_{2.5} samples. The research was conducted using the Proknow-C method, which includes a comprehensive search of databases, filtering of relevant articles, and quality assessment of the included studies. The methodology for sampling, filtration, characterization techniques, and protocols were analyzed. The main characterization techniques found were ion chromatography, inductively coupled plasma and atomic absorption spectroscopy. The ions that were most commonly reported were sulfate, ammonium and nitrate, while the metals included lead, cadmium and aluminum. The quality assessment of the included studies showed that most of them followed standard protocols for sample collection, filtration, and analysis. The implications for health and environment, also were analyzed, finding that exposure to levels of PM₁₀ and PM_{2.5} can cause respiratory diseases with specific species. About the sources identification, it was found that there are several techniques to determine sources accurately such as chemical mass balance and positive matrix factorization. Overall, this review highlights the importance of accurately characterizing the chemical composition of PM, the findings suggest that each study requires a prior analysis of the pollutants to be measured in order to follow the appropriate protocols, since the methodologies are extensive and may vary according to the particular pollutants.

Keywords: Air pollution, particulate matter, ions, metals.

Introducción

La contaminación atmosférica se refiere a la presencia de sustancias peligrosas en la atmósfera las cuales resultan perjudiciales para el entorno, los ecosistemas y la salud de las personas (Ubilla, C. et al. 2017. Maya, A. et al. 2018). Estas sustancias tienen diferentes características que varían de acuerdo a la región donde se analizan, la contaminación atmosférica está relacionada directamente con las emisiones generadas por las industrias y los vehículos (Dhiraj, G. et al. 2008), el rápido desarrollo económico de las ciudades (Wang, Y. et al. 2014) y factores de origen natural como las erupciones volcánicas o la suspensión del material cortical (Nagar, P.K. et al. 2017). Los contaminantes atmosféricos de origen antropogénico son principalmente la quema de biomasa, actividades de minería y cantera, refinamiento de petróleo, combustión de motores, transporte urbano y producción de energía (Vargas, S. et al. 2008). Las técnicas empleadas para caracterizar cada uno de los contaminantes dependen del propósito de la medición y el tipo de contaminante que se requiere caracterizar (Correa, M.A., Franco, S.A. et al. 2023).

La calidad del aire del Valle de Aburrá se ve afectada por la presencia de contaminantes atmosféricos (Bedoya, J., Martinez, E. 2009). En el Valle de Aburrá, estos contaminantes generan anualmente episodios peligrosos de contaminación (Rodriguez, O.C. 2017), están relacionados directamente con problemas respiratorios y cardiovasculares en los ciudadanos (Sanhueza, P.A. et al. 2009. Gray, D.L. et al. 2014), además según los componentes de estas partículas, pueden estar relacionados con otras enfermedades, por ejemplo, los niveles de cromo en la atmósfera pueden ocasionar diferentes tipos de cáncer (Megido, L. et al. 2017). Conocer las características de los contaminantes presentes en el Valle de Aburrá ayuda a establecer un panorama claro a la hora de identificar fuentes de emisión, posibles planes de contingencia y la posibilidad de crear estrategias de mitigación y prevención para que los contaminantes no alcancen niveles peligrosos para la salud de las personas y los ecosistemas.

Uno de los contaminantes atmosféricos más importantes es el material particulado (PM), globalmente se realiza el estudio de las fracciones de PM₁₀ y PM_{2.5}. El PM es un contaminante de composición física y química no específica (Cerón-Bretón, J.G. et al. 2019), también es conocido como aerosol atmosférico, tiene la capacidad de transportarse por el aire en largas distancias, su composición puede cambiar con los fenómenos atmosféricos (Dubey, B. et al.

2012), sin embargo, múltiples estudios han determinado que los principales componentes presentes en las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} son los compuestos de carbono, iones y metales (Correa, M.A., Franco, S.A. et al. 2023), las concentraciones reportadas para estos contaminantes en las estaciones de monitoreo del Valle de Aburrá suelen estar por encima de las concentraciones recomendadas por la OMS (Aguiar Gil, D. 2020).

El enfoque del presente documento consiste en aclarar el panorama con respecto a las metodologías empleadas para obtener las concentraciones de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, pasando por las técnicas de captación de los contaminantes, materiales de captación y muestreo, cadena de custodia para el transporte y almacenamiento, técnicas de caracterización, análisis de detección de fuentes de emisión y análisis de los resultados, en busca de contrastar la información con las características del Valle de Aburrá.

Mediante la metodología Proknow-c, se recopiló la información y se realizó un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas referentes al tema, el uso de la metodología permite encontrar de forma sistemática la información relacionada al contexto actual respecto a los métodos de caracterización, así como las ventajas y desventajas de las diferentes metodologías.

1 Planteamiento del problema

Determinar las diferentes metodologías para la caracterización de los iones y metales presentes en los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5} y con base en la información, establecer un panorama que permita identificar las posibilidades que brinda cada alternativa a la hora de realizar este tipo de mediciones en Medellín y el Valle de Aburrá.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica sobre las metodologías para la caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}.

2.2 Objetivos específicos

Determinar el estado del arte de la composición de iones y metales de los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5} y contrastar esta información con el contexto de la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá.

Conocer los equipos de captación, materiales de filtración, equipos de medición y concluir sus ventajas y desventajas para la caracterización de muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}.

Construir un portafolio bibliográfico que contenga el análisis bibliométrico de los parámetros relevantes en todo el proceso de caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}.

3 Marco teórico

El material particulado (PM) también conocido como aerosol atmosférico (Analí, M. et al. 2007), es un contaminante que contribuye al deterioro ambiental (Liu, Y. et al. 2018), influencia directamente en la formación de bruma (Gehui, W. et al. 2016), el efecto invernadero y el cambio climático (Ramanathan, V. et al. 2001). Las concentraciones de PM son utilizadas como indicadores de la calidad del aire (Chen, J. et al. 2020). Este contaminante puede transportarse por el aire por largas distancias (Galon-Negru, A.G. et al. 2019) y estar suspendido en la atmósfera por periodos prolongados (Vargas, S. et al. 2008). Es un contaminante complejo debido a que su composición física y química no es específica (Cerón-Bretón, J.G. et al. 2019), sin embargo, se tiene que sus principales componentes son compuestos de carbono, tales como el carbono elemental, el carbono negro o hidrocarburos policíclicos (Christopher, M. et al. 2013). Otro de sus componentes principales son los iones (Rengarajan, R. et al. 2011) y los metales (Evagelopoulos, V. et al. 2022). Sin embargo, la composición de los contaminantes está sujeta a las condiciones atmosféricas de la región, por lo que sus características pueden ser variables respecto al tiempo (Correa, M.A., Franco, S.A. et al. 2023).

El PM se clasifica de acuerdo al tamaño de sus partículas en PM₁₀ y PM_{2.5} (Partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a 10 μ m y 2.5 μ m respectivamente) (Kastury, F. et al. 2018), según su origen se clasifica en contaminante primario (cuando es emitido directamente a la atmósfera) o secundario (cuando se genera en la atmósfera como resultado de las interacciones de las partículas atmosféricas con el clima) (Quijano, A. et al. 2010).

