

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**



**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO  
PM 2.5 Y PM10 EN LA CIUDAD DE CUSCO EN EL PERIODO 2017, 2018 Y  
2020**

**PRESENTADA POR:**

**Br. Bruce Stephen Warthon Olarte**

**Br. Ariatna Isabel Zamalloa Ponce De Leon**

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
FÍSICO**

**ASESOR:**

**Dr. Julio Lucas Warthon Ascarza**

**CO-ASESOR:**

**Mg. Marco Antonio Zamalloa Jara**

**FINANCIADO POR:**

Programa: “Yachayninchis Wiñarinpapaq” - UNSAAC

**CUSCO – PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:.....

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 Y PM10 EN LA CIUDAD DE CUSCO EN EL PERIODO 2017, 2018 Y 2020

presentado por: BRUCE STEPHEN WARTHON OLARTE con DNI Nro.: 72946759... presentado por: ARIATNA ISABEL ZAMALLOA PONCE DE LEON con DNI Nro.: 73043316..... para optar el título profesional/grado académico de FÍSICO.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 04 de SEPTIEMBRE..... de 2024.....

  
.....  
Firma

Post firma JULIO LUCAS WARTHON ASCARZA

Nro. de DNI 23929253.....

ORCID del Asesor 0000-0002-9242-7102.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:378081384 -

## NOMBRE DEL TRABAJO

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 EN LA CIUDAD DE CUSCO EN EL PERIODO 2017, 2018 Y 2020**

## AUTOR

**Ariatna Isabel Zamalloa Ponce de Leon, Bruce Stephen Warthon Olarte**

## RECUENTO DE PALABRAS

**43538 Words**

## RECUENTO DE CARACTERES

**243338 Characters**

## RECUENTO DE PÁGINAS

**208 Pages**

## TAMAÑO DEL ARCHIVO

**10.5MB**

## FECHA DE ENTREGA

**Sep 3, 2024 10:54 PM GMT-5**

## FECHA DEL INFORME

**Sep 3, 2024 10:57 PM GMT-5**

● **3% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 3% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)

## DEDICATORIAS

*A Dios, cuya luz y amor han sido mi guía constante en este viaje de aprendizaje y crecimiento.*

*A mi maravillosa familia, su amor incondicional y apoyo constante han sido el motor que impulsa mi camino hacia el éxito.*

*A mis padres y hermana, su sacrificio, amor y dedicación son la inspiración que me impulsa a superar cada obstáculo y alcanzar mis metas.*

*A mi compañero de trabajo y de vida, por su amor, paciencia y aliento constante, siendo siempre mi impulso para mejorar y seguir adelante.*

*Gracias a todos ustedes, este logro no solo es mío, sino que también es un reflejo del amor y la dedicación que han puesto en mi vida.*

*Ariatna Isabel Zamalloa Ponce de Leon*

*¡Gracias, Dios, por otorgarme esta vida y por tu gracia que me ha llevado hasta aquí, en este camino que has trazado para mí, gracias virgen de la Merced y Patrón San Blas por todo!*

*Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi papá Julito mi mamita Amanda, y a mis amados hermanos Gregcito y Amandita. También a mi compañera de tesis y de vida, Ariatna. Este paso en mi carrera profesional, sostenido sobre hombros de gigantes, es un logro que compartimos como familia. Vuestras enseñanzas, consejos e ideas han sido fundamentales para este logro, reflejo de nuestro amor y fortaleza como familia.*

*Agradezco enormemente a mis tíos, primos y mejores amigos por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida académica. Este trabajo de investigación también es fruto de su inmenso respaldo y motivación.*

*A mamá Juanita y mamá Rufina, que desde antes de mi nacimiento esperaban grandes cosas de mí, dedico este logro con un beso al cielo.*

*A todos aquellos que han formado parte de este largo y hermoso proceso, esta investigación va dedicada con profundo aprecio a cada uno de ustedes.*

*¡SIUUUU!*

*Bruce Stephen Warthon Olarte*

## AGRADECIMIENTOS

*Los tesisistas, deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento a Dios, nuestras familias y nuestras amistades que nos brindaron un apoyo inmenso durante nuestro proceso de formación profesional.*

*Queremos reconocer y agradecer de manera especial a nuestros asesores, el Dr. Julio Warthon y el Mgt. Marco Zamalloa, por impartirnos un conocimiento científico de alto nivel, orientarnos en valores y principios, y por su constante acompañamiento que ha permitido la presentación de esta investigación.*

*Nos sentimos agradecidos con el Dr. Raúl Chura por su apoyo constante a lo largo de nuestros años como estudiantes. Su dedicación y motivación en cada paso que dimos nos han ayudado a convertirnos en quienes somos hoy.*

*También queremos expresar nuestro agradecimiento al Dr. Daniel Palacios, la Dra. Patrizia Pereyra, la Dra. Adriana Larrea y el Dr. Melquiades Barragán por brindarnos la oportunidad de adentrarnos en la física a través de la práctica y por compartir con nosotros sus amplios conocimientos, que han contribuido significativamente en nuestra vida profesional.*

*Agradecemos de corazón a nuestra alma mater, la tricentenaria Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así como al Vicerrectorado de Investigación a través del programa Yachayninchis Wiñarinanpaq por financiar nuestra investigación y al acompañamiento de la Sra. Yolanda Morales por guiarnos durante el desarrollo de este trabajo de la mejor manera posible. También extendemos nuestro agradecimiento al Centro de Investigación de Energía y Atmósfera por brindarnos valiosas oportunidades de investigación.*

*Finalmente, queremos agradecer a todos aquellos que contribuyeron de alguna manera en nuestra formación académica y profesional. Este trabajo es el resultado de su apoyo y colaboración. ¡Gracias a todos!*

*Los Autores*

## INDICE GENERAL

DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	xvii
RESUMEN .....	18
ABSTRACT .....	20
INTRODUCCIÓN.....	22
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	25
1.1.    Situación Problemática.....	25
1.2.    Formulación del Problema .....	26
1.2.1. Problema General .....	26
1.2.2. Problemas específicos .....	26
1.3.    Justificación de la Investigación .....	27
1.4.    Objetivos de la Investigación .....	28
1.4.1. Objetivo General .....	28
1.4.2. Objetivos Específicos .....	28
1.5.    Hipótesis.....	29
1.5.1. Hipótesis General .....	29
1.5.2. Hipótesis Específica .....	29
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	31
2.1.    Bases Teóricas .....	31
2.1.1. Contaminación atmosférica.....	31
2.1.2. Material Particulado .....	31
2.1.2.1. Física y Química del material particulado .....	33
2.1.2.2. Diámetro de partícula.....	34

2.1.2.3. Composición química y su relación con el tamaño de partícula.....	35
2.1.3. Fuentes de contaminación de material particulado por su composición elemental .....	36
2.1.4. Instrumentación y método de muestreo .....	39
2.1.5. Impacto de actividades antropogénicas.....	41
2.1.6. Efectos del material particulado en la salud humana .....	42
2.1.7. Normativas ambientales y estándares de calidad del aire .....	43
2.1.8. Análisis y caracterización del PM.....	44
2.1.9. Microscopia electrónica de barrido (SEM) .....	45
2.1.10.Principios físicos de la espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS).....	46
2.1.10.1. Rayos X.....	46
2.1.10.2. Emisión de rayos X característicos y EDS .....	47
2.1.10.3. Análisis de espectros de rayos X y líneas espectrales.....	49
2.1.11.Técnicas de microanálisis SEM-EDS .....	51
2.2.    Antecedentes de la Investigación .....	52
2.2.1. Antecedentes Internacionales .....	52
2.2.2. Antecedentes Nacionales.....	55
2.2.3. Antecedentes Locales .....	57
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	60
3.1.    Localización política y geográfica .....	60
3.2.    Diseño y nivel de investigación .....	61
3.2.1.1. Diseño de la investigación .....	61
3.2.2. Nivel de investigación.....	62
3.3.    Unidad de análisis .....	63
3.4.    Metodología .....	63
3.4.1. Metodología de muestreo de material particulado .....	63
3.4.1.1. Sitios de muestreo .....	63
3.4.1.2. Preparación del muestreador y filtros .....	64
3.4.1.3. Instalación del muestreador en el sitio de medición.....	65
3.4.1.4. Operación del muestreador .....	66
3.4.1.5. Recuperación del filtro.....	66

3.4.2. Obtención de la concentración de material particulado .....	66
3.4.3. Material particulado respecto a las variables meteorológicas .....	68
3.4.3.1. Datos de variables meteorológicas.....	68
3.4.3.2. Correlación de Pearson .....	69
3.4.4. Análisis SEM-EDS.....	70
3.4.4.1. Selección de filtros para la caracterización.....	70
3.4.4.2. Preparación de muestras .....	72
3.4.4.3. Análisis EDS de muestras de PM .....	73
3.4.5. Análisis de datos.....	74
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
4.1. Concentración de material particulado en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020. ....	76
4.1.1. Concentración de material particulado por sitio de monitoreo .....	76
4.1.2. Variación de concentración de material particulado a través de los años por cada sitio de monitoreo. ....	77
4.1.3. Evaluación de la concentración de material particulado respecto a las variables meteorológicas .....	81
4.1.3.1. Correlación de Pearson entre variables meteorológicas y material particulado.....	81
4.2. Caracterización fisicoquímica del material particulado .....	83
4.2.1. Concentración de material particulado en los filtros seleccionados para la caracterización fisicoquímica .....	84
4.2.2. Caracterización de filtro blanco .....	85
4.2.3. Caracterización del punto de muestreo S1: Campus Universitario, Facultad de Educación. ....	89
4.2.3.1. Caracterización elemental de PM2.5 del punto de muestreo S1 del año 2017 (Código de Filtro: 22).....	90
4.2.3.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S1 del año 2017 (Código de Filtro: 31) .....	91
4.2.4. Caracterización del punto de muestreo S2: San Sebastián, APV Paraiso de Fátima. ....	92
4.2.4.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S2 del año 2017 (Código de Filtro: 42) .....	94
4.2.4.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S2 del año 2017 (Código de Filtro: 46) .....	95
4.2.5. Caracterización del punto de muestreo S3: Campus Universitario, puerta número 05 (Multired). ....	96

4.2.5.1.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2017 (Código de Filtro: 37) .....	98
4.2.5.2.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S3 del año 2017 (Código de Filtro: 54) .....	99
4.2.5.3.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2017 (Código de Filtro: 57) .....	100
4.2.5.4.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S3 del año 2020 (Código de Filtro: 194) .....	101
4.2.5.5.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S3 del año 2020 (Código de Filtro: 237) .....	103
4.2.5.6.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2020 (Código de Filtro: 202) .....	104
4.2.5.7.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2020 (Código de Filtro: 268) .....	105
4.2.6.	Caracterización del punto de muestreo S4: Colegio Clorinda Matto de Turner. ....	106
4.2.6.1.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S4 del año 2017 (Código de Filtro: 87) .....	108
4.2.6.2.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S4 del año 2017 (Código de Filtro: 83) .....	109
4.2.7.	Caracterización del punto de muestreo S5: Wanchaq, Local del Municipio Distrital. ....	110
4.2.7.1.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S5 del año 2017 (Código de Filtro: 90) .....	111
4.2.7.2.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S5 del año 2018 (Código de Filtro: 94) .....	112
4.2.8.	Caracterización del punto de muestreo S6: Wanchaq, Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos. ....	113
4.2.8.1.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S6 del año 2018 (Código de Filtro: 98) .....	115
4.2.8.2.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S6 del año 2018 (Código de Filtro: 101) .....	116
4.2.9.	Caracterización del punto de muestreo S7: Cusco, Plaza San Francisco (cerca a pileta). ....	117
4.2.9.1.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S7 del año 2018 (Código de Filtro: 118) .....	118
4.2.9.2.	Caracterización de PM10 del punto de muestreo S7 del año 2018 (Código de Filtro: 110) .....	119
4.2.10.	Caracterización del punto de muestreo S9: Cusco, San Blas. ....	120
4.2.10.1.	Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S9 del año 2018	

(Código de Filtro: 131) .....	122
4.2.10.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S9 del año 2018 (Código de Filtro: 137) .....	123
4.2.11. Caracterización del punto de muestreo S10: Cusco, Plazoleta Limacpampa .....	124
4.2.11.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S10 del año 2018 (Código de Filtro: 149) .....	125
4.2.11.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S10 del año 2018 (Código de Filtro: 145) .....	126
4.2.12. Caracterización del punto de muestreo S11: Cusco, Plazoleta Pumacchupan. ....	127
4.2.12.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S11 del año 2018 (Código de Filtro: 151) .....	129
4.2.12.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S11 del año 2018 (Código de Filtro: 155) .....	130
4.2.13. Caracterización del punto de muestreo S12: Cusco, Calle Matará. ....	131
4.2.13.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S12 del año 2018 (Código de Filtro: 163) .....	132
4.2.13.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S12 del año 2018 (Código de Filtro: 159) .....	133
4.2.14. Caracterización del punto de muestreo S13: Santiago, Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa. ....	134
4.2.14.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S13 del año 2018 (Código de Filtro: 168) .....	136
4.2.14.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S13 del año 2018 (Código de Filtro: 174) .....	137
4.2.15. Caracterización del punto de muestreo S14: San Jerónimo, Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria. ....	138
4.2.15.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S14 del año 2018 (Código de Filtro: 189) .....	139
4.2.15.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S14 del año 2018 (Código de Filtro: 181) .....	140
4.2.16. Caracterización del punto de muestreo S15: Cusco, Campus Universitario, puerta número 03.....	141
4.2.16.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S15 del año 2020 (Código de Filtro: 214) .....	142
4.3.    Discusión General .....	143
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	149

5.1.	Conclusiones .....	149
5.2.	Recomendaciones.....	152
	BIBLIOGRAFÍA .....	154
	ANEXOS .....	171

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 <i>SITIOS DE MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO.</i> .....	64
TABLA 2 <i>FILTROS DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 SELECCIONADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN</i> .....	71
TABLA 3 <i>PROMEDIOS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR DE MEDICIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 ENTRE LOS AÑOS 2017, 2018 Y 2020.</i> .....	76
TABLA 4 <i>PROMEDIOS DE MEDICIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM10 ENTRE LOS AÑOS 2017, 2018 Y 2020.</i> .....	77
TABLA 5 <i>CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 EN LOS FILTROS SELECCIONADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN</i> .....	84
TABLA 6 <i>DISTRIBUCIÓN ELEMENTAL POR SITIO DE MONITOREO</i> .....	143

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 <i>COMPARATIVA DE TAMAÑOS DE LOS TIPOS DE MATERIAL PARTICULADO.</i> .....	32
FIGURA 2 <i>FUENTES DE IDENTIFICACIÓN ELEMENTAL DE MATERIAL PARTICULADO.</i> .....	37
FIGURA 3 <i>INTERACCIÓN DE ELECTRONES CON LA ESTRUCTURA ATÓMICA.</i> .....	49
FIGURA 4 <i>RELACIÓN ENTRE LOS RAYOS X CARACTERÍSTICOS PRINCIPALES Y LA TRANSICIÓN DE ELECTRONES ORBITALES.</i> .....	50
FIGURA 5 <i>REFERENCIACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO</i> .....	60
FIGURA 6 <i>VARIABILIDAD DE LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 EN LOS DISTINTOS SITIOS DE MONITOREO DE LOS AÑOS 2017, 2018 Y 2020</i> .....	78
FIGURA 7 <i>CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE EL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS</i> .....	81
FIGURA 8 <i>CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE EL MATERIAL PARTICULADO PM10 Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS</i> .....	82
FIGURA 9 <i>FILTRO DE CUARZO BLANCO SIN IMPUREZAS</i> .....	86
FIGURA 10 <i>ESPECTRO DEL FILTRO DE CUARZO BLANCO</i> .....	87
FIGURA 11 <i>MAPEO ELEMENTAL DEL FILTRO DE CUARZO SIN CONTAMINANTES.</i> ..	88
FIGURA 12 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN LOS FILTROS DE PM2.5 Y PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO S1.</i> .....	89
FIGURA 13 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 22 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S1.</i> .....	90
FIGURA 14 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 31 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, FACULTAD DE EDUCACIÓN, CUSCO.</i> .....	91
FIGURA 15 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN LOS FILTROS DE PM2.5 Y PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO S2.</i> .....	92
FIGURA 16 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO</i>	