La caracterización del PM₁₀ y PM_{2.5} brinda información de su origen y fuentes de emisión, este contaminante es ampliamente estudiado debido a sus efectos negativos en el ambiente (William J. et al. 2015). Es generado por diferentes fuentes antrópicas como la quema de biomasa (Sopittaporn, S. et al. 2023), el transporte público (Sanhueza, P.A. et al. 2009), incendios (Henderson, D.E. et al. 2005), procesos industriales y fuentes naturales como la suspensión del material cortical (Nagar, P.K. et al. 2017).

También es ampliamente investigado por sus efectos negativos en la salud de las personas (Donaldson, K. et al. 2005), por su tamaño diminuto, las partículas de PM₁₀ tienen la capacidad de alcanzar los pulmones (Donaldson, K. et al. 2005), por su parte, las partículas de PM_{2.5} pueden alcanzar la región alveolar y generar mayores daños en el sistema respiratorio (Lan, Y. et al.

2020) . Estos contaminantes están relacionados principalmente con enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Sanhueza, P.A. et al. 2009), sin embargo, los efectos negativos en la salud dependen de la concentración y complejidad de las partículas inhaladas, así como del tiempo de exposición, según la anterior, las consecuencias negativas se pueden reflejar en el corto o largo plazo (Anali, M. et al. 2007).

Los dispositivos más comunes para realizar la captación de muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} son los muestreadores de volumen , los cuales según el caudal de aire captado se clasifican en muestreadores de alto, medio y bajo volumen. Estos dispositivos succionan volúmenes de aire a través de filtros de características conocidas (Doyeon, K. et al. 2016). Otro tipo de dispositivo utilizado para tomar muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} son los muestreadores de impacto , estos dispositivos utilizan placas de impacto que sortean un proceso similar al tamizado de una muestra, separando las partículas en diferentes tamaños, las cuales son recolectadas en filtros o en otros medios de recolección (Galon-Negru, A.G. et al. 2019).

La recolección de muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} se realiza usualmente en filtros de diferentes características, uno de los principales tipos de filtros es el de fibra de vidrio, el cual es un material perdurable, sin embargo, pequeñas partículas del pueden desprenderse, afectar la integridad de la muestra y generar errores en el momento del análisis (Vaughn, E. et al. 2002). Por su parte, el filtro de cuarzo es ideal para tomar muestra de sustancias químicas sensibles debido a que es un material inerte y por esta razón no afecta la composición de la muestra, una desventaja de los filtros de cuarzo es que pueden ser más caros que otro tipos de filtros (Aikawa, M. et al, 2010). Los filtros de poliuretano son ligeros y económicos en comparación con otro tipo de filtros, una de sus limitaciones es que son muy porosos, por lo cual, podrían dejar de retener las partículas, generando pérdida de información e inexactitudes en los resultados (Brincat, J.P. et al. 2016). Los filtros de teflón son resistentes a altas temperaturas y a la corrosión, lo cual los hace ideales para ambientes duros, sin embargo, pueden contaminar las muestras (Hänninen, O.O. et al, 2002). Los filtros de aluminio son ampliamente usados, sin embargo son sensibles a la corrosión y dependiendo de los componentes de la muestra, pueden reaccionar y cambiar la composición de la muestra (Zhang, S. et al. 2016). Los filtros de policarbonato son útiles para mediciones prolongadas, sin embargo, pueden ser susceptibles a dañar la integridad de la muestra. Existen otros tipos de filtros de distintos materiales, como los filtros de membrana (Rojano, A. et al. 2011) o de nylon (Albaladejo, E. 2018). También se emplean biofiltros, algunas especies de

musgo o las hojas de árboles son útiles para estos procesos (Avnimelech, Y. 2006), sin embargo, al no ser materiales uniformes, la efectividad de los procesos de filtración se ve afectada .

Por lo anterior, la selección de los dispositivos de captación y muestreo dependen de muchos factores, como el ambiente, el presupuesto, la rigurosidad de los resultados, entre otros. En general, los filtros de fibra de vidrio y los de cuarzo suelen ser los más empleados para este tipo de procesos (Correa, M.A., Franco, S.A. et al. 2023).

El procedimiento para realizar la captación de los contaminantes requiere rigurosidad y cuidado con las muestras por lo cual se utilizan guías estandarizadas que permiten garantizar la calidad (Martinez, M.A. 2018), son ampliamente utilizadas las metodologías propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por su sigla en inglés) y las guías para la calidad del aire de la organización mundial de la salud (WHO, 2021). Por ejemplo el método EPA-5, establece los parámetros para la determinación de partículas atmosféricas (EPA, 2009), el método EPA-201A trata sobre la determinación de los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5} cuando son emitidos desde fuentes estacionarias (EPA, 2010)

Existen diferentes métodos para realizar la extracción de los iones y los metales de los filtros. La digestión ácida consiste en la adición de una solución ácida (usualmente ácido clorhídrico y ácido nítrico, aunque también se emplean otras sustancias como ácido perclórico y EDTA), posteriormente la muestra es elevada a altas temperaturas durante un periodo determinado de tiempo, la solución resultante puede ser analizada por distintas técnicas (Police, S. et al. 2016). Otro método para realizar la extracción de las sustancias de interés de los filtros es la sonicación, este proceso consiste en agitar la muestra con ondas sonoras de alta frecuencia, formando cavitaciones que facilitan la disolución de los compuestos presentes en los filtros (Bhuyan, P. et al. 2016). Algunos métodos de caracterización no requieren la extracción de los contaminantes, sino que son analizados directamente sobre los filtros, este es el caso de la microscopía electrónica de barrido (Chui, H.N. et al. 2017).

Hay diferentes tipos de técnicas para realizar la caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}. A continuación se mencionan las principales técnicas de caracterización:

La espectrometría de absorción atómica (AAS por su sigla en inglés) se basa en la absorción de luz de los átomos de la muestra (Ferreira, S. L. et al. 2018), la cantidad de luz que es

absorbida es cuantificada, dado que la intensidad de la absorción se relaciona directamente con la concentración de metales en una muestra.

La cromatografía iónica (IC por su sigla en inglés) es una técnica basada en la separación de los iones presentes en una muestra, en este caso, la muestra es depositada en una columna cromatográfica en la cual los componentes de la solución se separan en la columna según su afinidad y su carga eléctrica (Jackson, P.E. 2000).

La espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS por su sigla en inglés) permite determinar la composición elemental y la concentración de los elementos de una muestra, en este proceso las moléculas se descomponen en átomos libres cargados en plasma, lo que permite su detección, es una técnica muy sensible y permite determinar concentraciones de elementos en concentraciones muy bajas (Batchelor, M. et al. 2015).

La difracción por rayos X (XRD por su sigla en inglés) se utiliza para identificar la estructura de los materiales, permite encontrar estructuras cristalinas e impurezas en las muestras (Bunaciu, A.A. et al. 2015). La activación de neutrones es una técnica que permite la caracterización de metales en su composición elemental (Greenberg, R.R. et al. 2011). La selección de estas técnicas dependerá de las especificaciones que quieran ser cuantificadas y el nivel de precisión que se requiera alcanzar, algunas técnicas pueden ser utilizadas para caracterizar tanto iones como metales, mientras que otras técnicas son excluyentes con el tipo de sustancia que se requiere analizar.

4 Metodología

El proceso de desarrollo del conocimiento constructivista Proknow-C, es una metodología que permite recopilar información sobre un tema específico a partir de los intereses y limitantes de la investigación (Chaves, L.C. et al. 2012).

El objetivo de la metodología es obtener un portafolio de documentos relevantes al tema, para recopilar los datos respecto a la caracterización de iones y metales en muestras de PM10 y PM2.5, se construyeron comandos de búsqueda basados en el tema específico a partir de preguntas problematizadoras, tesauros, palabras clave y operadores booleanos, la Tabla 1 muestra los comandos de búsqueda empleados en las diferentes bases de datos.

Tabla 1

*Comandos de búsqueda para bases de datos**

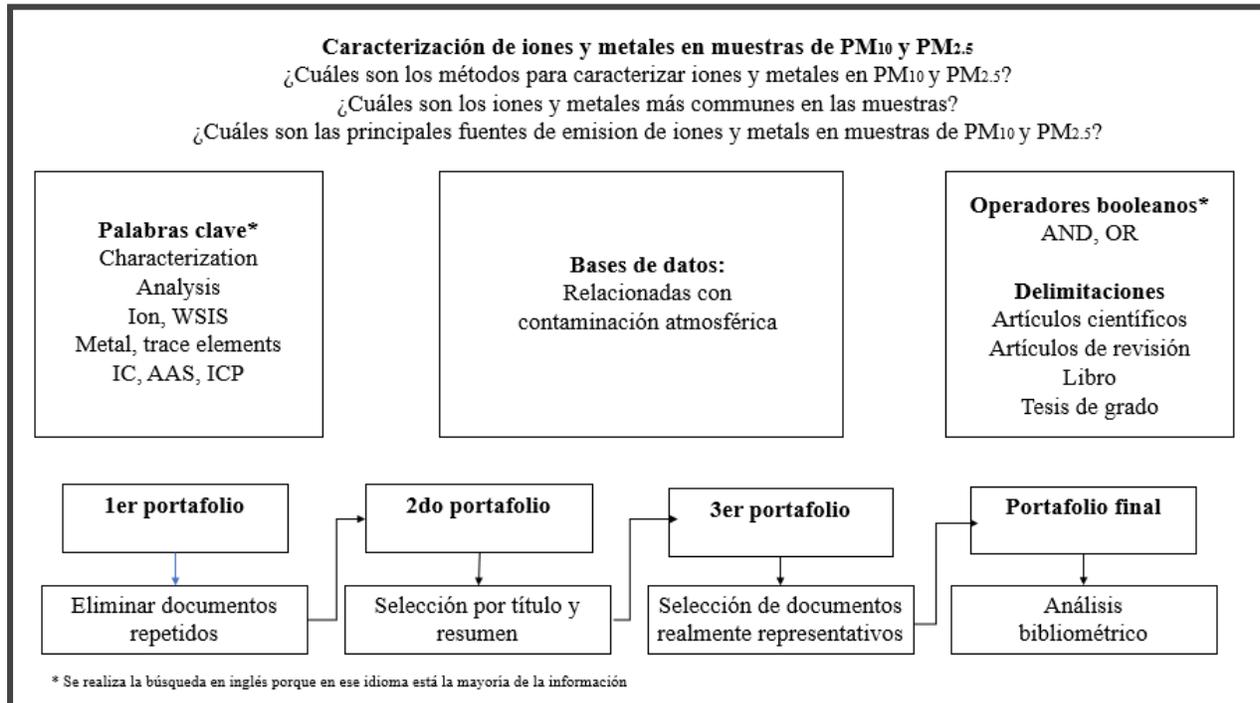
Tipo	Comando de búsqueda
1	(Characterization or analysis) and (PM10 or PM2.5) and (metals or ions)
2	(Characterization or analysis) and (PM10 or PM2.5) and (AAS or ICP)
3	(Characterization or analysis) and (PM10 or PM2.5) and (IC or chromatography)
4	(Characterization or analysis) and (PM10 or PM2.5) and (Metals or trace elements)
5	(Characterization or analysis) and (PM10 or PM2.5) and ((anion or cation) or WSIS)

* Las búsquedas se realizan en inglés ya que es el idioma en el que se encuentra la mayoría de la información

Inicialmente se emplean los comandos de búsqueda en las diferentes bases de datos relacionadas con el tema de contaminación atmosférica, así se obtuvo un primer portafolio de 3542 documentos, usando un gestor bibliográfico como Mendeley, se eliminaron los documentos duplicados, obteniendo un portafolio de 1121 documentos, los cuales fueron analizados según su título y resumen dejando un tercer portafolio de 103 documentos, finalmente, se realiza el estudio de estos documentos y la selección de aquellos que contienen información alineada con la investigación que se está realizando, así, se obtuvo un portafolio final de 41 documentos a los cuales se les realiza el análisis bibliométrico. La Figura 1 resume el proceso realizado para la obtención del portafolio final, el análisis bibliográfico de estos documentos es un archivo adjunto de este documento.

Figura 1

Resumen del procedimiento Proknow-C para obtener el portafolio bibliográfico.



Después de tener la información bibliométrica, se realiza el análisis de los documentos en cuatro puntos principales. Primero: identificación de artículos más representativos. Segundo: Análisis de los instrumentos principales para realizar los muestreos (dispositivos de captación, filtros, metodologías). Tercero: Identificación de las diferentes técnicas de caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, incluyendo los procedimientos para el cuidado y preparación de las muestras y la extracción de los contaminantes de interés de las mismas. Cuarto: Identificación de las especies de iones y metales más encontradas, porque se encuentran más estas especies, cuales son sus fuentes de emisión, sus efectos en la salud, entre otras.

5 Resultados

En los documentos analizados se encontró que se utilizan filtros de diferentes características para realizar el análisis de iones y metales, como los filtros de cuarzo (Duarte, R.M. et al. 2017), fibra de vidrio (Police, S. et al. 2016), teflon (Doria, A.C. et al. 2016), poliuretano (Javed, W. et al. 2018), policarbonato (Ezeh, G. et al. 2014). Algunos autores como (Liu, J. et al. 2017) no especificaron el tipo de filtro empleado. También se encontró el uso de hojas de Melaleuca (Zalajeviciute, R. et al. 2021) y de bolsas especiales para la recolección del contaminante (Bu-Olayan, A.H. et al. 2021). La Tabla 2 resume las características de los filtros encontrados en los documentos analizados (el anexo de este documento contiene la caracterización específica de los filtros utilizados en los documentos que hacen parte del portafolio final).