42 DE PM <sub>2.5</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO PARAISO DE FÁTIMA, SAN SEBASTIÁN. ....	94
FIGURA 17 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 46 DE PM <sub>10</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO APV PARAISO DE FÁTIMA, SAN SEBASTIÁN. ....	95
FIGURA 18 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO S3. ....	96
FIGURA 19 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 37 DE PM <sub>10</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	98
FIGURA 20 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 54 DE PM <sub>2.5</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	99
FIGURA 21 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 57 DE PM <sub>10</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	100
FIGURA 22 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 194 DE PM <sub>2.5</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	101
FIGURA 23 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 237 DE PM <sub>2.5</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	103
FIGURA 24 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 202 DE PM <sub>10</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	104
FIGURA 25 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 268 DE PM <sub>10</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 05 (MULTIRED), CUSCO. ....	105
FIGURA 26 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> EN EL SITIO DE MONITOREO S4. ....	106

FIGURA 27 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 87 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO COLEGIO CLORINDA MATTO DE TURNER, CUSCO.</i> .....	108
FIGURA 28 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 83 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO COLEGIO CLORINDA MATTO DE TURNER, CUSCO.</i> .....	109
FIGURA 29 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S5.</i> .....	110
FIGURA 30 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 90 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO LOCAL DEL MUNICIPIO DISTRITAL, WANCHAQ.</i> .....	111
FIGURA 31 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 94 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO LOCAL DEL MUNICIPIO DISTRITAL, WANCHAQ.</i> .....	112
FIGURA 32 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S6.</i> .....	113
FIGURA 33 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 98 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO CENTRO DE SALUD (CLAS) CONTIGUO A LA ESTACIÓN DE BOMBEROS, WANCHAQ.</i> .....	115
FIGURA 34 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 101 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO CENTRO DE SALUD (CLAS) CONTIGUO A LA ESTACIÓN DE BOMBEROS, WANCHAQ.</i> .....	116
FIGURA 35 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S7.</i> .....	117
FIGURA 36 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 118 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO PLAZA SAN FRANCISCO (CERCA A PILETA), CUSCO.</i> .....	118
FIGURA 37 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 110 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO PLAZA SAN FRANCISCO (CERCANO A PILETA), CUSCO.</i> .....	119

FIGURA 38 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S9. ....	120
FIGURA 39 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 131 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO SAN BLAS, CUSCO.....	122
FIGURA 40 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 137 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO SAN BLAS, CUSCO.....	123
FIGURA 41 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S10. ....	124
FIGURA 42 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 149 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO PLAZOLETA LIMACPAMPA, CUSCO.....	125
FIGURA 43 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 145 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO PLAZOLETA LIMACPAMPA, CUSCO.....	126
FIGURA 44 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S11. ....	127
FIGURA 45 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 151 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO PLAZOLETA PUMACCHUPAN, CUSCO.....	129
FIGURA 46 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 155 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO PLAZOLETA PUMACCHUPAN, CUSCO.....	130
FIGURA 47 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S12. ....	131
FIGURA 48 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 163 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO CALLE MATARÁ, CUSCO.....	132
FIGURA 49 COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 159 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO CALLE MATARÁ, CUSCO.....	133
FIGURA 50 MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S13. ....	134

FIGURA 51 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 168 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO CENTRO DE SALUD (CLAS) DE BELENPAMPA, SANTIAGO.</i> .....	136
FIGURA 52 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 174 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO CENTRO DE SALUD (CLAS) DE BELENPAMPA, SANTIAGO.</i> .....	137
FIGURA 53 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN FILTROS DE PM10 Y PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S14.</i> .....	138
FIGURA 54 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 189 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO CENTRO DE SALUD (CLAS) ALEDAÑO A LA COMISARIA, SAN JERÓNIMO.</i> .....	139
FIGURA 55 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 181 DE PM10 EN EL SITIO DE MONITOREO CENTRO DE SALUD (CLAS) ALEDAÑO A LA COMISARIA, SAN JERÓNIMO.</i> .....	140
FIGURA 56 <i>MORFOLOGÍA DE LAS DIFERENTES PARTÍCULAS EN EL FILTRO DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO S15.</i> .....	141
FIGURA 57 <i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y ANÁLISIS ESPECTRAL DEL FILTRO 214 DE PM2.5 EN EL SITIO DE MONITOREO CAMPUS UNIVERSITARIO, PUERTA NÚMERO 03, CUSCO.</i> .....	142

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- **ECA:** Estándares de Calidad Ambiental (Ambient Quality Standards)
- **EDS:** Espectroscopía de Rayos X de Energía Dispersiva (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)
- **EPA:** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental) - EE.UU.
- **EPOC:** Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
- **HiVol 3000:** Equipo de Alto Volumen (High Volume Air Sampler 3000)
- **MINAM:** Ministerio del Ambiente (Ministry of Environment) - Perú
- **NOAA:** Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
- **OMS:** Organización Mundial de la Salud (World Health Organization)
- **PM:** Material Particulado
- **PM2.5:** Material Particulado 2.5 (Partículas menores de 2.5 micrómetros)
- **PM10:** Material Particulado 10 (Partículas menores de 10 micrómetros)
- **SEM:** Microscopia Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscopy)
- **µg/m<sup>3</sup>:** Microgramos por metro cúbico (Micrograms per cubic meter)
- **µm:** Micrómetros (Micrometers)

## RESUMEN

Para comprender mejor la contaminación del aire en la ciudad del Cusco, este estudio realizó una caracterización fisicoquímica del material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> durante los años 2017, 2018 y 2020. El objetivo principal fue identificar la composición elemental de dichas partículas.

La metodología de muestreo incluyó el uso de un equipo de alto volumen HiVol 3000 con filtros de microfibra de cuarzo, siguiendo los estándares del MINAM y la EPA. El muestreo se llevó a cabo en quince puntos estratégicos de la ciudad, seleccionados para capturar la variabilidad espacial de las concentraciones de PM en diversas áreas. La concentración de PM se determinó mediante la técnica de gravimetría, ajustando las masas inicial y final de los filtros. Además, se analizaron las correlaciones entre las concentraciones de PM y variables meteorológicas como temperatura, presión y precipitación, empleando el coeficiente de correlación de Pearson. Para la caracterización elemental, se utilizó la espectrometría de rayos X de energía dispersiva (EDS) acoplada a la microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los resultados revelaron que las concentraciones promedio de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> excedían las directrices establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). El análisis SEM-EDS identificó la presencia de quince elementos principales: fósforo (P), azufre (S), arsénico (As), plomo (Pb), carbono (C), sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), aluminio (Al), cloro (Cl), hierro (Fe), calcio (Ca), zinc (Zn), cobre (Cu) y bario (Ba). La distribución elemental variaba significativamente entre los diferentes sitios de monitoreo y entre los dos tipos de material particulado, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>.

Los resultados de este estudio proporcionan una descripción detallada de la

composición elemental del PM2.5 y PM10 en Cusco, revelando la influencia de factores ambientales y geográficos en la calidad del aire de la ciudad.

**Palabras clave:** Material particulado, PM2.5, PM10, Caracterización fisicoquímica, SEM-EDS

## ABSTRACT

This study carried out a physicochemical characterization of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particulate matter during the years 2017, 2018, and 2020 to better understand air pollution in the city of Cusco. The main objective was to identify the elemental composition of these particles.

The sampling methodology employed in this study was meticulously designed, using high-volume HiVol 3000 equipment with quartz microfiber filters, following MINAM and EPA standards. Sampling was conducted at fifteen strategic points in the city, carefully selected to capture the spatial variability of PM concentrations in various areas. The PM concentration was determined using the gravimetry technique, adjusting the initial and final masses of the filters. In addition, the correlations between PM concentrations and meteorological variables such as temperature, pressure and precipitation were analyzed, using the Pearson correlation coefficient. For elemental characterization, energy dispersive X-ray spectrometry (EDS) coupled to the scanning electron microscopy (SEM) was used, ensuring the accuracy and reliability of the results.

The results revealed that the average concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles exceeded the World Health Organization (WHO) guidelines. The SEM-EDS analysis identified the presence of fifteen main elements: phosphorus (P), sulfur (S), arsenic (As), lead (Pb), carbon (C), sodium (Na), magnesium (Mg), potassium (K), aluminum (Al), chlorine (Cl), iron (Fe), calcium (Ca), zinc (Zn), copper (Cu) and barium (Ba). The elemental distribution varied significantly between the different monitoring sites and the two types of particulate matter, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>.

The findings of this study are of significant importance, providing a

comprehensive description of elemental composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Cusco. These findings not only reveal the influence of environmental and geographic factors on the city's air quality but also serve as a crucial step in the ongoing efforts to address and mitigate air pollution in Cusco.

**Keywords:** Particulate Matter, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, Physicochemical Characterization, SEM-EDS

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica por material particulado (PM) conlleva a efectos nocivos en la salud pública mundial debido a su impacto nocivo en la salud humana (Zhang et al., 2024). El material particulado (PM) es una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, compuesta por diversas sustancias químicas, incluyendo iones solubles en agua, metales a nivel de traza y compuestos orgánicos (Taiwo et al., 2014; Y. Zhao et al., 2019). Las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) representan mayor riesgo, ya que pueden penetrar hasta los alveolos pulmonares y alcanzar el torrente sanguíneo, provocando trastornos respiratorios y cardiovasculares (OMS, 2022; Feng et al., 2016).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los niveles anuales promedio de partículas finas en el aire de la mayoría de las grandes ciudades exceden las directrices para la exposición humana anual y a corto plazo (Martins y Carrilho da Graça, 2018). Por otra parte, numerosos estudios han evidenciado la presencia de sustancias tóxicas en la composición química del PM, como metales pesados (plomo, cadmio, arsénico), hidrocarburos aromáticos policíclicos y ácidos (EPA, s.f). Estos compuestos desempeñan un papel crucial en los efectos adversos sobre la salud, incluyendo el agravamiento de problemas respiratorios preexistentes y un mayor riesgo de desarrollar enfermedades crónicas como asma, bronquitis, enfisema pulmonar, enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón (Fang et al., 2016; OMS, 2021). Además, el tamaño y la composición química del PM dependen de diversos factores, como las fuentes de emisión, el clima y la época del año (Sánchez-Soberón et al., 2015).

En la ciudad del Cusco, la contaminación atmosférica por PM es un problema

desde hace décadas, observándose un considerable incremento en los últimos años, atribuido principalmente al aumento del parque automotor y las actividades industriales (PRAL, 2006; Warthon et al., 2024). Estudios previos sugieren que la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales son las principales fuentes de emisión de material particulado en áreas urbanas, lo que podría explicar la creciente contaminación en Cusco (S. Feng et al., 2016; Mushtaq et al., 2023).

Si bien se han realizado algunos estudios para evaluar la concentración de PM en la ciudad del Cusco, éstos no han abordado un análisis elemental detallado. Por lo tanto, era imperativo llevar a cabo una caracterización física y química exhaustiva del material particulado en la atmósfera de la ciudad del Cusco. Esto permitirá identificar los principales componentes químicos que conforman el PM, comprender mejor sus posibles fuentes de emisión y desarrollar estrategias efectivas de mitigación y control de la contaminación atmosférica adaptadas a las características específicas de la región (Saju et al., 2023).

La presente investigación describe el estudio realizado sobre la caracterización fisicoquímica del PM en la ciudad del Cusco mediante técnicas avanzadas como la microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a la espectrometría de energía dispersa de rayos X (EDS). La técnica permitió identificar la composición elemental y la morfología de las partículas, también permitió evaluar la contribución relativa de diversas fuentes de emisión, incluyendo el tráfico vehicular, la industria y la quema de biomasa (Oroji et al., 2018).

Este trabajo contribuirá para futuras investigaciones y permitirá desarrollar políticas más efectivas y específicas para mejorar la calidad del aire en la ciudad del Cusco. Es importante destacar que, debido a su ubicación geográfica en una cuenca

interandina y sus condiciones climáticas particulares, la ciudad puede presentar patrones de dispersión y composición del PM diferentes a otras regiones. Por tanto, los resultados de esta investigación aportarán en la comprensión de la dinámica local de la contaminación atmosférica y desarrollar estrategias de mitigación adaptadas, para proteger la salud pública y el medio ambiente en la región.

## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Situación Problemática

La atmósfera de la ciudad del Cusco viene siendo contaminada en las últimas décadas. El creciente tráfico vehicular y las actividades industriales, especialmente la producción de ladrillos, son las principales causas de este problema (PRAL, 2006). Las emisiones de los vehículos automotores y las provenientes de los hornos ladrilleros liberan gases de efecto invernadero y material particulado, especialmente PM2.5 y PM10, que deterioran la calidad del aire (Warthon et al., 2024).

Una de las mayores preocupaciones es la presencia de material particulado en el aire. Las partículas PM10 se depositan en las vías respiratorias superiores, mientras que las PM2.5 pueden penetrar profundamente en los pulmones y el torrente sanguíneo, provocando afecciones respiratorias y cardiovasculares, y aumentando el riesgo de enfermedades graves (S. Feng et al., 2016; C. Zhao et al., 2021). Numerosos estudios han demostrado que estas partículas pueden contener sustancias tóxicas, como metales pesados (plomo, mercurio, cadmio y arsénico, entre otros) y compuestos orgánicos persistentes (Valavanidis et al., 2008). Estas sustancias agravan problemas respiratorios existentes y aumentan significativamente el riesgo de desarrollar enfermedades graves, como enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares y cáncer (Basith et al., 2022).

La industria ladrillera y las centrales termoeléctricas a base de carbón emiten considerables concentraciones de metales pesados en el aire, como hierro, plomo, zinc, vanadio, cromo, cobre, manganeso, níquel, arsénico, cobalto y cadmio. Estos metales pesados pueden tener efectos tóxicos a largo plazo en la salud humana y en el medio ambiente (Rahman et al., 2021).

A pesar de algunos estudios sobre las concentraciones de material particulado en Cusco, no se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva y regular sobre el análisis elemental y las propiedades fisicoquímicas de este material. Es fundamental caracterizar la composición del material particulado presente en el aire de Cusco, ya que los resultados permitirán identificar las principales fuentes que generan y liberan los distintos elementos nocivos en la atmósfera.

## **1.2. Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

La caracterización física y química del material particulado PM2.5 y PM10 obtenidos de la atmósfera de la ciudad del Cusco en los años 2017, 2018 y 2020 se desconoce debido a la falta de investigaciones previas sobre el tema.

### **1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿Cuáles fueron las concentraciones del PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020?
2. ¿Cómo se relaciona la concentración de PM2.5 y PM10 con las variables meteorológicas (temperatura media, presión media y precipitación) en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020?
3. ¿Cuál fue la caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020 y cómo variaron según los diferentes puntos de muestreo?
4. ¿Cómo se pueden representar gráficamente y determinar la composición fisicoquímica del material particulado utilizando recursos computacionales?
5. ¿Cuáles fueron las posibles fuentes de origen del material particulado PM2.5 y

PM10 basadas en su caracterización fisicoquímica?

### **1.3. Justificación de la Investigación**

La mala calidad del aire en la ciudad del Cusco es una preocupación fundamental debido a su impacto directo en la salud de las personas y el medio ambiente. El material particulado, especialmente las partículas de diámetros de 2.5 y 10 micras (PM2.5 y PM10), son contaminantes atmosféricos que se encuentran presentes en muchas áreas urbanas. Estas partículas, originadas por diversas fuentes como el transporte vehicular, actividades industriales y emisiones de procesos de quema de biomasa, plantean cuestionamientos de orden científico sobre su composición y efectos adversos en la salud pública.

A pesar del creciente interés en mejorar la calidad del aire en Cusco, existe una carencia significativa de información precisa sobre la composición química y propiedades fisicoquímicas del PM2.5 y PM10. Hasta la fecha, los estudios se han centrado principalmente en medir las concentraciones de estas partículas, sin profundizar en la identificación detallada de sus componentes específicos. Sin embargo, la composición elemental y las propiedades superficiales de las partículas son importantes para entender sus efectos sobre la salud y el medio ambiente (S. Feng et al., 2016; Valavanidis et al., 2008).

La caracterización fisicoquímica detallada del material particulado en Cusco es esencial para abordar los riesgos potenciales asociados con la exposición a estas partículas y para diseñar estrategias de control y mitigación efectivas. La aplicación de técnicas analíticas avanzadas, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a la espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS), ha permitido desentrañar la complejidad fisicoquímica de las partículas presentes en el aire de

Cusco.

El propósito de este trabajo ha sido la realización de un análisis minucioso de la composición del material particulado con diámetros de 2.5 y 10 micras en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020. Para lograr este objetivo, se emplearon métodos de caracterización fisicoquímica que permitieron la identificación precisa de los componentes químicos presentes en las partículas. Se evaluó la presencia de elementos nocivos en diferentes zonas geográficas y se identificaron sus posibles fuentes de emisión.

La tesis ha permitido obtener información detallada sobre la composición elemental del material particulado en Cusco, asimismo, los resultados contribuirán en la formulación de políticas públicas efectivas. La caracterización de las partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, ha permitido identificar las posibles fuentes de contaminación, lo que facilitará la comprensión de los riesgos asociados a la salud de la población y el medio ambiente local.

## **1.4. Objetivos de la Investigación**

### **1.4.1. Objetivo General**

Caracterizar fisicoquímicamente el material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020, empleando un EDS acoplado a un microscopio de barrido, para conocer su composición e identificar las posibles fuentes de contaminación.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

1. Analizar los datos de concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> de la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020

2. Correlacionar la concentración de PM2.5 y PM10 con variables meteorológicas, como temperatura media, presión media y precipitación.
3. Realizar una caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 y PM10, identificando los elementos químicos presentes en las partículas y como varían según los diferentes puntos de muestreo.
4. Obtener gráficos y determinar la composición fisicoquímica del material particulado mediante el análisis de los datos de espectros utilizando recursos computacionales.
5. Relacionar el material particulado con posibles fuentes de origen de acuerdo con su caracterización fisicoquímica.

## **1.5. Hipótesis**

### **1.5.1. Hipótesis General**

La caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020 evidencia presencia de elementos químicos derivados de actividades antropogénicas y del tráfico vehicular.

### **1.5.2. Hipótesis Especifica**

1. La concentración de PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco entre los años 2017, 2018 y 2020 varía significativamente debido a cambios en las actividades antropogénicas y factores naturales
2. Existe una correlación significativa entre la concentración de PM2.5 y PM10 y las variables meteorológicas (temperatura media, presión media y precipitación) en la ciudad del Cusco.

3. La caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020 revelará la presencia de elementos, cuya presencia variará según el punto de muestreo y las diferentes fuentes de contaminación.
4. El uso de recursos computacionales permite identificar y graficar de manera precisa la composición fisicoquímica del material particulado PM2.5 y PM10.
5. La caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 y PM10 se asociará principalmente con fuentes específicas de contaminación, como las emisiones antropogénicas y el tráfico vehicular.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

### **2.1. Bases Teóricas**

#### **2.1.1. Contaminación atmosférica**

La contaminación del aire se refiere a la presencia de sustancias nocivas en la atmósfera que pueden tener efectos adversos en la salud humana, el medio ambiente y el clima. Entre los diferentes tipos de contaminantes se incluyen el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre y nitrógeno (SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>), el ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y el material particulado (PM), que contribuyen a la disminución de la esperanza de vida (Martins y Carrilho da Graça, 2018).

Esta contaminación ha sido una preocupación mundial significativa debido a su impacto en la salud humana, el medio ambiente y la calidad de vida. Cada año, se registran alrededor de 6,5 millones de muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire, siendo los países en desarrollo los que presentan las tasas de mortalidad más altas (Khaltaev y Axelrod, 2024; OMS, 2021).

La calidad del aire describe el nivel de la contaminación, se evalúa cuantificando la concentración de los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el aire. El alto nivel de partículas finas en el ambiente, provenientes de diversas fuentes, hace que el aire sea tóxico para todos los organismos vivos (Rahman et al., 2021).

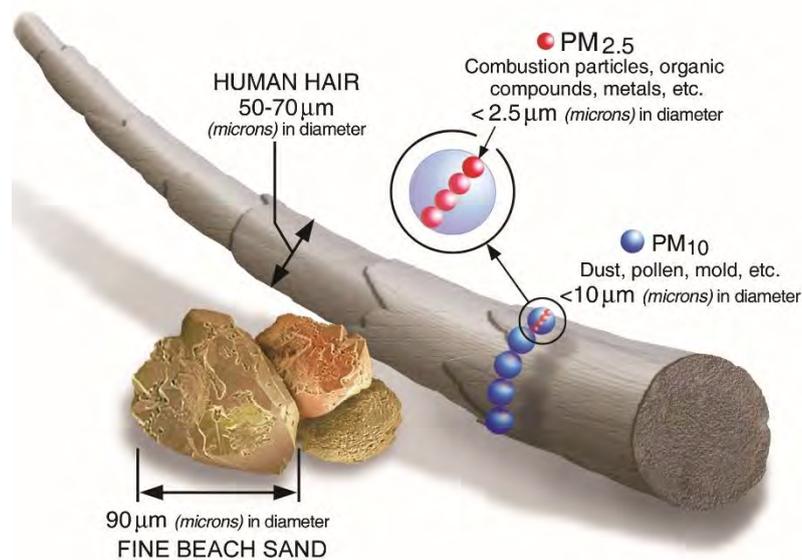
#### **2.1.2. Material Particulado**

La contaminación del aire se compone de un conglomerado de sustancias nocivas presentes en la atmósfera (Zgłobicki y Baran-Zgłobicka, 2024). El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) es uno de los principales contaminantes atmosféricos, consiste en una compleja mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas

suspendidas en el aire (US-EPA, 2018). Estas partículas pueden tener orígenes naturales, como el polvo del suelo, las erupciones volcánicas y los incendios forestales, o ser generadas por fuentes antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, las actividades industriales y el tráfico vehicular (Deabji et al., 2024; Mishra et al., 2023).

### Figura 1

*Comparativa de tamaños de los tipos de material particulado.*



*Nota.* Imagen tomada de la Agencia de Protección Ambiental (US-EPA, 2018), US-EPA (<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>)

Las partículas de PM se clasifican según su diámetro aerodinámico, que es la medida del tamaño de una partícula idealizada como una esfera con la misma velocidad de sedimentación en el aire (Figura 1). Este concepto considera tanto la densidad como la forma de la partícula, determinando su comportamiento aerodinámico y deposición en el sistema respiratorio. Las partículas PM10 tienen un diámetro aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$ , mientras que las partículas PM2.5 tienen un diámetro aerodinámico menor a 2.5  $\mu\text{m}$  (Martori et al., 2022; C. Zhao et al., 2021), como se aprecia en la Figura 1.

Estas partículas son de interés científico debido a su capacidad para afectar la calidad del aire y la salud humana al penetrar profundamente en el sistema respiratorio (Pope et al., 2009). La exposición a altas concentraciones de material particulado, especialmente PM<sub>2.5</sub>, se ha asociado con diversos efectos adversos para la salud humana, incluyendo enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer de pulmón (OMS, 2021). Los niveles de material particulado se miden en términos de concentración en masa por unidad de volumen de aire, expresada en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

La composición química y las propiedades físicas del material particulado pueden variar significativamente dependiendo de las fuentes de emisión y los procesos de transformación atmosférica (Abdillah y Wang, 2023).

#### **2.1.2.1. Física y Química del material particulado**

La composición química del material particulado es compleja y variable, dependiendo de las fuentes de emisión y los procesos de transformación atmosférica. Estas partículas pueden contener iones inorgánicos (sulfatos, nitratos, amonio), compuestos orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas, furanos), metales pesados (plomo, cadmio, mercurio, arsénico), y otras partículas biológicas y minerales (S. Feng et al., 2016). La presencia de metales pesados en el PM es particularmente preocupante debido a su toxicidad y capacidad de bioacumulación en los organismos vivos. Estos elementos pueden ingresar al cuerpo humano a través de la inhalación de partículas contaminadas y causar efectos adversos en varios sistemas y órganos, como el sistema respiratorio, cardiovascular, nervioso y reproductivo (Tchounwou et al., 2012).

Desde un punto de vista físico, las propiedades del material particulado, como el tamaño (distribución de tamaños), la morfología (forma y estructura) y las características superficiales, influyen en su comportamiento aerodinámico, su capacidad de dispersión y sus efectos en la salud humana y el medio ambiente. Estas propiedades determinan la dinámica de las partículas en la atmósfera, su deposición y su interacción con la radiación electromagnética (Zilli Vieira y Koutrakis, 2021).

Las propiedades físicas del material particulado se refieren a características medibles que describen su estructura y comportamiento en el aire. Estas propiedades incluyen el tamaño de partícula, la forma, la densidad, el área superficial, la porosidad y la distribución. Estas características son fundamentales para comprender cómo las partículas interactúan en la atmósfera y cómo afectan la calidad del aire y la salud humana (Al-Easawi, 2023).

#### **2.1.2.2. Diámetro de partícula**

El diámetro de partícula es una medida que describe el tamaño de una partícula en una sustancia. En el contexto del material particulado, como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, el tamaño de la partícula es importante dado que influye en su comportamiento aerodinámico, su capacidad para penetrar en el sistema respiratorio y su dispersión en el medio ambiente. Esta medida es esencial para evaluar el impacto ambiental y los riesgos para la salud asociados con las partículas en suspensión (Copat et al., 2020).

Las partículas que componen el material particulado se clasifican según su diámetro aerodinámico equivalente (AED), que es una medida estandarizada que relaciona el tamaño y la forma de la partícula con su comportamiento aerodinámico en un fluido gaseoso como el aire. Las partículas con el mismo AED tienden a tener la misma velocidad de sedimentación (Hubbard et al., 2009). Las partículas se agrupan

en gruesas, finas y ultrafinas, con diámetros aerodinámicos de 10  $\mu\text{m}$  (PM10), 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5) y 0.1  $\mu\text{m}$  (PM0.1), respectivamente. Las partículas ultrafinas, que son extremadamente pequeñas, son más reactivas y pueden penetrar profundamente en los pulmones, lo que puede tener efectos significativos en la salud humana (Silveira et al., 2022).

Numerosos estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición prolongada a las PM2.5 ambientales está asociada con un aumento en la mortalidad, incluyendo la cardiovascular, respiratoria y por cáncer de pulmón (Mishra et al., 2023). Además, hay cada vez más evidencia de que las partículas gruesas (PM10) también pueden contribuir a la generación de efectos adversos sobre la salud (Leão et al., 2023).

### **2.1.2.3. Composición química y su relación con el tamaño de partícula**

La composición química del material particulado varía según el tamaño de las partículas. Las más pequeñas, como el PM2.5, tienden a contener una mayor proporción de contaminantes atmosféricos, incluyendo compuestos orgánicos volátiles, metales pesados y nitratos. En contraste, las partículas más grandes, como el PM10, suelen contener más polvo. Esta dependencia de la composición química sobre el tamaño de partícula influye en la toxicidad y dispersión de las mismas en el medio ambiente (Mai et al., 2015).

A diferencia de muchos otros contaminantes, el material particulado contiene una variedad de sustancias en un amplio espectro de tamaños (Martins y Carrilho da Graça, 2018). Su mayor área superficial en relación con su volumen les permite adsorber y transportar una mayor cantidad de contaminantes tóxicos, como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes (Valavanidis et al., 2008). Cuanto menor es el diámetro aerodinámico de las partículas, mayor es su reactividad química para la

adsorción de metales pesados, incrementando su toxicidad (Mainka, 2021).

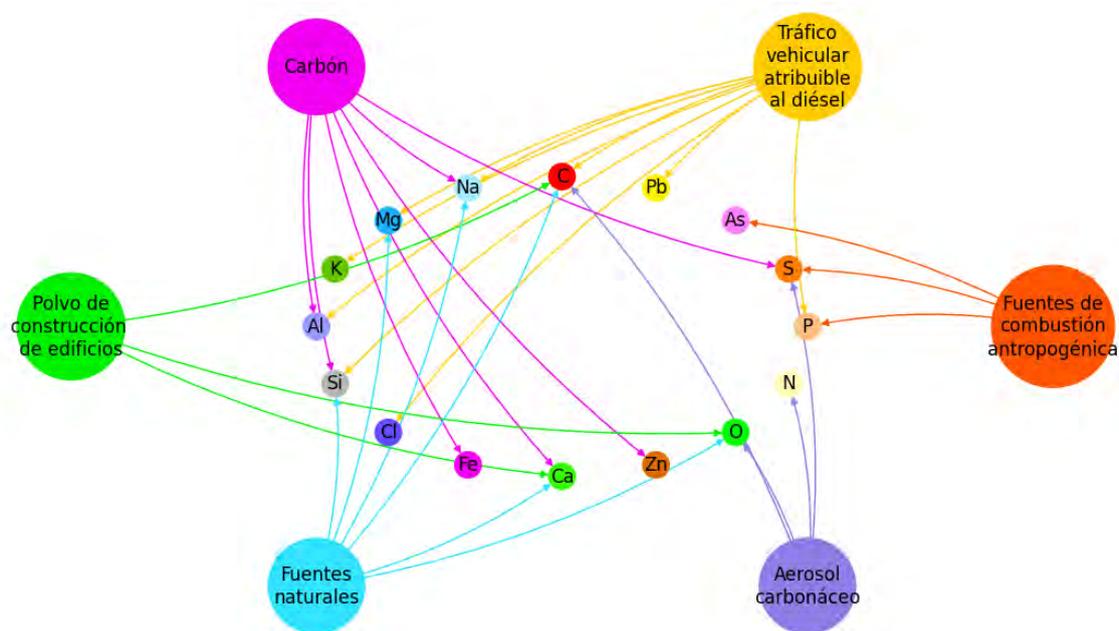
El riesgo para la salud surge de los efectos combinados del tamaño y la composición química de las partículas, lo que influye en su deposición en el tracto respiratorio y en la capacidad del organismo para eliminarlas. Los metales presentes en estas partículas no se degradan química ni biológicamente, acumulándose en los organismos vivos y provocando condiciones que, dependiendo de su toxicidad y concentración, pueden causar discapacidades e incluso la muerte (Mainka, 2021).

### **2.1.3. Fuentes de contaminación de material particulado por su composición elemental**

Las partículas en suspensión en el aire pueden tener orígenes diversos (Figura 2), tanto naturales como antropogénicos, y su composición elemental varía en función de las fuentes emisoras y los procesos de transformación atmosférica. En este contexto, la identificación precisa de las fuentes de contaminación y su composición elemental es esencial para comprender la dinámica de estos contaminantes (Farahani et al., 2022).

**Figura 2**

*Fuentes de identificación elemental de material particulado.*



*Nota.* Imagen generada en Python por los autores, adaptada de: Fung y Wong (1995); Galvez et al. (2022); Ottelé et al. (2010); Searle (2001); Song et al. (2015).

Fung y Wong (1995) han sido pioneros en el estudio de las fuentes de combustión antropogénica, destacando la presencia de fósforo (P), azufre (S) y arsénico (As) en las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles. Estos elementos, inherentes a los combustibles y liberados durante la combustión, contribuyen a la formación de partículas secundarias y la acidificación de la lluvia, impactando negativamente en el medio ambiente y la salud humana.

En el ámbito del tráfico vehicular, Searle (2001) identificó la presencia de plomo (Pb), carbono (C), sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), aluminio (Al), silicio (Si), fósforo (P) y cloro (Cl) en las emisiones vehiculares de motores diésel. Estos elementos provienen de diversas fuentes, como los aditivos de los combustibles, el desgaste de los neumáticos y frenos, y la suspensión de partículas del pavimento,

resaltando la complejidad de esta fuente de contaminación.

La combustión de carbón mineral, ampliamente utilizada en centrales termoeléctricas e industrias, también ha sido objeto de estudio por parte de Searle (2001), quien ha detectado la presencia de aluminio (Al), silicio (Si), hierro (Fe), calcio (Ca), azufre (S), sodio (Na) y zinc (Zn) en sus emisiones. Estos elementos, presentes en la composición del carbón mineral son liberados durante su combustión, resaltan la necesidad de implementar medidas de control y mitigación en estas fuentes.