Tabla 2*

Características de los filtros

Material	Marca	Especie analizada	Contaminante	Referencia
Fibra de vidrio	Whatman	Metales	PM ₁₀ y PM _{2.5}	(Dubey, B. et al. 2012)
	Whatman	Iones	PM ₁₀	(Bhuyan, P. et al. 2016)
Cuarzo	Pallflex	Iones y metales	PM _{2.5}	(Ge, X. et al. 2017)
	-	Iones	PM ₁₀ y PM _{2.5}	(Hama, S. et al. 2021)
Poliuretano	-	Iones y metales	PM ₁₀ y PM _{2.5}	(Javed, W. et al. 2018)
Teflón	Whatman	Iones	PM ₁₀	(Doria, A.C. et al. 2016)
Aluminio	-	Metales	PM _{2.5}	(Galon-Negru, A.G. et al. 2019)

Policarbonato	Essque	Metales	PM ₁₀ y PM _{2.5}	(Ezeh, G. et al. 2014)
Sin identificar	-	Iones	PM _{2.5}	(Liu, J. et al. 2017)

* Resumen de la información analizada en el portafolio bibliográfico.

Entre los filtros utilizados para realizar la caracterización de iones y metales se destacan los filtros de cuarzo y los filtros de fibra de vidrio. La Figura 2a muestra los resultados obtenidos para este parámetro.

Respecto al uso de dispositivos para captar el contaminante de alto (Ge, X. et al. 2017), medio (Zhou, X. et al. 2021) y bajo volumen (Evagelopoulos, V. et al. 2022), así como el uso de muestreadores de impacto (Galon-Negru, A.G. et al. 2019), incluso se encontró el uso de dispositivos que realizan la caracterización de los iones y los metales de forma automática (Liu, J. et al. 2017). Respecto a los métodos de extracción de los iones y metales, se destaca la digestión ácida con ácido nítrico (HNO₃) (Police, S. et al. 2016), la ultrasonificación (Shahid, I. et al. 2016) y la extracción con microondas (Evagelopoulos, V. et al. 2022). En la Tabla 3 se presenta la información resumida referente a los dispositivos de captación y las metodologías para la extracción de los contaminantes.

Tabla 3*

Dispositivos de captación y métodos de extracción.

Tipo de dispositivo	Marca	Filtro	Método de extracción	Referencia
Bajo volumen	Partisol	Cuarzo	Sonicación	(Souza, E.J. et al. 2021)
Bajo volumen	-	Fibra de vidrio	Microondas	(Evagelopoulos, V. et al. 2022)
Medio volumen	Thianhong	Cuarzo	-	(Zhou, X. et al. 2021)
Alto volumen	Envirotech	Fibra de vidrio	Digestión ácida	(Bhuyan, P. et al. 2016)
Impacto	Dekati	Aluminio	Digestión ácida	(Galon-Negru, A.G. et al. 2019)

Sin identificar - Iones Digestión ácida (Liu, J. et al. 2017)

* Resumen de la información analizada en el portafolio bibliográfico.

Un total de 41 metales fueron encontrados en los documentos analizados: Aluminio (Al), Bario (Ba), Berilio (Be), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Cerio (Ce), Cesio (Cs), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Europio (Eu), Hierro (Fe), Galio (Ga), Oro (Au), Hafnio (Hf), Mercurio (Hg), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Neodimio (Nd), Niquel (Ni), Potasio (K), Plomo (Pb), Samario (Sm), Escandio (Sc), Sodio (Na), Plata (Ag), Estroncio (Sr), Tantalio (Ta), Terbio (Tb), Talio (Tl), Torio (Th), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Tungsteno (W), Uranio (U), Vanadio (V), Antimonio (Sb), Zinc (Zn), Zirconio (Zr). Por otro lado, un total de once iones fueron caracterizados: Calcio (Ca^{+2}), Magnesio (Mg^{+2}), Sodio (Na^{+}), Potasio (K^{+}), Amonio (NH_4^{+}), Cloruro (Cl^{-}), Sulfato (SO_4^{-2}), Nitrato (NO_3^{-}), Nitrito (NO_2^{-}), Fosfato (PO_4^{-3}), Fluoruro (F^{-}).

La Figura 2b muestra los metales que fueron encontrados con mayor frecuencia en los documentos analizados, por su parte la Figura 2c muestra la información correspondiente a los iones.

Las técnicas para la caracterización más empleadas por los autores fueron la cromatografía iónica (IC), la espectrometría de absorción atómica (AAS) y la inducción de plasma (ICP). La Tabla 4 resume las técnicas encontradas para caracterizar los iones y metales en las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, también da cuenta de las sustancias encontradas. otras técnicas fueron la Inducción de plasma por espectrometría (ICP-AES), y por emisión óptica (ICP-OES), Espectrometría de absorción de rayos X (XAS), Difracción de rayos X (XRD), Análisis por activación de neutrones (NAA), cromatografía líquida de alto performance (HPLC) y espectrometría de rayos ultra violeta (UV-VIS).

Tabla 4*

Técnicas de caracterización

Técnica	Sustancia	Referencia
AAS	Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb, Si, Mg, Cr, As, Na, K, Ca, Sr, Cd	(Evangelopoulos, V. et al. 2022)
IC	Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Amonio, Cloruro, Sulfato, Nitrato	(Javed, W. et al. 2018)

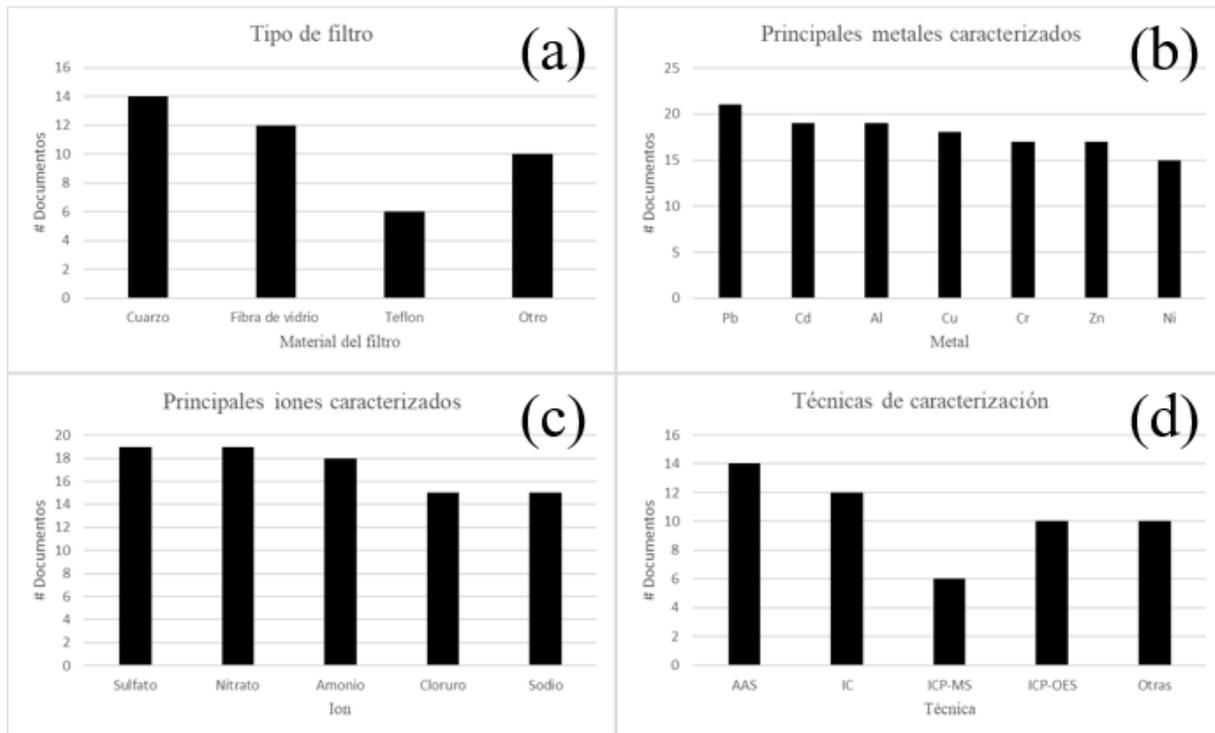
ICP-MS	Al, Ca, Fe, Mg, Zn, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, As, Ni, Se	(Zhou, X. et al. 2021)
Voltametría	Pb, Cu, Cd	(Police, S. et al. 2016)
ICP-AES	Al, Mn, Cr, V, Fe, Ni, Zn	(Police, S. et al. 2016)
ICP-OES	Al, Fe, Zn, Pb, Cu, Mg, C, Ba, Cr, K, Ca, Mn	(Zalajeviciute, R. et al. 2021)
HPLC	Amonio, Cloruro, Sulfato, Nitrato	(Quiteiro, S.L. et al. 2016)
XAS	As, Pb	(Kastury, F. et al. 2018)
UV-VIS	Amonio, Cloruro, Sulfato, Nitrato, Nitrito, Fosfato	(Doria, A.C. et al. 2016)
XRD	Fe, As	(Moreno, T. et al. 2007)

* Resumen de la información analizada en el portafolio bibliográfico.

La Figura 2d muestra las técnicas que más se utilizaron para la caracterización de iones y metales, donde se destacan las técnicas IC y AAS.

Figura 2

Resultados de la revisión bibliométrica. (a) Tipo de filtros encontrados, (b) Metales y (c) iones más comunes, y (d) técnicas de caracterización más empleadas.



6 Análisis

El PM está compuesto principalmente de compuestos de carbón, sin embargo, las fracciones que ocupan los iones inorgánicos y el material mineral son relevantes en su caracterización (Pey, J. et al. 2010). En los documentos analizados, se encontró que los metales pueden ocupar entre el 1% y el 5% de la masa de los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5}, la presencia de metales cobra gran interés ya que se relacionan estrechamente con las morbilidades asociadas al PM (Rengarajan, R. et al. 2011).

Entre los documentos analizados, se encontró que cobraron mayor relevancia el Pb, Cd, Al y Cu, entre otros, normalmente la fracción más grande de metales en las muestras de PM consisten en el Hierro. Los metales en el PM se deben principalmente a actividades antropogénicas, como la producción industrial (Gray, D.L. et al. 2014), emisiones vehiculares (Hernandez-Pellón, A. et al. 2019). Como ejemplo, las industrias metalúrgicas son fuente de Mn, Ni, Zn, Cr, De, Cu, Cd y Pb (Rosa, M.J. et al. 2016), en zonas donde se encuentran altos niveles de Ni, existe una correlación con las enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Rosa, M.J. et al. 2016), la exposición a este tipo de metales es peligrosa incluso en bajas concentraciones (Ezeh, G. et al. 2014).

Entre los documentos analizados, se encontró que se caracterizan principalmente los iones solubles, esto es debido a que las técnicas para la extracción de los contaminantes están diseñadas para obtener este tipo de sustancias, además, los iones solubles tienen mayor relevancia para analizar muestras de PM ya que normalmente ocupan entre el 30% y 50% de la masa de las muestras de PM (Tao, J. et al. 2015). Los iones más estudiados fueron el sulfato, nitrato y amonio, estos tres iones ocupan entre el 70% y 80% del total de iones presentes en el PM (Mohammed, G. et al. 2017). Referente a sus fuentes de emisión, estos contaminantes se forman por la presencia de sus gases precursores en la atmósfera, los óxidos de nitrógeno forman nitritos y nitratos, los nitritos no suelen tener mucha estabilidad y se terminan transformando en otras especies. De forma similar con los óxidos de azufre, que en procesos atmosféricos se terminan transformando en sulfatos, similar a lo que ocurre con el amoniaco y el amonio. Las altas concentraciones de estos iones en las partículas de PM influyen directamente la visibilidad de la atmósfera y pueden ocasionar lluvia ácida (Tao, J. et al. 2015).

Los iones cloruro y sodio provienen principalmente de la suspensión de las sales marinas (Ge, X. et al. 2017), el cloruro también puede venir de la combustión de carbón y otros procesos industriales (Hernandez-Pellón, A. et al. 2019), los iones de calcio y magnesio se encuentran en la atmósfera debido a la suspensión de polvos y también a actividades antrópicas como la agricultura y la construcción, normalmente las concentraciones de estos iones están relacionadas y son similares (Ge, X. et al. 2017). Por su parte el fluoruro se encuentra en bajas concentraciones, sus principales fuentes son la combustión de carbón y la fabricación de materiales de construcción (Evangelopoulos, V. et al. 2022)

Respecto a las metodologías para detectar las fuentes de emisión, se destaca el análisis mediante matrices de factorización positivas (PMF), la EPA tiene algunos procedimientos para este tipo de procesos como el protocolo EPA-PMF 5.0 (Javed, W. et al. 2018). Otra forma de determinar las fuentes de emisión consiste en análisis por medio de sistemas de información geográfica (Tao, J. et al. 2015), estas herramientas permiten la integración de datos espaciales con datos de la calidad del aire, permitiendo en su análisis la identificación de factores correlacionados como la forma del terreno, fuentes de emisión, dirección de los vientos, etc. Una de sus ventajas es que permite visualizar los datos en un contexto espacial, también permite modelar fuentes específicas de emisión y detectar zonas en las cuales las concentraciones de PM son peligrosas para los ciudadanos (Neckel, A. et al. 2003). El balance químico de masa, es otro de los métodos para detección de fuentes de emisión de contaminantes primarios y de formación de secundarios (Zhou, X. et al. 2021).

La ICP-MS es una técnica de alta sensibilidad y exactitud, puede determinar elementos en un gran rango. Otras metodologías que permiten cuantificar más que iones y metales, ya que también cuantifican no metales, estos procedimientos, como la activación de neutrones o de protones entregan resultado muy precisos, sin embargo, el uso de estas técnicas tiene un costo elevado, además los niveles de concentración de la mayoría de los compuestos es tan baja, que su estudio puede considerarse un tanto irrelevante.

Esta información puede ser replicada en el Valle de Aburrá porque entrega un contexto global de las técnicas de caracterización para los iones y los metales presentes en las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, sin embargo, como se mencionó anteriormente, la selección de los métodos, materiales, técnicas, etc, dependen exclusivamente de la necesidad que se quiere llenar con el estudio de los contaminantes.