En el ámbito de la construcción civil, Song et al. (2015) han contribuido al identificar la presencia de carbono (C), oxígeno (O) y calcio (Ca) en el polvo generado por estas actividades. La resuspensión de estas partículas, provenientes de materiales de construcción como cemento, hormigón y yeso, puede tener un impacto significativo en la calidad del aire, especialmente en áreas urbanas con intensa actividad de construcción.

Además de las fuentes antropogénicas, se debe considerar las fuentes naturales de material particulado. Ottelé et al. (2010) y Song et al. (2015) han identificado la presencia de carbono (C), oxígeno (O), silicio (Si), calcio (Ca), sodio (Na) y magnesio (Mg) en estas fuentes, que incluyen la erosión del suelo, las emisiones volcánicas, el aerosol marino y el polvo transportado por el viento. Estos elementos, presentes en minerales y materiales geológicos, pueden dispersarse en la atmósfera debido a procesos naturales o actividades humanas que perturban el entorno.

Los aerosoles carbonáceos, compuestos por hollín y material orgánico particulado, han sido objeto de estudio por parte de Galvez et al. (2022), quienes han detectado la presencia de oxígeno (O), nitrógeno (N), carbono (C) y azufre (S) en su composición. Estos aerosoles, asociados a la combustión incompleta de combustibles

fósiles y biomasa, así como a la formación de partículas secundarias, tienen un impacto significativo en la calidad del aire, el clima y la salud humana.

La composición elemental del material particulado puede variar dependiendo de factores como la ubicación geográfica, las condiciones meteorológicas y los procesos de transporte y transformación atmosférica.

#### **2.1.4. Instrumentación y método de muestreo**

Los datos de monitoreo de la calidad del aire ambiente proporcionan mediciones de las concentraciones de contaminantes en el aire en un lugar y tiempo específicos. Esta información es valiosa, ya que permite conocer los niveles de contaminación en el aire, identificar las áreas más afectadas y comprender mejor la magnitud del problema (Mushtaq et al., 2024).

Para evaluar la concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en el aire ambiente, se utilizan técnicas de muestreo de alto y bajo volumen. Las técnicas de muestreo de alto volumen requieren instrumentación robusta para recolectar un mayor flujo de aire, lo que permite capturar una cantidad mayor de partículas. Esto proporciona una visión más amplia de la contaminación del aire y, por lo tanto, este tipo de muestreo se utiliza principalmente en áreas urbanas o densamente pobladas, donde la dinámica del aire es más compleja.

Por otro lado, el muestreo de bajo volumen recolecta partículas a un flujo de aire relativamente bajo. Debido a su menor capacidad de recolección, estos muestreadores se utilizan principalmente en interiores o en áreas donde se requiere un equipo más portátil.

Estas técnicas permiten obtener muestras representativas de partículas de 2.5 y

10 micras, asegurando así la confiabilidad de los datos recopilados (US-EPA, 2004). Mediante análisis gravimétricos, se logra determinar la concentración total de material particulado que se deposita en un filtro de cuarzo o teflón. Estos filtros se colocan en muestreadores que pueden ser de alto o bajo volumen, dependiendo de la cantidad de aire que se necesite recolectar ofreciendo una visión precisa de la carga contaminante (US-EPA, 2004).

Además de la determinación gravimétrica, la utilización de este tipo de filtros, posibilita realizar análisis físicos y químicos detallados, incluyendo estudios de caracterización en equipos especializados (Carrión, 2018). Estas técnicas permiten obtener información completa sobre la composición y propiedades del material particulado, de importancia para comprender su origen, comportamiento y potenciales impactos en el ambiente y la salud.

### **2.1.5. Impacto de actividades antropogénicas**

La contaminación atmosférica provocada por actividades humanas constituye uno de los desafíos más importantes que enfrentan las comunidades locales e internacionales (Rahman et al., 2021). Las emisiones de partículas PM2.5 y PM10, generadas principalmente por la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales, contribuyen de manera significativa a la degradación de la calidad del aire, especialmente en áreas urbanas y cercanas a fuentes de contaminación (Chow et al., 1996).

Uno de los principales focos de emisión de partículas finas (PM2.5) es el tráfico vehicular. Los gases de escape de los vehículos motorizados, el desgaste de frenos y neumáticos, y la resuspensión de partículas depositadas en las carreteras son fuentes primarias de este tipo de contaminantes atmosféricos (Martins y Carrilho da Graça, 2018). Las partículas finas y ultrafinas generalmente se originan en procesos de alta temperatura, como la combustión de combustibles fósiles, la quema de biomasa, los procesos industriales y las reacciones químicas atmosféricas (Cormier et al., 2006).

Por otro lado, las partículas gruesas (PM10) suelen derivar de procesos de desgaste mecánico, incluyendo la abrasión de materiales de la corteza terrestre, la resuspensión de polvo de carreteras y suelos, las emisiones de aerosoles marinos, las erupciones volcánicas y el desgaste de frenos y neumáticos de vehículos (Allen et al., 2001).

Diversas actividades antropogénicas, geogénicas y biogénicas son responsables de la emisión de metales traza a la atmósfera, desempeñando un papel crucial en la determinación de las distribuciones de tamaño de partículas atmosféricas. Cada fuente de emisión tiene una distribución de tamaño característica que refleja su origen y

naturaleza (Allen et al., 2001; Cormier et al., 2006).

### **2.1.6. Efectos del material particulado en la salud humana**

Numerosos estudios epidemiológicos han demostrado una asociación directa entre la exposición prolongada a partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> y el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como una mayor mortalidad (Cohen et al., 2017). Existe evidencia sólida que vincula la exposición a estas partículas con enfermedades específicas, como asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), fibrosis pulmonar, cáncer, diabetes tipo 2, enfermedades neurodegenerativas e incluso obesidad (A. Jiao et al., 2024; Josa-Culleré et al., 2024; Ranzani et al., 2024).

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) clasificó las PM<sub>2.5</sub> y las PM<sub>10</sub> como carcinógenos del Grupo I (Arif et al., 2024), lo que indica que hay suficiente evidencia de su potencial carcinogénico en humanos.

La exposición a partículas en el aire también puede aumentar el riesgo de hospitalización y mortalidad debido a diversas enfermedades respiratorias, incluida la neumonía. Se estimó que un 13.09% de las muertes por infecciones del tracto respiratorio inferior en todo el mundo podrían atribuirse a la contaminación ambiental por partículas (Zhang et al., 2024).

Las partículas PM<sub>2.5</sub>, al depositarse en los pulmones, pueden causar inflamación de las vías respiratorias, disminución de la función pulmonar, e incidencia y exacerbación del asma y la EPOC. Además, alteran las respuestas inmunitarias normales del pulmón, haciéndolo más susceptible a infecciones al afectar el sistema mucociliar bronquial y disminuir el aclaramiento bacteriano. Incluso en sujetos sanos, la exposición a PM<sub>2.5</sub> puede reducir significativamente la función pulmonar (S. Feng

et al., 2016).

Las PM2.5 también pueden afectar directamente al corazón, induciendo remodelación del tejido y alteración de la función, lo que puede conducir al desarrollo de enfermedades cardíacas. Se ha demostrado que estas partículas afectan la función del sistema nervioso autónomo cardíaco y disminuyen la variabilidad de la frecuencia cardíaca, un factor de riesgo independiente de morbilidad y mortalidad cardiovascular (S. Feng et al., 2016).

Si bien la mayoría de los estudios se han centrado en las PM2.5, existe evidencia creciente de que las PM10 (partículas más gruesas) también tienen impactos significativos en la salud respiratoria y cardiovascular (Brunekreef y Forsberg, 2005; Zhang et al., 2024). Algunos estudios incluso sugieren que las PM10 pueden tener efectos más pronunciados que las PM2.5 en ciertos resultados de salud (Chen et al., 2016; Faraji Ghasemi et al., 2020; Sánchez-Soberón et al., 2015). Dada su distinta fuente y composición química, los impactos de las PM10 pueden diferir de los de las PM2.5, por lo que comprender su relevancia para la salud es crucial para desarrollar políticas y estrategias de mitigación efectivas.

### **2.1.7. Normativas ambientales y estándares de calidad del aire**

La normativa ambiental se fundamenta en la evaluación rigurosa de los riesgos que la contaminación del medio ambiente impone sobre la salud y el bienestar humano, como destaca la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021). Para abordar estos riesgos, se han establecido diversos acuerdos y estándares de calidad del aire (ECA), los cuales sirven como referencia en la gestión y control de la contaminación atmosférica. Las normativas ambientales, como las establecidas por la Agencia de

Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) y la OMS, definen estándares de calidad del aire para partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, basados en concentraciones medias en períodos de tiempo específicos (OMS, 2005; US-EPA, s. f.). Estos estándares son fundamentales para evaluar el cumplimiento regulatorio y proteger la salud pública.

La EPA ha fijado estándares específicos para las concentraciones de partículas, limitando los niveles de PM<sub>2.5</sub> a 35 µg/m<sup>3</sup> en un período de 24 horas, y los de PM<sub>10</sub> a 150 µg/m<sup>3</sup> en el mismo período (US-EPA, s. f.).

Por su parte, la OMS ha propuesto directrices de la calidad de aire más estrictas, estableciendo valores de 25 µg/m<sup>3</sup> como promedio en 24 horas para PM<sub>2.5</sub>, y de 50 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> (OMS, 2005). Estas directrices fueron posteriormente actualizadas por la OMS, estableciendo umbrales aún más bajos: 15 µg/m<sup>3</sup> como promedio en 24 horas para PM<sub>2.5</sub>, y 45 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> (OMS, 2021). La normativa es importante para evaluar y contextualizar los niveles de contaminación observados en el área de estudio.

### **2.1.8. Análisis y caracterización del PM**

El estudio del material particulado involucra el empleo de diversas técnicas espectroscópicas y analíticas con el objetivo de identificar y caracterizar los componentes inorgánicos y orgánicos presentes en las partículas (Faraji Ghasemi et al., 2020; Nagar et al., 2017). Esta caracterización brinda información detallada sobre la composición química y las propiedades físicas de las partículas, lo cual es clave para comprender su impacto en el ambiente y en la salud humana.

Entre las técnicas comúnmente utilizadas se encuentran la cromatografía iónica, la espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

(ICP-MS), la radiografía de energía dispersiva de fluorescencia (ED-XF), el análisis de carbono orgánico total y la cromatografía de gases/espectrometría de masas con trampa de iones (Quijano et al., 2019).

Una herramienta particularmente valiosa es la microscopía electrónica de barrido acoplada a la espectrometría dispersiva de energía (SEM-EDS). Esta técnica permite analizar cada partícula de forma individual y determinar simultáneamente sus características fisicoquímicas y morfológicas (Tiwari et al., 2024). Al proporcionar información detallada sobre la composición elemental y la estructura de las partículas, el SEM-EDS es una técnica clave para establecer asociaciones entre fuentes y procesos de formación del material particulado (Quijano et al., 2019).

### **2.1.9. Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

La microscopia electrónica de barrido (SEM) es una técnica de caracterización que emplea un haz focalizado de electrones de alta energía para generar imágenes de superficies con una resolución a nanoescala. Esta técnica brinda información detallada sobre la topografía, morfología y composición elemental de las muestras analizadas (Tiwari et al., 2024).

El fundamento del SEM reside en la interacción del haz de electrones con la superficie de la muestra. Este haz es producido por una fuente de electrones, que puede ser un filamento de tungsteno calentado (González Mancera y Noguez Amaya, 2006).

Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra, se producen diversas interacciones que dan lugar a la generación de distintos tipos de señales. Estas señales son la clave para obtener información sobre las características de la muestra (Kabir et al., 2023).

Una de las señales principales son los electrones secundarios, que son electrones de baja energía arrancados de las capas externas de los átomos en la superficie debido a la interacción con el haz incidente. Estos electrones son altamente sensibles a la topografía y brindan información sobre la morfología y textura superficial (Marina-Montes et al., 2022).

Otra señal importante son los electrones retrodispersados, que son electrones del haz incidente dispersados elásticamente por los núcleos atómicos de la muestra con un ángulo mayor a 90°. Las imágenes de electrones retrodispersados muestran variaciones de contraste relacionadas con la composición química, donde áreas con elementos de mayor número atómico aparecen más brillantes (Alberto y Pineda, 2020).

Adicionalmente, en el SEM se pueden generar otras señales como electrones Auger, electrones transmitidos (en muestras delgadas) y fotones de diferentes longitudes de onda (catodoluminiscencia), que pueden aportar información complementaria sobre las propiedades de la muestra (Hasabeldaim et al., 2019; Verzellesi et al., 2013).

## **2.1.10. Principios físicos de la espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS)**

### **2.1.10.1. Rayos X**

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética ionizante que exhibe una dualidad onda-partícula fundamental. Esta dualidad implica que los rayos X pueden comportarse tanto como ondas electromagnéticas como partículas (fotones), dependiendo del tipo de interacción con la materia (Hara et al., 2013).

Desde el punto de vista ondulatorio, los rayos X tienen longitudes de onda

extremadamente cortas, en el rango de 0.01 a 10 nanómetros (nm), lo que corresponde a frecuencias muy altas, entre  $3 \times 10^{16}$  y  $3 \times 10^{19}$  Hz (H. Feng et al., 2017; F. Jiao y Frei, 2009).

Por otro lado, desde la perspectiva corpuscular, los rayos X se consideran como partículas discretas de energía llamadas fotones. Estos fotones de rayos X poseen energías típicamente en el rango de 0.06 keV a 125 keV, lo que los convierte en una radiación altamente energética y penetrante (Ceppi, 2012).

Una propiedad única de los rayos X es su alta capacidad de penetración en materiales densos, gracias a su elevada energía y corta longitud de onda. Esta característica los hace indispensables en aplicaciones como la radiografía médica y la inspección no destructiva de materiales. Además, los rayos X tienen la capacidad de ionizar átomos y moléculas al interactuar con ellos. Estas interacciones determinan cómo los rayos X son absorbidos, dispersados o transmitidos a través de un material, y son la base de técnicas como la difracción de rayos X, la espectroscopía de rayos X y la radiografía (Perera, 1992).

La generación de rayos X puede ocurrir mediante diferentes procesos físicos, siendo los más comunes la radiación de frenado (bremsstrahlung) y la emisión de rayos X característicos. Ambos procesos implican la aceleración de partículas cargadas, generalmente electrones, y su interacción con un material objetivo o blanco (González Mancera y Noguez Amaya, 2006).

#### **2.1.10.2. Emisión de rayos X característicos y EDS**

Cuando un haz de electrones de alta energía interactúa con una muestra, puede provocar la ionización de los átomos presentes al extraer electrones de sus capas

internas. Esta ionización genera vacantes en los niveles energéticos internos de los átomos. Para retornar a un estado estable, los electrones de niveles superiores realizan transiciones hacia esas vacantes, liberando energía en forma de fotones de rayos X (Ceppi, 2012).

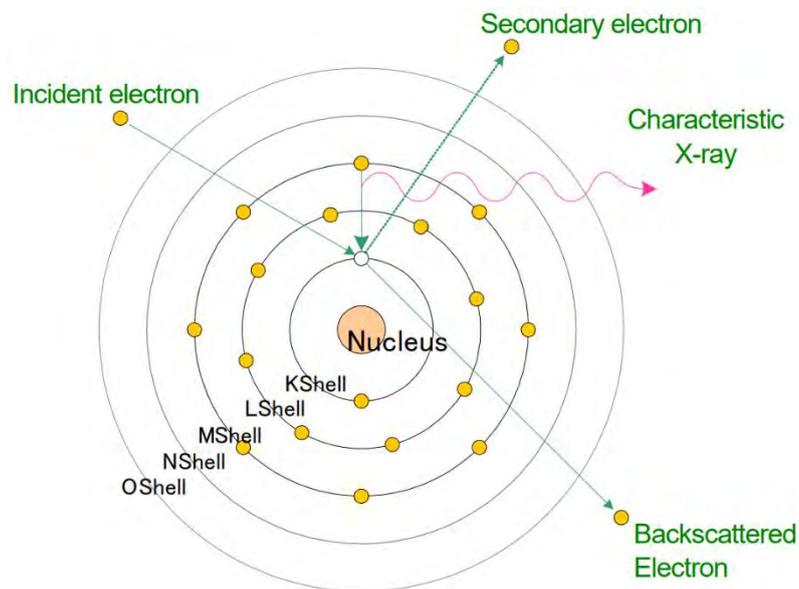
Esta emisión de radiación característica de rayos X ocurre debido al salto de electrones desde niveles energéticos más altos a niveles inferiores en los átomos ionizados (Figura 3). Los rayos X característicos son únicos para cada elemento, ya que la energía liberada en estas transiciones es específica de la estructura electrónica de cada uno (Alberto y Pineda, 2020; González Mancera y Noguez Amaya, 2006).

Los rayos X característicos emitidos son detectados por un detector de dispersión de energía (EDS). Este detector mide el espectro de los rayos X generados, y al examinar las energías características presentes, es posible identificar los elementos químicos presentes (análisis cualitativo) (JEOL Company, s. f.).

La espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) se basa en este fenómeno de emisión de radiación característica para realizar análisis composicionales elementales en muestras sólidas. Al acoplar un detector EDS a un microscopio electrónico de barrido (SEM), es posible obtener información sobre la composición química con una resolución espacial a micro y nanoescala (Kabir et al., 2023).

### Figura 3

*Interacción de electrones con la estructura atómica.*



*Nota.* Imagen tomada de JEOL Neoscope Manual. (n.d.).

#### 2.1.10.3. Análisis de espectros de rayos X y líneas espectrales

Los espectros de emisión de rayos X son herramientas poderosas en el análisis elemental de muestras y la identificación de elementos químicos específicos. Estos espectros muestran líneas características correspondientes a las transiciones electrónicas en átomos excitados a niveles de energía más bajos (Figura 4), produciendo radiación electromagnética, incluyendo rayos X característicos para cada elemento (Ceppi, 2012).

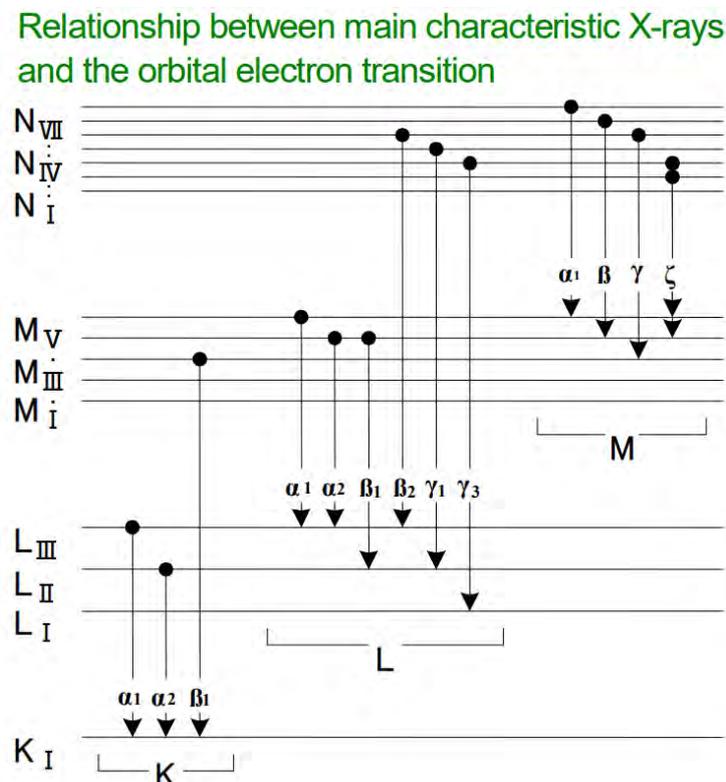
Las líneas espectrales de rayos X resultantes de estas transiciones están asociadas con niveles energéticos específicos en la estructura electrónica del átomo. La emisión de rayos X por parte de un átomo excitado está dictada por las reglas de selección y las diferencias de energía entre los niveles electrónicos involucrados en las transiciones (Ceppi, 2012).

Las líneas espectrales de rayos X más comúnmente utilizadas en el análisis elemental son las líneas K, L y M, que corresponden a transiciones electrónicas desde niveles energéticos superiores a las capas K, L y M, respectivamente. Estas líneas se subdividen aún más en líneas  $K\alpha$ ,  $K\beta$ ,  $L\alpha$ ,  $L\beta$ , etc., dependiendo de las transiciones específicas involucradas (González Mancera y Noguez Amaya, 2006).

La identificación de elementos químicos en una muestra se basa en la energía específica de las líneas espectrales de rayos X observadas en el espectro de emisión. Cada elemento tiene un conjunto único de líneas espectrales que actúa como una "huella digital" para su identificación. Además, la intensidad de estas líneas espectrales es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, lo que permite su cuantificación (Broström et al., 2020).

**Figura 4**

*Relación entre los rayos X característicos principales y la transición de electrones orbitales.*



*Nota.* Imagen tomada de JEOL Neoscope Manual. (n.d.).

### **2.1.11. Técnicas de microanálisis SEM-EDS**

En la técnica de microscopía SEM, los rayos X juegan un papel crucial en dicha caracterización. Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra dentro del SEM, se producen varias señales, entre ellas la emisión de rayos X característicos (Sielicki et al., 2011).

La espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) es una técnica complementaria al SEM que aprovecha estos rayos X característicos emitidos para permitir el análisis de la composición elemental de la muestra. El detector EDS detecta y analiza los rayos X característicos emitidos por la interacción del haz de electrones con los átomos de la muestra (Tiwari et al., 2024).

El SEM es ampliamente utilizado en el análisis de materiales como metales, cerámicas, polímeros, compuestos y nanomateriales. Permite estudiar en detalle la microestructura de estos materiales, incluyendo la morfología de las fases, distribución de partículas, presencia de defectos, rugosidad superficial y formación de recubrimientos (Patel et al., 2016).

Una capacidad clave del SEM es realizar mapeos de rayos X utilizando la técnica EDS (EDX o EDS). Esto permite identificar y cuantificar la distribución de elementos químicos en la muestra, lo cual es fundamental para el análisis de aleaciones, materiales compuestos y recubrimientos (Prodana et al., 2023).

En el campo específico del análisis de material particulado atmosférico, el SEM-EDS ofrece una valiosa ventaja: la posibilidad de relacionar visualmente la morfología, tamaño y textura de las partículas con su composición química correspondiente, determinada de manera semicuantitativa mediante la espectroscopía

EDS (Goldstein et al., 2017).

## **2.2. Antecedentes de la Investigación**

La caracterización del material particulado es un tema de gran importancia científica actual que nos permite conocer y comprender las características fisicoquímicas de la contaminación ambiental en puntos específicos de monitoreo (Y. Zhao et al., 2019). En este sentido, estudios previos han relacionado la composición del material particulado con metales, metaloides y no metales mediante el uso de diversos equipos de caracterización fisicoquímica como son la caracterización por SEM, fluorescencia por Rayos X (XRF), Espectrometría Infrarroja FTIR, Espectroscopia RAMAN, Absorción atómica, entre otros (Alexandrina et al., 2014; Kim et al., 2002; Suárez-Salas et al., 2017a). Estos estudios han utilizado diferentes métodos para obtener directamente los componentes del material particulado, ya sea de manera invasiva o no destructiva (Grechkin et al., 2021).

### **2.2.1. Antecedentes Internacionales**

Daniel Alberto Franco Pineda (2020), en su estudio "ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2.5 EN LA CIUDAD DE MANIZALES" presentó un análisis sobre la concentración, composición química y morfológica del material particulado (PM10 y PM2.5) en la ciudad de Manizales, Colombia. Se determinó el contenido de iones sulfatos y nitratos en muestras de PM10, y se realizó una caracterización elemental mediante SEM/EDS para filtros de PM10 y PM2.5. Los resultados mostraron la presencia de elementos como Pb, S, Cu, Na, Al, Cl y Fe, asociados a fuentes vehiculares, desgaste de llantas y frenos, desgaste de piezas móviles y polvo de vías. Elementos como Fe, Al, S, Na, Ca y Mg

se relacionaron con industrias del acero, mientras que P, S, Zn, F, As, Mn, Mg, Ga y Ti se atribuyeron a fuentes volcánicas. El análisis morfológico reveló formas variadas, como partículas esféricas asociadas a la combustión de carbón, partículas amorfas con bordes filosos relacionadas con emisiones volcánicas, aglomeraciones de hollín vinculadas a emisiones vehiculares, y partículas geométricas irregulares de fuentes naturales.

Juan Manuel Gasca Tierrafría (2007), en su estudio "Caracterización por SEM-EDS de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable en la ciudad de Querétaro en México y su relación con fuentes contaminantes" determinó las características de composición química, morfología y tamaño de partículas atmosféricas de la Ciudad de Querétaro mediante la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) acoplada a la Espectrometría por Energía Dispersa (EDS). Este análisis permitió identificar un probable origen de las partículas, contribuyendo así a la toma de medidas correctivas y de prevención de la contaminación del aire por fuentes contaminantes. Los resultados mostraron que las zonas de estudio presentaban el mismo tipo de aeropartículas antrópicas, compuestas principalmente por cobre, carbono elemental, bario, hierro, zinc, plomo y níquel. Las posibles fuentes emisoras identificadas incluyeron industrias de fundición, vidrio, pigmentos, acereras, procesos de quema de combustóleo, soldadura y emisiones fugitivas de industrias metálicas básicas. La influencia del tránsito vehicular también se evidenció debido al desgaste mecánico de autopartes. La mayoría de las aeropartículas analizadas presentaron formas esféricas y tamaños menores a 10  $\mu\text{m}$ .

Hussain et al. (2024), en su artículo científico "Characteristics and health implications of fine particulate matter near urban road site in Islamabad, Pakistan", encontraron que la concentración promedio de partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) en Islamabad

durante el invierno de 2022-2023 fue notablemente mayor que los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), alcanzando 133.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , superando significativamente el límite de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la OMS. Además, la concentración promedio de bacterias (308.64 CFU/ $\text{m}^3$ ) fue significativamente mayor que la de hongos (203.55 CFU/ $\text{m}^3$ ). Los análisis SEM-EDS y FTIR revelaron que el PM<sub>2.5</sub> estaba compuesto por diversas partículas, como agregados de hollín, cenizas de carbón, minerales, biopartículas y algunas partículas no identificadas. Se identificaron compuestos orgánicos semivolátiles (SVOCs), como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y compuestos fenólicos, con variaciones notables en sus concentraciones. Utilizando modelos de evaluación de riesgos para la salud desarrollados por la EPA de los Estados Unidos, se estimaron los riesgos potenciales asociados con la exposición al PM<sub>2.5</sub>, destacando la urgencia de abordar los problemas de calidad del aire.

Mushtaq et al. (2023), en su artículo científico "Study of elemental concentration, surface morphology and chemical characterization of atmospheric aerosols and trace gases in an urban environment (India)", estimaron la concentración elemental de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en la región de Greater Noida (India). Se analizaron la morfología superficial y la composición química de estas partículas y gases utilizando SEM-EDX. También se estudió la mineralogía de estos contaminantes mediante XRD y FTIR. Se observaron partículas de formas esféricas, deformadas e irregulares en las muestras estudiadas. Los estudios de SEM-EDS revelaron diferentes patrones y formas de partículas finas, gruesas y partículas suspendidas totales, como formas esféricas e irregulares, racimos, agrupaciones, elementos biogénicos en forma de estructura de panal de miel (Brochosomas) y polen, procedentes de diferentes fuentes. Los estudios mineralógicos mostraron la presencia de cuarzo, feldespato,

caolinita, silicato de calcio y aluminio y carbono orgánico en la región estudiada.

Sinha et al. (2021), en su estudio científico "A new sample preparation protocol for SEM and TEM particulate matter analysis", desarrollaron una nueva metodología de preparación de muestras para el análisis de partículas mediante SEM y TEM. Esta metodología favoreció la transferencia eficiente de partículas desde los sustratos de muestreo a una película de acetato. Mediante este enfoque, las muestras para SEM pudieron retener su distribución espacial original, y las muestras para TEM compuestas por partículas submicrónicas también pudieron proporcionar información cristalográfica. La metodología podría aplicarse incluso cuando la cantidad de partículas recolectadas fuera extremadamente limitada.

### **2.2.2. Antecedentes Nacionales**

Rojas et al. (2023), en su investigación titulada: "Efecto fitotóxico del material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la ciudad de Julica, Perú", determinaron los efectos fitotóxicos del material particulado atmosférico en la ciudad de Juliaca, Perú. Se encontraron concentraciones de 9.5 y 33.20 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, respectivamente, en diferentes puntos de control. El análisis químico reveló la presencia de metales pesados en el siguiente orden de concentración: Pb>Mn>Cr>>Cd. Se evaluó el efecto de estas partículas en el porcentaje de germinación y el tamaño radicular de tres especies vegetales (Caléndula officinalis, Schinus terebinthifolia y Physalis peruviana). A pesar de la presencia de metales pesados, no se observó una influencia marcada en el proceso de germinación o formación radicular en comparación con el grupo control.

De La Cruz et al. (2019), en su estudio que titula "Chemical Characterization of PM<sub>2.5</sub> at Rural and Urban Sites around the Metropolitan Area of Huancayo (Central

Andes of Peru)", determinaron la concentración másica de PM<sub>2.5</sub> y el contenido de elementos traza e iones solubles en agua en muestras recolectadas en el área metropolitana de Huancayo. Se instalaron cuatro estaciones de monitoreo en tres áreas urbanas: El Tambo (UNCP), Huancayo (HYO) y Chilca (CHI), y una en una zona rural, que fue el Observatorio de Huancayo (IGP). La concentración media anual de PM<sub>2.5</sub> osciló entre 3.4 y 36.8 µg/m<sup>3</sup>, superando los umbrales anuales de la Organización Mundial de la Salud y las normas nacionales de calidad del aire. Se observaron diferencias significativas entre la mayoría de los elementos traza en las áreas urbanas y rurales. El análisis de componentes principales (PCA) y el análisis de conglomerados jerárquicos (HCA) ilustraron que las fuentes más importantes de elementos traza son de origen natural (resuspensión de suelo) y fuentes vehiculares (combustión de combustible, abrasión de neumáticos de vehículos, desgaste de componentes de automóviles).

Suárez-Salas et al. (2017b), en su artículo "Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú", caracterizaron la composición química del material particulado atmosférico recolectado en una estación ubicada en el centro urbano de Huancayo. Se determinó la concentración de partículas de tamaño hasta 10 µm (PM<sub>10</sub>) y partículas menores a 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>), así como la composición química de hasta 38 elementos mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF). Los resultados mostraron que las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> superaron la normativa anual de calidad del aire peruano, siendo el PM<sub>2.5</sub> el de mayor abundancia en comparación con otras ciudades importantes. Se evidenció una mayor concentración de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el período seco. La determinación de la composición química indicó que los elementos geológicos (8%), metales (12%) y metaloides (7%) fueron los componentes más abundantes en el PM<sub>10</sub>,

mientras que los no metales (4%), iones (11%) y especies carbonáceas (44%) predominaron en el PM2.5.

### **2.2.3. Antecedentes Locales**

A nivel local, en la ciudad del Cusco, el aumento de la contaminación del aire ha estado directamente relacionado con el crecimiento de actividades antropogénicas, como la producción de ladrillos y el tráfico vehicular (PRAL, 2006). Estudios como el de PRAL (2006) han evidenciado esta correlación, destacando la necesidad de monitorear y evaluar la calidad del aire en diferentes áreas de la ciudad. Específicamente, el proyecto PRAL (Programa de Aire Limpio) fue una iniciativa desarrollada en la ciudad del Cusco para abordar los problemas de contaminación atmosférica, enfocándose en la identificación de fuentes emisoras y la cuantificación de los niveles de material particulado y otros contaminantes. Este proyecto sentó las bases para futuras investigaciones y acciones orientadas a mitigar el impacto ambiental y en la salud pública.