7 Conclusiones

La metodología Prokow-C establece una ruta para realizar un análisis de literatura científica enfocada al tema de interés, en este caso se analizó el estado del arte de las técnicas de caracterización de iones y metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}, esta información es relevante porque permite entender el impacto de la contaminación debido al PM, cuyas características pueden variar de acuerdo a las condiciones del sitio de medición. La contaminación atmosférica es un tema de interés público ya que afecta de forma directa la salud pública y la calidad del medio ambiente.

Los iones ocupan una fracción importante del PM, se relacionan principalmente con efectos negativos al ambiente, como la formación de bruma, lluvia ácida o contribución al efecto invernadero, los metales ocupan una fracción menor, pero son relevantes porque incluso en pequeñas concentraciones se correlacionan con las principales enfermedades derivadas a partir de las consecuencias de inhalar partículas de PM₁₀ y PM_{2.5}.

Cuantificar las concentraciones de iones y metales en muestras de PM es importante porque provee información valiosa acerca de la calidad del aire, permitiendo evitar complicaciones a la salud de los ciudadanos, además, conocer las concentraciones permite identificar fuentes de emisión y las causas de la contaminación atmosférica, fundamental para trazar estrategias de control y mitigación de los altos niveles de polución.

Para realizar la caracterización de los contaminantes se requiere seguir protocolos estandarizados o las disposiciones que establecen las autoridades ambientales, donde se especifique el sitio donde se deben realizar las mediciones, el tipo de dispositivo que se puede usar, el tipo de filtro, la cadena de custodia de las muestras, las técnicas para la extracción de los contaminantes y la caracterización de los mismo.

Referencias

Aguiar Gil, D. (2020). *Evaluación del impacto de la contaminación atmosférica por PM_{2.5} sobre la mortalidad de la población en el Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia*. Tesis de maestría, Universidad de Antioquia, Medellín.

Aikawa, M.; Hiraki, T. *Difference in the use of a quartz filter and a PTFE filter as first-stage filter in the four-stage filter-pack method*. *Water Air Soil Pollut.* 2010, 213, 331–339.

Albaladejo Serrano, E (2018). *Variabilidad día-noche de la concentración y composición química de la fracción PM₁₀ en el centro urbano de Elche*. Tesis de grado, Universitat Miguel Hernandez. Facultad de farmacia. Elche

Analí, M.; Harvi, V.; Neyma, G.; César, G.; Lorena, A.; Alberto, C.; María, L. *Metales en PM₁₀ y su dispersión en una zona de alto tráfico vehicular*. *Interciencia* 2007, 32, 312–317.

Avnimelech, Y. *Bio-filters: The need for a new comprehensive approach*. *Aquac. Eng.* 2006, 34, 172–178.

Batchelor-McAuley, C.; Kätelhön, E.; Barnes, E.O.; Compton, R.G.; Laborda, E.; Molina, A. *Recent advances in voltammetry*. *ChemistryOpen* 2015, 4, 224–260

Bedoya, J., & Martinez, E. (2009). *Calidad Del Aire En El Valle De Aburrá Antioquia -Colombia*. *DYNA*, 76(158), 7-15.

Bhuyan, P.; Barman, N.; Bora, J.; Daimari, R.; Deka, P.; Hoque, R.R. *Attributes of aerosol bound water soluble ions and carbon, and their relationships with AOD over the Brahmaputra Valley*. *Atmos. Environ.* 2016, 142, 194–209, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.045>.

Brincat, J.P.; Sardella, D.; Muscat, A.; Decelis, S.; Grima, J.N.; Valdramidis, V.; Gatt, R. *A review of the state-of-the-art in air filtration technologies as may be applied to cold storage warehouses*. *Trends Food Sci. Technol.* 2016, 50, 175–185.

Bunaciu, A.A.; UdrișTioiu, E.G.; Aboul-Enein, H.Y. *X-ray diffraction: Instrumentation and applications*. *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2015, 45, 289–299.

Bu-Olayan, A.H.; Thomas, B.V. *Exposition of respiratory ailments from trace metals concentrations in incenses*. *Sci. Rep.* 2021, 11, 1–10.

Cerón Bretón, J.G.; Cerón Bretón, R.M.; Espinosa Guzman, A.A.; Guarnaccia, C.; Martínez Morales, S.; Lara Severino, R.d.C.; Rangel Marrón, M.; Hernández López, G.;

Carranco Lozada, S.E.; Kahl, J.D.W.; et al. *Trace Metal Content and Health Risk Assessment of PM₁₀ in an Urban Environment of León, Mexico*. *Atmosphere* 2019, 10, 573. <https://doi.org/10.3390/atmos10100573>

Chaves, L.C.; Ensslin, L.; Ensslin, S.R.; Petri, S.M.; Da Rosa, F.S. *Processo de Mapeamento das Publicações Científicas de Um Tema: Portfólio Bibliográfico e Análise Bibliométrica sobre avaliação de desempenho de cooperativas de produção agropecuária*. *Rev. Eletrônica Estratégia Negócios* 2012, 5, 3. <https://doi.org/10.19177/reen.v5e320123-27>

Chen, J.; Hoek, G. *Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis*. *Environ. Int.* 2020, 143, 105974.

Christopher, M.; Long Marc, A.; Nascarella Peter, A. Valberg, *Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions*. *Environ. Pollut.* 2013, 181, 271–286, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.009>.

Chui Betancur, Heber Nehemías, Acosta Najarro, Dwight Roberto, & Roque Huanca¹, Bernardo. (2017). *Identificación del material de partículas finas (pm_{2.5}) mediante microscopía electrónica de escaneo cerca de la planta de cemento de cesur del distrito de Caracoto, Puno, Perú*. *Revista Boliviana de Química*, 34(3), 72-78.

Correa, M.A.; Franco, S.A.; Gómez, L.M.; Aguiar, D.; Colorado, H.A. *Characterization Methods of Ions and Metals in Particulate Matter Pollutants on PM_{2.5} and PM₁₀ Samples from Several Emission Sources*. *Sustainability* 2023, 15, 4402. <https://doi.org/10.3390/su15054402>

Dhiraj, G.; Krishnamurthy, V.; Adhikary, P. *The Influence of Meteorological Conditions on PM₁₀ Concentrations in Kath-mandu Valley*. *Int. J. Environ. Res.* 2008, 2, 2. ISSN: 1735-6865

Donaldson, K.; Mills, N.; MacNee, W.; Robinson, S.; Newby, D. *Role of inflammation in cardiopulmonary health effects of PM*. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2005, 207, 483–488, ISSN 0041-008X, <https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.02.020>.

Doria, A.C.; Fagundo, C.J. *Caracterización química de material particulado PM₁₀ en la atmósfera de La Guajira, Colombia*. *Rev. Colomb. Química* 2016, 45, 19–29. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n2.56991>

Doyeon Kim, Jinsang Jung, Hyoeun Lee, Seong-Ho Choi, Sangil Lee, Sanghyub Oh, *Characterization of sampling artifacts in the measurement of carbonaceous particles using high-*

and low-volume samplers in Daejeon, Korea, *Atmospheric Environment*, Volume 139, 2016, Pages 157-166, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.029>.