En un estudio reciente, Warthon et al. (2024) en su artículo científico "Reduction of the concentration of particulate material at a sampling point in Cusco city at the beginning of the pandemic", evaluaron la reducción de la contaminación del aire debido a las partículas PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco al inicio de la pandemia producida por el COVID-19. Durante el confinamiento social en Perú, que comenzó el 16 de marzo de 2020 y se extendió hasta finales de junio, se observó una disminución significativa en el flujo vehicular en las calles y avenidas de la ciudad. Aprovechando esta situación, los investigadores midieron la calidad del aire en un punto de muestreo ubicado en el campus de la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco, utilizando un muestreador de alto volumen (Hi-Vol) 3000 para

material particulado y determinando la masa de partículas adheridas a los filtros mediante gravimetría. Los resultados revelaron una reducción promedio significativa en la concentración de PM10 y PM2.5, alcanzando  $-57.43\%$  y  $-59.52\%$ , respectivamente, en comparación con los valores previos a la pandemia. Además, se evaluó la relación con los parámetros meteorológicos y los datos de movilidad de Google, concluyendo que estos parámetros no afectaron significativamente la reducción del material particulado, a diferencia de la disminución del tráfico vehicular. Este estudio pone de manifiesto los efectos positivos de la pandemia en la reducción de la contaminación del aire y cómo las medidas de confinamiento tuvieron un efecto secundario en la disminución de la contaminación atmosférica en la ciudad del Cusco.

Pearce et al. (2009) en su investigación "Residential Exposures to PM2.5 and CO in Cusco, A High-Altitude City in the Peruvian Andes: A Pilot Study", midieron las concentraciones de PM2.5 y CO a nivel de exposición respiratoria en interiores y exteriores durante períodos de preparación de comidas en una muestra de conveniencia de hogares por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar en Cusco, Perú. Desde el 10 al 21 de julio de 2005, se tomaron 237 mediciones durante un estudio piloto en 41 residencias. Los resultados mostraron que los niveles más altos de PM2.5 y CO ocurrieron durante las primeras horas de la mañana en la cocina cuando se utilizaron estiércol y leña. Además, los hallazgos sugieren que la combustión residencial de biomásas en Cusco resulta en niveles elevados de exposición a PM2.5 y CO en interiores, lo que representa una preocupación potencial para la salud humana, una cuestión que puede verse exacerbada por el impacto fisiológico de vivir en un entorno de gran altitud.

En el artículo científico titulado "Evaluación de la Contaminación del Aire por Material Particulado PM2.5 en la ciudad del Cusco Respecto de los Índices de Calidad

del Aire entre 2017 y 2018", publicado en 2023 en la revista Ambiente, Comportamiento y Sociedad, Stephen et al. (2023), llevaron a cabo una evaluación de la contaminación del aire por material particulado PM2.5 en diferentes áreas de monitoreo de la ciudad del Cusco durante los años 2017 y 2018.

En este estudio, analizaron muestras de PM2.5 recolectadas de varios puntos de la ciudad, las mediciones fueron realizadas en intervalos de 24 horas, siguiendo las pautas normativas establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Los valores de concentración se obtuvieron mediante gravimetría y posteriormente se calculó el promedio de estas mediciones. Los resultados obtenidos revelaron que más del 84% de los sitios monitoreados presentaron una calificación “mala” en los Índices de Calidad Ambiental (INCA) establecidos por el Ministerio del Ambiente del Gobierno Peruano (MINAM), lo que indica que la población de Cusco está expuesta a niveles perjudiciales de PM2.5.

Una zona destacada de la investigación es el distrito de San Jerónimo en Cusco, donde se registró una concentración promedio de  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM2.5, ubicándose en el umbral de cuidado representado por el color rojo en los INCA. Estos niveles elevados de PM2.5 en San Jerónimo se correlacionan con el riesgo de desarrollar enfermedades pulmonares crónicas y cardiovasculares. En general, los autores concluyeron que, según los INCA, el aire en la ciudad del Cusco es calificada como “mala”.

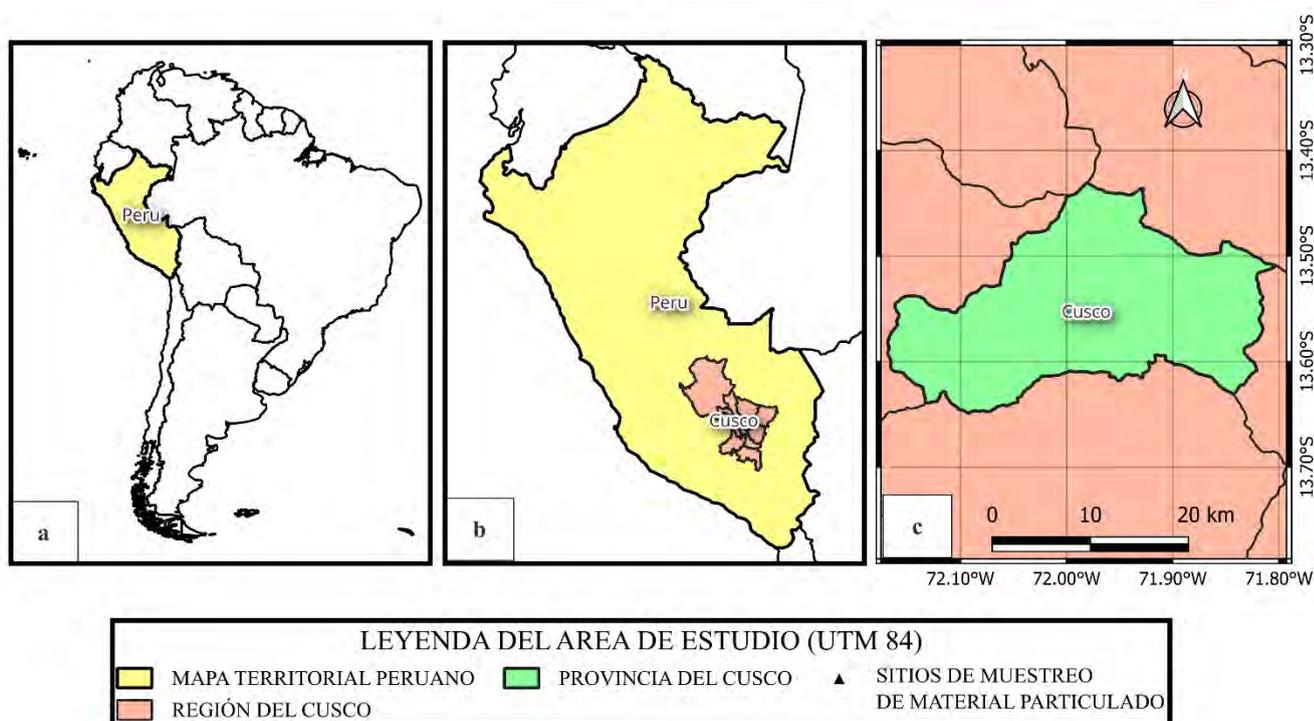
## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Localización política y geográfica

Geográficamente, la ciudad del Cusco se encuentra en la Cordillera de los Andes, a una altitud que oscila entre los 3100 y 3600 metros sobre el nivel del mar. Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018), cuenta con una población de más de 430 mil habitantes.

**Figura 5**

*Referenciación geográfica del área de estudio*



*Nota.* a) Ubicación territorial de Perú en Sudamérica, b) Ubicación geográfica de la Región del Cusco en Perú, c) Ubicación de la provincia del Cusco dentro de la Región del Cusco. (El mapa fue creado usando el programa Quantum GIS 3.34.3; <https://www.qgis.org/es/site/>).

En la Figura 5(c) se aprecia la ciudad del Cusco, ubicada en las coordenadas geográficas aproximadas de  $-13.52^{\circ}$  de latitud sur y  $-71.98^{\circ}$  de longitud oeste. Cusco

es reconocida como la Capital Histórica del Perú y es considerada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO desde 1983 (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, s. f.) . Además, es un importante destino turístico, recibiendo a más de cuatro millones de visitantes al año debido a su proximidad con Machu Picchu, una de las siete maravillas del mundo.

El clima en Cusco se caracteriza por dos estaciones principales: una seca que va de abril a noviembre y otra lluviosa que abarca de diciembre a marzo. Esta variabilidad climática influye en diversos aspectos del entorno, incluyendo la calidad del aire y la presencia de material particulado en la atmósfera.

## **3.2. Diseño y nivel de investigación**

### **3.2.1.1. Diseño de la investigación**

El diseño de investigación para la tesis se fundamenta en un enfoque mixto, es decir, cuantitativo y cualitativo, en concordancia con los principios descritos por Bunge (1957) en su obra "La ciencia: su método y su filosofía". En este enfoque, se busca la obtención de datos numéricos que permitan un análisis riguroso y la formulación de teorías sustentadas en evidencia empírica. Para Hernández Sampieri (2014), este enfoque es estructurado, predeterminado, la recolección de datos se basa en instrumentos estandarizados, válidos y confiables en estudios previos, los datos se representan en forma de números analizados estadísticamente.

En la investigación se identificó la composición elemental presente en el material particulado a través de la interpretación de las líneas de energía características, utilizando los datos proporcionados por el SEM. Además, se llevó a cabo un análisis para determinar un porcentaje referencial de cada elemento identificado en las

muestras de material particulado, basándose en la intensidad de las líneas de energía emitidas por dichos elementos. Este análisis cualitativo nos permite evaluar la composición elemental del material particulado.

### **3.2.2. Nivel de investigación**

El nivel de esta investigación se enmarca en el ámbito descriptivo, correlacional y explicativo, conforme al trabajo "El estudio descriptivo en la investigación científica" Ochoa J. y Yunkor Y. (2019) En este contexto, se aborda una variable única de interés: la composición elemental del material particulado PM2.5 y PM10 en la ciudad del Cusco.

En el nivel descriptivo, se consideran factores directamente relacionados con la variable de interés, como las condiciones ambientales, geográficas y temporales que influyen en la composición elemental del material particulado (PM) en el aire. Estos factores se derivan de la población de estudio y se seleccionan cuidadosamente para comprender y describir adecuadamente el fenómeno investigado.

En cuanto al nivel correlacional, este estudio busca establecer relaciones entre las concentraciones de PM2.5 y PM10 y diversas variables meteorológicas. Se analizan posibles correlaciones entre la concentración de concentraciones gravimétricas determinadas para el material particulado y factores como la temperatura media, precipitación y presión atmosférica.

El nivel explicativo de la investigación se centra en determinar las causas y mecanismos que influyen en la composición elemental del PM2.5 y PM10 en Cusco. Se busca explicar cómo y por qué ciertos elementos se encuentran en mayores concentraciones en determinadas áreas o períodos. Este análisis puede incluir la evaluación de fuentes de emisión, influencias de variables meteorológicas y

concentración de partículas.

### **3.3. Unidad de análisis**

Según Hernández Sampieri (2014), la unidad de análisis se refiere a los sujetos o entidades que se estudian y sobre los cuales se recogen y analizan datos. En este estudio de investigación, la unidad de análisis es el material particulado PM2.5 y PM10 presente en el aire de la ciudad del Cusco durante el período de estudio. Específicamente, se analizó la composición elemental del PM2.5 y PM10 de diferentes ubicaciones de la ciudad durante el tiempo especificado.

### **3.4. Metodología**

#### **3.4.1. Metodología de muestreo de material particulado**

##### **3.4.1.1. Sitios de muestreo**

La selección de los puntos de medición fue un proceso basado en la necesidad de capturar la variabilidad espacial de la concentración de PM en diversas áreas de Cusco. Para el muestreo en la ciudad, se identificaron lugares que reflejan diversas condiciones ambientales y fuentes potenciales de material particulado PM2.5 y PM10. Se eligieron sitios estratégicos que incluyen áreas residenciales, comerciales, zonas de alto tráfico vehicular y vecindades de fuentes industriales. Este muestreo predeterminado asegura que las muestras sean representativas de las variaciones ambientales y las actividades humanas en distintas zonas de la ciudad.

En la tabla 1, se detallan los sitios de medición y sus coordenadas geográficas en el sistema UTM-84.

**Tabla 1***Sitios de medición de material particulado.*

ID	Distrito	Sitios de medición	Coordenadas (UTM-84)	
			Longitud	Latitud
S1	Cusco	Campus Universitario UNSAAC, Facultad de Educación	-71.9589345	-13.521351
S2	San Sebastián	APV Paraiso de Fátima	-71.928998	-13.5408326
S3	Cusco	Campus Universitario UNSAAC, puerta número 05 (multired)	-71.9608363	-13.5222768
S4	Cusco	Colegio Clorinda Matto de Turner	-71.968858	-13.520418
S5	Wanchaq	Local del Municipio Distrital	-71.966772	-13.521341
S6	Wanchaq	Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos	-71.9706128	-13.5225281
S7	Cusco	Plaza San Francisco (cercano a pileta)	-71.980992	-13.518703
S8	Cusco	Plaza San Francisco (frontis del colegio Ciencias)	-71.981506	-13.518851
S9	Cusco	San Blas	-71.9745747	-13.5151739
S10	Cusco	Plazoleta Limacpampa	-71.9736632	-13.5195413
S11	Cusco	Plazoleta Pumacchupan	-71.9732203	-13.5238343
S12	Cusco	Calle Matará	-71.9785657	-13.5216556
S13	Santiago	Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa	-71.9787936	-13.5255457
S14	San Jerónimo	Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria	-71.8801196	-13.5488286
S15	Cusco	Campus Universitario UNSAAC, puerta número 03	-71.959374	-13.523142

*Nota.* Cada sitio de muestreo posee su ID característico junto a sus coordenadas UTM-84

### 3.4.1.2. Preparación del muestreador y filtros

Se empleó un equipo muestreador de alto volumen Hi-Vol 3000 con cabezal intercambiable, específicamente diseñado para capturar muestras en diferentes puntos de la ciudad (Anexo A1). Las partículas atmosféricas se recogieron en filtros de cuarzo durante un período de 24 horas, siguiendo estándares establecidos por el MINAM y la EPA para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos (MINAM, 2019; US-EPA, 2004).

La preparación adecuada del muestreador de alto volumen Hi-VOL 3000 es importante para garantizar la obtención de datos confiables y precisos. Este proceso se

realizó con cuidado, siguiendo estrictamente las instrucciones del fabricante y los protocolos de monitoreo de Aire Nacionales (DIGESA, 2005; MINAM, 2019). Cada componente del equipo fue inspeccionado cuidadosamente para asegurar su correcto funcionamiento y calibración.

En cuanto a los filtros utilizados para la recolección de partículas, se emplearon filtros de microfibra de cuarzo de 8 x 10 pulgadas de alta calidad de la marca Merck. Antes del muestreo, los filtros fueron colocados en un desecador de vidrio para eliminar la humedad y estabilizarlos (Mushtaq et al., 2023). Luego, se pesaron en una balanza analítica de precisión marca OHASUS para determinar su masa inicial. El manejo de los filtros se realizó con extremo cuidado para evitar cualquier contaminación o alteración de su superficie.

Después de ser pesados, los filtros se transportaron al punto de muestreo con meticuloso cuidado para realizar el monitoreo de 24 horas. Al finalizar el muestreo, los filtros se colocaron nuevamente en un desecador antes de ser pesados de nuevo para determinar la masa final de las partículas recolectadas.

#### **3.4.1.3. Instalación del muestreador en el sitio de medición**

El muestreador se instaló en la cabina Shelter de monitoreo ambiental del CIEA (Anexo A2), sobre un soporte estable y nivelado, a una altura específica de 2.5 metros sobre el nivel del suelo (Karen Alfonso et al., 2023). Esta altura se seleccionó cuidadosamente para representar la zona de respiración humana y garantizar que las mediciones reflejen la exposición real de los habitantes a las partículas en suspensión.

Antes de iniciar el muestreo, se realizó una inspección minuciosa para asegurar que el muestreador estuviera perfectamente nivelado y que la entrada de aire no

estuviera obstruida por ningún objeto o estructura cercana. Cualquier obstrucción podría afectar la tasa de flujo de aire y, por lo tanto, la representatividad de las muestras recolectadas.

#### **3.4.1.4. Operación del muestreador**

Una vez instalado y verificado, el muestreador se activó para iniciar la recolección de muestras de aire durante un período de 24 horas consecutivas siguiendo la normativa nacional.