Duarte, R.M.; Matos, J.T.; Paula, A.S.; Lopes, S.P.; Pereira, G.; Vasconcellos, P.; Gioda, A.; Carreira, R.; Silva, A.M.; Duarte, A.C.; et al. *Structural signatures of water-soluble organic aerosols in contrasting environments in South America and Western Europe*. *Environ. Pollut.* 2017, 227, 513–525, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.011>.

Dubey, B.; Pal, A.K.; Singh, G. *Trace metal composition of airborne particulate matter in the coal mining and non-mining areas of Dhanbad Region, Jharkhand, India*. *Atmos. Pollut. Res.* 2012, 3, 238–246, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.5094/APR.2012.026>.

Environmental Protection Agency. *Method 201A-Determination of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from stationary sources (constant sampling rate procedure)*, 1 de noviembre de 2010.

Environmental Protection Agency. *Method 5-Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources, CFR Promulgated Test Methods (TM)*, 27 de octubre de 2009

Evagelopoulos, V.; Charisiou, N.D.; Zoras, S. *Dataset of Polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements in PM_{2.5} and PM₁₀ atmospheric particles from two locations in North-Western Greece*. *Data Brief* 2022, 42, 108266, ISSN 2352-3409, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108266>.

Ezeh, G.; Obioh, I.; Asubiojo, O.; Chiari, M.; Nava, S.; Calzolari, G.; Lucarelli, F.; Nuviadenu, C. *Elemental compositions of PM_{10-2.5} and PM_{2.5} aerosols of a Nigerian urban city using ion beam analytical techniques*. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* 2014, 334, 28–33, ISSN 0168-583X, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.04.022>.

Ferreira, S.L.; Bezerra, M.A.; Santos, A.S.; dos Santos, W.N.; Novaes, C.G.; de Oliveira, O.M.; Garcia, R.L. *Atomic absorption spectrometry—A multi element technique*. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2018, 100, 1–6.

Galon-Negru, A.G.; Olariu, R.I.; Arsene, C. *Size-resolved measurements of PM_{2.5} water-soluble elements in Iasi, north-eastern Romania: Seasonality, source apportionment and potential implications for human health*. *Sci. Total Environ.* 2019, 695, 133839, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133839>

Ge, X.; Li, L.; Chen, Y.; Chen, H.; Wu, D.; Wang, J.; Xie, X.; Ge, S.; Ye, Z.; Xu, J.; et al. *Aerosol characteristics and sources in Yangzhou, China resolved by offline aerosol mass*

spectrometry and other techniques. Environ. Pollut. 2017, 225, 74–85, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.044>.

Gehui, W.; Renyi, Z.; Mario, E.; Lingxiao, Y.; Misti, L.; Min, H.; Yun, L. *Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2016, 113, 13630–13635. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616540113>

Gray, D.L.; Wallace, L.A.; Brinkman, M.C.; Buehler, S.S.; La Londe, C. *Respiratory and Cardiovascular Effects of Metals in Ambient Particulate Matter: A Critical Review*. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 2014, 135–203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0_3

Greenberg, R.R.; Bode, P.; Fernandes, E.A.D.N. *Neutron activation analysis: A primary method of measurement*. Spectrochim. Acta Part B: At. Spectrosc. 2011, 66, 193–241.

Hama, S.; Kumar, P.; Alam, M.S.; Rooney, D.J.; Bloss, W.J.; Shi, Z.; Harrison, R.M.; Crilley, L.R.; Khare, M.; Gupta, S.K. *Chemical source profiles of fine particles for five different sources in Delhi*. Chemosphere 2021, 274, 129913, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129913>.

Hänninen, O.O.; Koistinen, K.J.; Kousa, A.; Keski-Karhu, J.; Jantunen, M.J. *Quantitative analysis of environmental factors in differential weighing of blank Teflon filters*. J. Air Waste Manag. Assoc. 2002, 52, 134–139.

Henderson, D.E.; Milford, J.B.; Miller, S.L. *Prescribed burns and wildfires in Colorado: Impacts of mitigation measures on indoor air particulate matter*. J. Air Waste Manag. Assoc. 2005, 55, 1516–1526.

Hernández-Pellón, A.; Fernández-Olmo, I. *Airborne concentration and deposition of trace metals and metalloids in an urban area downwind of a manganese alloy plant*. Atmos. Pollut. Res. 2019, 10, 712–721, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.009>.

Jackson, P.E. Ion chromatography in environmental analysis. Encycl. Anal. Chem. 2000, 27–79.

Javed, W.; Wexler, A.S.; Murtaza, G.; Ahmad, H.R.; Basra, S.M. *Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan*. Atmósfera 2015, 28, 99–116, ISSN 0187-6236, [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(15\)30003-5](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(15)30003-5).

Kastury, F.; Smith, E.; Karna, R.R.; Scheckel, K.G.; Juhasz, A. *An inhalation-ingestion bioaccessibility assay (IIBA) for the assessment of exposure to metal(loid)s in PM₁₀*. Sci. Total

Environ. 2018, 631–632, 92–104, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.337>.

Lan, Y.; Ng, C.T.; Ong, R.X.S.; Muniasamy, U.; Baeg, G.H.; Ong, C.N.; Yu, L.E.; Bay, B.H. *Urban PM_{2.5} reduces angiogenic ability of endothelial cells in an alveolar-capillary co-culture lung model*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020, 202, 110932, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110932>.

Liu, J.; Wu, D.; Fan, S.; Mao, X.; Chen, H. *A one-year, on-line, multi-site observational study on water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} over the Pearl River Delta region*. *China Sci. Total Environ.* 2017, 601–602, 1720–1732, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.039>.

Liu, Y.; Zhang, W.; Yang, W.; Bai, Z.; Zhao, X. *Chemical compositions of PM_{2.5} emitted from diesel trucks and construction equipment*. *Aerosol Sci. Eng.* 2018, 2, 51–60.

Martínez-Flores, M.A., Arias-Osorio, A., Cortes-López, E., Tamayo-Flores, G.A., Barajas-Martínez, D.K., Hernández-Flores, N., Celada-Murillo, A.T., Colín-Aguilar, A.L., (2018). *Concentración, morfología y composición química de partículas PST y PM₁₀, colectadas en la chimenea de tres motores de combustión interna de alta capacidad (42 MW)*. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19 (03), 291-303. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2018.19n3.025>

Maya, A.; del Pilar, M.; Posada-Posada; Isabel, M.; Nowak David, J.; Hoehn Robert, E. *Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá*. *Colomb. For.* 2019, 22, 5–16. <https://doi.org/10.14483/2256201x.13695>

Megido, L. Suárez-Peña, B. Suburban air quality: *Human health hazard assessment of potentially toxic elements in PM₁₀*, *Chemosphere*, Volume 177, 2017, Pages 284-291, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.009>.

Mohammed, G.; Karani, G.; Mitchell, D. *Trace Elemental Composition in PM₁₀ and PM_{2.5} Collected in Cardiff, Wales* *Energy Procedia* 2017, 111, 540–547, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.216>.

Moreno, T.; Oldroyd, A.; McDonald, I.; Gibbons, W. *Preferential fractionation of trace metals–metalloids into PM₁₀ resuspended from contaminated gold mine tailings at Rodalquilar, Spain*. *Water Air Soil Pollut.* 2007, 179, 93–105.

Nagar, P.K.; Singh, D.; Sharma, M.; Kumar, A.; Aneja, V.P.; George, M.P.; Agarwal, N. *Characterization of PM_{2.5} in Delhi: Role and impact of secondary aerosol, burning of biomass, and municipal solid waste and crustal matter*. Environ. Sci. Pollut. Res. 2017, 24, 25179–25189. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0171-3>

Neckel, A.; Oliveira, M.L.; Maculan, L.S.; Bodah, B.W.; Gonçalves, A.C.; Silva, L.F. *Air pollution in central European capital (Budapest) via self-made passive samplers and Sentinel-3B SYN satellite images*. Urban Clim. 2023, 47, 101384, ISSN 2212-0955. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101384>.

Pey, J.; Alastuey, A.; Querol, X.; Pérez, N.; Cusack, M. *A simplified approach to the indirect evaluation of the chemical composition of atmospheric aerosols from PM mass concentrations*. Atmos. Environ. 2010, 44, 5112–5121, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.009>.

Police, S.; Sahu, S.K.; Pandit, G.G. *Chemical characterization of atmospheric particulate matter and their source apportionment at an emerging industrial coastal city, Visakhapatnam, India*. Atmos. Pollut. Res. 2016, 7, 725–733, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.03.007>.

Quijano Parra, A.; Quijano Vargas, M.J.; Henao Martínez, J.A. *Caracterización físicoquímica del material par-ticu-ladofracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia*. Bistua: Rev. De La Fac. De Cienc. Básicas 2010, 8, 1–20. [fecha de Consulta 15 de Diciembre de 2022]. ISSN: 0120-4211. Available online: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90315226007> (accessed on: 15 December 2022).

Quiterio, S.L.; Arbilla, G.; Escaleira, V.; Silva, C.R.S.; Wasserman, M.A. *Characterization of Airborne Trace Metal Distribution in Baixada Fluminense, Rio de Janeiro, Brazil, by Operational Speciation*. Bull. Environ. Con-Tami-Nation Toxicol. 2006, 77, 119–125. <https://doi.org/10.1007/s00128-006-1040-9>

Ramanathan, V.; Crutzen, P.J.; Kiehl, J.T.; Rosenfeld, D. *Atmosphere —Aerosols, climate, and the hydrological cycle*. Science 2001, 294, 2119–2124.

Rengarajan, R.; Sudheer, A.; Sarin, M. *Wintertime PM_{2.5} and PM₁₀ carbonaceous and inorganic constituents from urban site in western India*. Atmos. Res. 2011, 102, 420–431, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.005>.

Rodríguez, O. C. G. (2017). *Contingencia ambiental de Medellín: Una oportunidad para mejorar la calidad del aire en Colombia*. Revista Universidad EAFIT, 52(170), 44-55.

Rojano Alvarado, Roberto, Pérez Montiel, Jhonny, & Deluque, Jorge. (2011). *Análisis comparativo de las mediciones de material particulado PM₁₀*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (58), 27-35.

Rosa, M.J.; Benedetti, C.; Peli, M.; Donna, F.; Nazzaro, M.; Fedrighi, C.; Lucchini, R. *Association between personal exposure to ambient metals and respiratory disease in italian adolescents: A cross-sectional study*. BMC Pulm. Med. 2016, 16. <https://doi.org/10.1186/s12890-016-0173-9>

Sanhueza, P.A.; Torreblanca, M.A.; Diaz-Robles, L.A.; Schiappacasse, L.N.; Silva, M.P.; Teresa, D.A. *Particulate Air Pollution and Health Effects for Cardiovascular and Respiratory Causes in Temuco, Chile: A Wood-Smoke Polluted Urban Area*. J. Air Waste Manag. Assoc. 2009, 59, 1481–1488. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1481>

Shahid, I.; Kistler, M.; Mukhtar, A.; Ghauri, B.M.; Cruz, C.R.-S.; Bauer, H.; Puxbaum, H. *Chemical characterization and mass closure of PM₁₀ and PM_{2.5} at an urban site in Karachi—Pakistan*. Atmos. Environ. 2016, 128, 114–123, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.005>.

Sopittaporn, S.; Somporn, C.; Urai, T.; Sukon, P.; Tippawan, P. *Determination of PM₁₀ and its ion composition emitted from biomass burning in the chamber for estimation of open burning emissions*. Chemosphere 2023, 93, 1912–1919, ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.071>.

Souza, E.J.S.; Mora, C.Z.; Zuluaga, B.H.A.; Amaral, C.D.B.; Grassi, M.T. *Multi-elemental analysis of particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀ by ICP OES*. Talanta 2021, 221, 121457, ISSN 0039-9140, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121457>

Tao, J.; Zhang, L.; Gao, J.; Wang, H.; Chai, F.; Wang, S. *Aerosol chemical composition and light scattering during a winter season in Beijing*. Atmos. Environ. 2015, 110, 36–44, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.037>.

Ubilla, C.; Yohannessen, K. *Contaminación Atmosférica Efectos En La Salud Respiratoria En El Niño*. Rev. Médica Clínica Las Condes 2017, 28, 111–118. ISSN 0716-8640, <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>.

Vargas, S.; William, O.; Lucia, O.; Eduardo, P.; Orlando, S. *Contaminación Atmosférica Y Efectos Respiratorios En Niños, En Mujeres Embarazadas Y En Adultos Mayores*. Rev. UDCA Ac-Tualidad Divulg. Científica 2008, 11, 31–45.

Vaughn, E.; Ramachandran, G. *Fiberglass vs. synthetic air filtration media*. Int. Nonwovens J. 200 2. <https://doi.org/1558925002OS-01100309>.

Wang, Y.; Zhang, R.; Saravanan, R. *Asian pollution climatically modulates mid-latitude cyclones following hierarchical modelling and observational analysis*. Nat. Commun. 2014, 5, 3098. <https://doi.org/10.1038/ncomms4098>

William, J.; Shaughnessy, M.M.; Venigalla, T.D. *Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population*. Atmos. Environ. 2015, 123, 102–111, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.039>.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

Zalakeviciute, R.; Alexandrino, K.; Mejia, D.; Bastidas, M.G.; Oleas, N.H.; Gabela, D.; Rybarczyk, Y. *The effect of national protest in Ecuador on PM pollution*. Sci. Rep. 2021, 11, 1–12.

Zhang, S.; Wang, Y.; Tan, Y.; Zhu, J.; Liu, K.; Zhu, J. *Anodic aluminum oxide with fine pore size control for selective and effective particulate matter filtering*. Mater. Res. Express 2016, 3, 074004.

Zhou, X.; Li, Z.; Zhang, T.; Wang, F.; Tao, Y.; Zhang, X.; Wang, F.; Huang, J.; Cheng, T.; Jiang, H.; et al. *Chemical nature and predominant sources of PM₁₀ and PM_{2.5} from multiple sites on the Silk Road, Northwest China*. Atmos. Pollut. Res. 2021, 12, 425–436. ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.10.001>.

Anexos

Anexo 1. Matriz de análisis bibliométrico.

Enlace directo: [+](#) Matriz de análisis bibliométrico