Durante el proceso de muestreo, el flujo de aire se mantuvo constante en aproximadamente 1.67 m<sup>3</sup>/min.

#### **3.4.1.5. Recuperación del filtro**

Después de completar el período de muestreo de 24 horas, el filtro se retiró del muestreador con meticuloso cuidado para evitar cualquier pérdida o contaminación de la muestra. Los filtros recolectados se transportaron de manera segura y controlada, garantizando la integridad de las muestras. Estos filtros, con el material particulado recolectado, se llevaron al laboratorio del Centro de Investigación de Energía y Atmósfera, donde se realizó el pesaje final, se codificaron las muestras y se determinaron los valores de concentración del material particulado depositado en los filtros (Anexo A7).

### **3.4.2. Obtención de la concentración de material particulado**

Para determinar la concentración de material particulado en cada muestra, se siguieron rigurosamente los protocolos establecidos por el MINAM (2019) y la EPA (2004). Este proceso se realizó mediante la técnica de gravimetría, que implica medir la masa acumulada en el filtro que resulta de la diferencia entre las masas final e inicial.

En el laboratorio, se pesa el filtro antes y después de la recolección de partículas. La diferencia entre estas dos mediciones proporciona la masa acumulada de material particulado en el filtro durante el período de muestreo. Esta masa se ajusta teniendo en cuenta la superficie de filtración y el volumen de aire muestreado para calcular la concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en microgramos por metro cúbico de aire.

La ecuación para determinar la concentración de material particulado en microgramos por metro cúbico de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se obtiene utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración}_{PM} = \frac{m}{V_{\text{estandar}}} \dots (1)$$

Donde:

$m$  es la masa del contaminante (en microgramos) recolectada en el filtro de cuarzo.

$V_{\text{estandar}}$  es el volumen estándar de aire filtrado (en metros cúbicos).

El volumen estándar se define como:

$$V_{\text{estandar}} = V_S \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{estandar}}} \frac{T_{\text{estandar}}}{T_{\text{atm}}} \dots (2)$$

Donde:

- $V_S$  es el volumen de la muestra acumulada no corregida de aire (en metros cúbicos), se obtuvo multiplicando el caudal de aire medido en el instante por el muestreador ( $Q$ ) por el tiempo de muestreo ( $t$ ) como se muestra en la ecuación (3).

$$V_S = Q \cdot t \dots (3)$$

Donde el caudal ( $Q$ ) es decir el flujo de aire atmosférico a través del equipo muestreador fue de  $67 \text{ m}^3/\text{h}$  y el tiempo de medición fue de 24 horas.

- $T_{atm}$  es la temperatura atmosférica medida en el sitio de muestreo mediante el uso de termómetros de mercurio.
- $T_{estandar}$  es la temperatura estándar en Kelvin (K), que es 298 K según el protocolo EPA.
- $P_{atm}$  es la presión atmosférica en mmHg, medida por un flujómetro de marca Mesa Labs en el sitio de muestreo.
- $P_{estandar}$  es la presión estándar en mmHg, que es 760 mmHg según el protocolo EPA.

### **3.4.3. Material particulado respecto a las variables meteorológicas**

#### **3.4.3.1. Datos de variables meteorológicas**

Para obtener los datos meteorológicos, se descargaron los datos abiertos proporcionados por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA por sus siglas en inglés), a través del Resumen de Datos Diarios de Superficie Global (Global Historical Climatology Network-Daily [GHCND], s.f.). De esta fuente se obtuvieron variables meteorológicas como precipitación, presión atmosférica media y temperatura media.

Los datos satelitales proporcionados por la NOAA se encuentran en unidades distintas al Sistema Internacional de Unidades (SI). Por lo tanto, realizamos las siguientes conversiones para facilitar el análisis y correlación con los niveles de material particulado:

- Temperatura Media (TEMP):  $0.1^\circ\text{F} = 0.0556^\circ\text{C}$

- Presión Media en la Estación (STP): 0.1 mb = 10 Pa
- Cantidad de Precipitación (PRCP): 0.01 pulgadas = 0.254 mm

Estas conversiones son cruciales para establecer una base común de unidades y permitir una comparación precisa entre las variables meteorológicas y los niveles de material particulado PM2.5 y PM10, los cuales son indicadores clave de la calidad del aire.

Una vez normalizados los datos, procedimos a realizar la limpieza de los mismos y posteriormente se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables meteorológicas (temperatura media en °C, presión media en Pa y cantidad de precipitación en mm) y las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10.

#### **3.4.3.2. Correlación de Pearson**

Reconociendo la importancia de cuantificar la intensidad y sentido de la relación entre estas variables, se ha empleado el coeficiente de correlación de Pearson, una métrica ampliamente aceptada en la comunidad científica (Shao et al., 2022; Sinha et al., 2021). Este coeficiente, denotado por  $r$ , varía entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 0 indican una correlación débil o inexistente, mientras que los valores cercanos a -1 o 1 sugieren una correlación negativa o positiva fuerte, respectivamente, a su vez, si el valor  $p$  (valor de significancia entre dos variables) obtenido en el análisis de correlación es menor que el nivel de significancia predeterminado, comúnmente establecido en  $\alpha=0.05$ , se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que existe una correlación significativa entre las variables. Por otro lado, si el valor  $p$  excede  $\alpha$ , no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para afirmar que existe una correlación significativa.

La fórmula utilizada para calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre dos conjuntos de datos X y Y con n observaciones cada uno es la siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots (4)$$

Donde:

- $x_i$  y  $y_i$  son los valores de las i-ésimas muestras de las variables X y Y respectivamente.
- $\bar{x}_i$  y  $\bar{y}_i$  son los valores medios de las variables X y Y respectivamente.
- r es un valor adimensional que varía entre -1 y 1.

En nuestro estudio, las variables meteorológicas de interés fueron la temperatura media (°C), la presión media en la estación (Pa) y la cantidad de precipitación (mm), mientras que las variables dependientes fueron las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10.

### **3.4.4. Análisis SEM-EDS**

#### **3.4.4.1. Selección de filtros para la caracterización**

Para obtener una representación adecuada de las variaciones espaciales y temporales, se seleccionaron aleatoriamente 32 filtros de las campañas de muestreo realizadas. Esta selección incluyó un día representativo de medición en cada uno de los 15 sitios de monitoreo para cada uno de los tres años evaluados. De esta manera, se obtuvieron 16 filtros correspondientes a PM2.5 y 16 filtros correspondientes a PM10, cuya distribución se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2***Filtros de material particulado PM2.5 y PM10 seleccionados para la caracterización*

<b>ID</b>	<b>Distrito</b>	<b>Sitio de Monitoreo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tipo de Material Particulado</b>	<b>Código de Filtro</b>
S1	Cusco	Campus Universitario, Facultad de Educación	6/01/2017	PM2.5	22
S1	Cusco	Campus Universitario, Facultad de Educación	11/05/2017	PM10	31
S2	San Sebastián	APV Paraiso de Fátima	5/08/2017	PM10	46
S2	San Sebastián	APV Paraiso de Fátima	31/07/2017	PM2.5	42
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	7/07/2017	PM10	37
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	12/09/2017	PM10	57
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	18/02/2020	PM10	202
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	17/12/2020	PM10	268
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	7/09/2017	PM2.5	54
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	27/01/2020	PM2.5	194
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	26/06/2020	PM2.5	237
S4	Cusco	Colegio Clorinda Matto de Turner	25/12/2017	PM2.5	87
S4	Cusco	Colegio Clorinda Matto de Turner	19/12/2017	PM10	83
S5	Wanchaq	Local del Municipio Distrital	2/01/2018	PM10	94
S5	Wanchaq	Local del Municipio Distrital	29/12/2017	PM2.5	90
S6	Wanchaq	Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos	11/01/2018	PM10	101

S6	Wanchaq	Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos	8/01/2018	PM2.5	98
S7	Cusco	Plaza San Francisco (cerca a pileta)	2/02/2018	PM2.5	118
S7	Cusco	Plaza San Francisco (cercano a pileta)	25/01/2018	PM10	110
S9	Cusco	San Blas	14/03/2018	PM10	137
S9	Cusco	San Blas	8/03/2018	PM2.5	131
S10	Cusco	Plazoleta Limacpampa	28/03/2018	PM2.5	149
S10	Cusco	Plazoletata Limacpampa	24/03/2018	PM10	145
S11	Cusco	Plazoleta Pumacchupan	11/04/2018	PM10	155
S11	Cusco	Plazoleta Pumacchupan	5/04/2018	PM2.5	151
S12	Cusco	Calle Matará	19/04/2018	PM10	159
S12	Cusco	Calle Matará	23/04/2018	PM2.5	163
S13	Santiago	Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa	27/05/2018	PM10	174
S13	Santiago	Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa	11/05/2018	PM2.5	168
S14	San Jerónimo	Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria	20/06/2018	PM10	181
S14	San Jerónimo	Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria	18/08/2018	PM2.5	189
S15	Cusco	Campus Universitario, puerta número 03	14/05/2020	PM2.5	214

*Nota.* La elección de los filtros de PM2.5 y PM10 representativos de cada sitio en función a la fecha fue realizado de manera aleatoria.

#### **3.4.4.2.Preparación de muestras**

La preparación de las muestras para su caracterización fisicoquímica implica procedimientos cuidadosos que aseguren la integridad de los datos obtenidos. En este sentido, se realizó un corte del filtro de cuarzo que contiene el material particulado para obtener una muestra con un área adecuada para ser visualizada y analizada en el

Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Es esencial destacar que durante este proceso no se aplicó ningún tratamiento químico que pudiera alterar la composición química del filtro con material particulado.

Para la preparación de muestras SEM, se pegó el filtro con material particulado depositado directamente al porta-muestras usando una cinta adhesiva de carbono de doble cara, siguiendo las recomendaciones del fabricante (Anexo A8). Esto facilita una correcta adherencia de la muestra al porta-muestras. Además, la deposición de una película delgada de carbón conductor puede ayudar en las observaciones durante el análisis, evitando la acumulación de carga eléctrica en la superficie de la muestra, ya que estas pueden distorsionar las imágenes (Sinha et al., 2021).

Además de la preparación de los 32 filtros con material particulado depositado para su análisis, se prepararon 3 muestras de filtros blancos para garantizar la calidad de la medición, los cuales no contenían material particulado. Se midieron los espectros de estos filtros para tener un blanco como referencia (Hussain et al., 2024; Marina-Montes et al., 2022).

#### **3.4.4.3. Análisis EDS de muestras de PM**

El análisis fisicoquímico se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido de sobremesa (SEM) marca JEOL JCM-7000. Este equipo cuenta con una fuente de tungsteno y permite seleccionar un vacío bajo o alto, según sea necesario para observar las muestras. En los SEM de bajo vacío, se introduce gas nitrógeno o aire para ajustar la presión dentro de la cámara de muestras a un nivel de varias decenas a varios cientos de Pa.

Los espectros de energía para identificar la composición elemental de las partículas se midieron utilizando un detector DrySD<sup>TM</sup>30, derivado de silicio. Este es

un detector de rayos X de dispersión de energía (EDS) para el SEM, que detecta los rayos X característicos generados por la sonda electrónica del microscopio. El detector tiene la capacidad de detectar elementos desde berilio (Be) hasta uranio (U), ofreciendo una resolución de energía de 133.0 eV o menor. La distancia de trabajo óptima es aproximadamente 12 mm y puede operar con una aceleración de voltaje de hasta 15 kV (JEOL, s.f.).

Durante el análisis EDS, se emplearon las siguientes condiciones: bajo vacío, voltaje de aceleración de 15.0 kV y una distancia de trabajo entre 12.8 mm y 13.6 mm. Las condiciones ambientales requeridas por el equipo incluyen una temperatura entre 15 y 30 grados Celsius y una humedad relativa de 60% o menos. La calibración del equipo se realizó en colaboración con la empresa proveedora, garantizando la obtención de datos confiables y precisos. Todos los filtros se analizaron bajo las mismas condiciones.

Dentro de la información obtenida, se capturaron imágenes de cada filtro, permitiendo observar las partículas depositadas en ellos. Los resultados del EDS se presentan como espectros de intensidad (conteos) versus energía de emisión (keV). A través de la interpretación de la posición de cada pico (asociada a la energía de radiación X característica de cada elemento) y la altura del mismo (proporcional a la cantidad del elemento), pudimos identificar los elementos presentes en nuestras muestras (Alberto y Pineda, 2020).

#### **3.4.5. Análisis de datos**

El análisis de datos y espectros se realizó mediante el lenguaje de programación Python (versión 3.10.9). Para el análisis espectral se usó la librería Energy Table for EDS Analysis de (JEOL, s. f.), que exhibe valores de energías comparables a las

librerías más completas, como la de J. A. Bearden (1967). Se desarrolló un algoritmo robusto capaz de identificar y discriminar los diversos picos de líneas de energía características, incluyendo las líneas  $K\alpha$ ,  $M\alpha$  y  $L\alpha$ , con una buena resolución.

Inicialmente, se implementó un código que analiza minuciosamente los espectros de energía dispersiva de rayos X (EDS), identificando los picos de líneas de energía correspondientes a cada elemento presente en la muestra. Mediante un enfoque iterativo, el algoritmo evalúa cada pico potencial, comparándolo con las líneas de energía características de los elementos conocidos, dentro de un rango de error de 0.01 keV, como lo sugiere Bearden en su trabajo seminal.

Posteriormente, se implementó un segundo código que calcula el porcentaje relativo de cada elemento detectado, a partir de la intensidad de cuentas del elemento, considerando un umbral mínimo de 300 cuentas. Este límite se estableció empíricamente para garantizar una adecuada relación señal-ruido y, por lo tanto, la confiabilidad de los resultados.

Gracias a esta metodología rigurosa, los diferentes códigos desarrollados generaron automáticamente espectros detallados, identificando cada línea de energía  $K\alpha$ ,  $L\alpha$  y  $M\alpha$  de los elementos presentes en las muestras con una alta precisión. Estos espectros, junto con los resultados cuantitativos de la composición elemental, se almacenaron de manera organizada en archivos de imagen (.jpg) y hojas de cálculo (.xlsx) utilizando la librería `os` de Python, facilitando así el posterior análisis y la interpretación de los datos.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Concentración de material particulado en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020.

#### 4.1.1. Concentración de material particulado por sitio de monitoreo

Las Tablas 3 y 4 presentan respectivamente la cantidad de mediciones totales por sitio de monitoreo durante el periodo 2017, 2018 y 2020 para PM2.5 y PM10. Estas tablas muestran también los promedios obtenidos y las correspondientes desviaciones estándar.

**Tabla 3**

*Promedios y desviaciones estándar de mediciones de concentraciones de material particulado PM2.5 entre los años 2017, 2018 y 2020.*

ID	Año	Cantidad de muestras recolectadas	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			
			Media	Desviación Estándar	Valor Mínimo	Valor Máximo
S1	2017	8	49.72	15.45	26.88	70.21
S2	2017	4	153.18	6.20	144.25	158.54
S3	2017	10	70.41	9.92	59.88	87.35
S3	2020	30	46.69	17.99	15.61	82.83
S4	2017	4	79.23	10.80	67.85	93.76
S5	2017	3	71.68	12.37	61.88	85.58
S6	2018	6	122.77	12.05	104.00	137.30
S7	2018	12	49.66	12.31	29.28	75.45
S8	2018	5	56.18	21.09	34.42	87.18
S9	2018	2	34.89	8.37	28.97	40.81
S10	2018	5	67.65	11.36	49.35	77.96
S11	2018	3	92.29	11.52	84.49	105.53
S12	2018	4	132.27	3.71	127.41	136.17
S13	2018	4	98.67	6.07	91.06	105.90
S14	2018	8	99.55	48.27	50.78	170.62
S15	2020	3	31.06	2.70	27.97	32.98

**Tabla 4**

*Promedios y desviaciones estándar de mediciones de concentraciones de material particulado PM10 entre los años 2017, 2018 y 2020.*

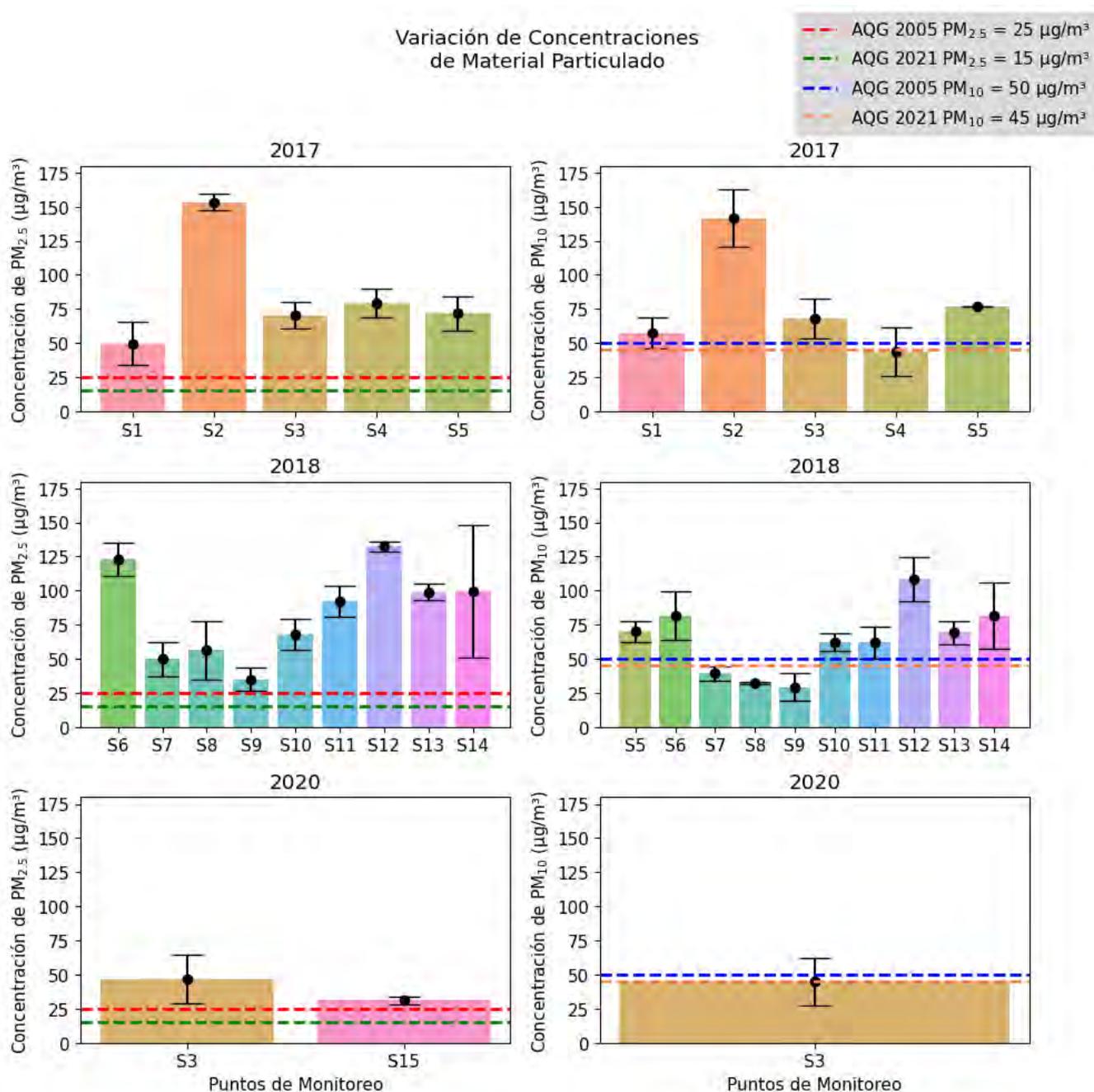
ID	Año	Cantidad de muestras recolectadas	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			
			Media	Desviación Estándar	Valor Mínimo	Valor Máximo
S1	2017	5	57.14	11.34	46.06	75.89
S2	2017	4	141.53	20.92	114.16	160.37
S3	2017	15	67.86	14.34	38.12	92.00
S3	2020	30	45.06	17.36	8.18	79.56
S4	2017	5	43.95	17.78	33.45	75.54
S5	2017	2	76.67	0.08	76.61	76.73
S5	2018	2	70.07	7.88	64.50	75.64
S6	2018	3	81.56	17.97	63.50	99.44
S7	2018	4	39.33	5.22	35.37	46.65
S8	2018	2	32.54	0.86	31.93	33.14
S9	2018	4	29.19	10.11	16.35	39.89
S10	2018	5	62.13	6.42	54.30	71.11
S11	2018	6	62.04	11.80	44.58	80.59
S12	2018	4	108.35	16.21	91.62	130.43
S13	2018	4	69.23	8.44	58.38	78.91
S14	2018	8	81.48	24.29	57.99	121.36

#### **4.1.2. Variación de concentración de material particulado a través de los años por cada sitio de monitoreo.**

La Figura 6 revela una distribución preocupante de los niveles de material particulado PM2.5 en los diferentes sitios de monitoreo. Es particularmente inquietante que todos los sitios hayan excedido los estándares de calidad ambiental establecidos en  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ECA o AQG, por sus siglas en inglés) establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2005 y 2021 respectivamente, cuyo objetivo es proteger la salud y la vida de los ciudadanos (Wikuats et al., 2023). Incluso aquellos sitios con concentraciones cercanas a los límites recomendados, como S7, S9 y S15, correspondientes a la Plaza San Francisco, la Plazoleta de San Blas y el Campus Universitario, respectivamente, aún presentan niveles superiores a lo recomendado.

**Figura 6**

*Variabilidad de las concentraciones de material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en los distintos sitios de monitoreo de los años 2017, 2018 y 2020*



*Nota.* Elaboración propia en Python.

Más alarmante aún son las concentraciones en los sitios S2 y S14, ubicados en APV Paraíso de Fátima y el Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaría en San

Jerónimo, donde los niveles de PM2.5 superan de tres a seis veces los ECA respectivamente. Estos hallazgos son relevantes debido al estudio de Saleem et al. (2022), quienes enfatizan la importancia de los AQG y los riesgos para la salud humana, como los daños cardiovasculares, cuando estos son excedidos.

El estudio de Saleem et al. (2022) confirma la relación entre el material particulado y las enfermedades cardiovasculares en la región oriental de Arabia Saudita. Sus resultados muestran un aumento significativo en las admisiones hospitalarias por arritmias cardíacas, infarto agudo de miocardio e insuficiencia cardíaca en respuesta a concentraciones elevadas de PM10 y PM2.5, superando las Guías de Calidad del Aire (AQG). De forma análoga, nuestro estudio ha encontrado altos niveles de PM2.5 en Cusco, lo cual podría estar provocando un incremento en la incidencia de diversas enfermedades cardiovasculares entre la población cusqueña que no han sido reportadas debido a la falta de investigación sobre el tema.

Otros estudios como el de Evangelopoulos et al. (2020) también destacan la importancia de evaluar la carga mundial de morbilidad (GBD, por sus siglas en inglés) atribuible a la contaminación por material particulado. Según sus cálculos, si se lograran alcanzar los niveles de AQG a nivel global, se podría reducir hasta en un 50% la carga de muertes relacionadas con la exposición al PM2.5. Estos hallazgos resaltan la necesidad de seguir de cerca el progreso hacia el cumplimiento de las directrices de la OMS y adoptar medidas eficaces para mitigar la contaminación atmosférica.

A partir de la Figura 6, también podemos extraer información sobre los niveles de material particulado PM10 en los diferentes sitios de monitoreo a lo largo del tiempo. Es preocupante observar que, con la excepción de unos pocos casos puntuales, la mayoría de los sitios han excedido los estándares de calidad ambiental (ECA)

recomendados por la OMS.

En el caso del PM10, solo el sitio S4, correspondiente al Colegio Clorinda Matto de Turner, logró estar por debajo de los límites recomendados en 2017. Por otro lado, los sitios S7, S8 y S9, ubicados en la Plaza San Francisco (cercano a la pileta), Plaza San Francisco (frente al colegio Ciencias) y San Blas, respectivamente, fueron los únicos que permanecieron por debajo de los límites sugeridos por la OMS durante el año 2018.

En el año 2020, el único punto de medición de PM10 fue el sitio S3 correspondiente al Campus Universitario, puerta número 05 (multired), donde se registró una concentración dentro de los estándares de calidad ambiental. Sin embargo, como bien señala el estudio de Warthon et al. (2024), estos resultados pueden atribuirse al contexto de pandemia y confinamiento estricto o semi-estricto en ese momento, lo que habría reducido temporalmente las emisiones de material particulado.

Por otro lado, nos encontramos con situaciones alarmantes, como el sitio S2 en 2017 y el sitio S12 en 2018, correspondientes a la APV Paraíso de Fátima y la Calle Matará, respectivamente, donde los niveles de PM10 superaron de dos a tres veces los estándares permitidos. Estos hallazgos son similares al estudio de ElSharkawy y Javed (2018), quienes detectaron concentraciones alarmantes de partículas PM10 y PM2.5 en restaurantes en Arabia Saudita, superando los Lineamientos de Calidad del Aire. Estas elevadas concentraciones de partículas representan un riesgo significativo para la salud, especialmente considerando la exposición prolongada a la que podrían estar sometidos aquellos que frecuentan estos establecimientos.

Aunque se observan casos aislados de cumplimiento con los estándares, la tendencia indica que los niveles de material particulado, PM2.5 y PM10, continúan

siendo un problema significativo en la mayoría de los sitios de monitoreo.

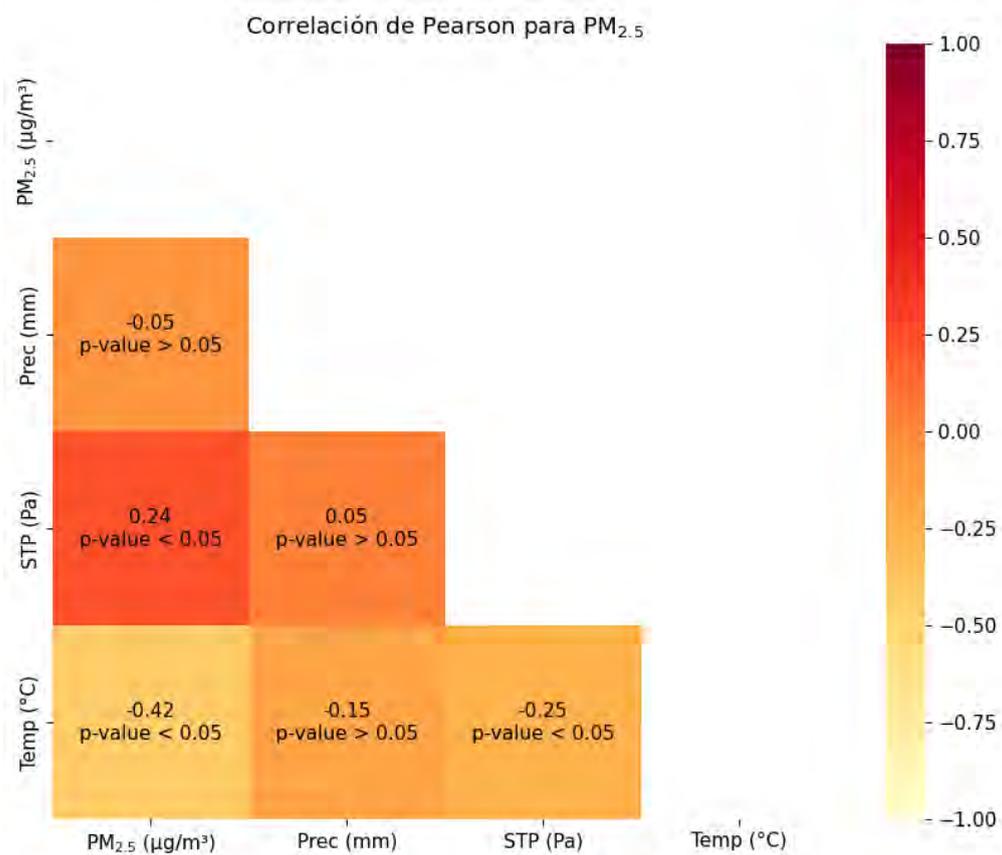
### 4.1.3. Evaluación de la concentración de material particulado respecto a las variables meteorológicas

#### 4.1.3.1. Correlación de Pearson entre variables meteorológicas y material particulado

Tras el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson, las figuras 7 y 8 proporcionan un entendimiento gráfico de las correlaciones halladas.

**Figura 7**

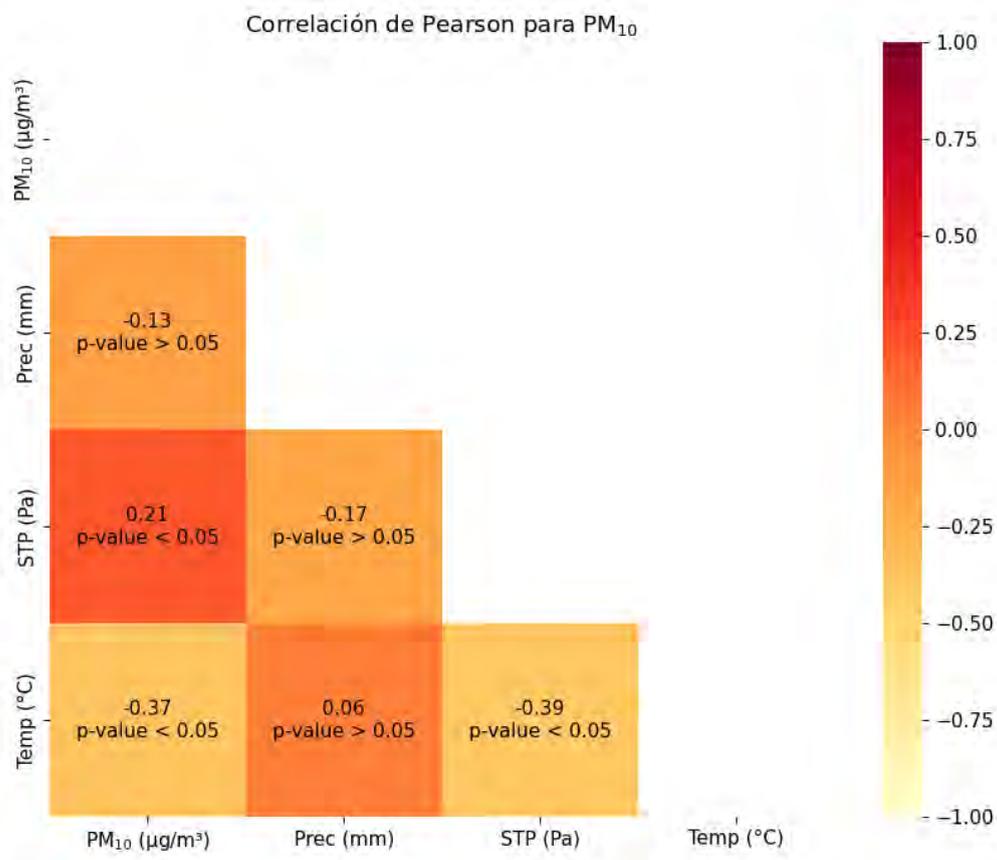
*Correlación de Pearson entre el material particulado PM<sub>2.5</sub> y las variables meteorológicas*



*Nota.* Elaboración propia en Python

**Figura 8**

*Correlación de Pearson entre el material particulado PM10 y las variables meteorológicas*



*Nota.* Elaboración propia en Python

Las figuras 7 y 8 revelan una correlación débil pero existente entre los niveles de material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> con la precipitación, así como una correlación moderada con la temperatura. Estos patrones sugieren que las variables meteorológicas ejercen cierta influencia sobre la concentración y dinámica del material particulado en la atmósfera.

El trabajo de Doğan et al. (2020), sobre los efectos de los parámetros meteorológicos en la propagación de COVID-19 en Nueva Jersey, Estados Unidos, muestra la importancia de factores como la calidad del aire y la humedad en la dinámica de las partículas en suspensión. Sus resultados muestran una correlación positiva entre la calidad del aire, la humedad y los nuevos casos de COVID-19, podrían estar

relacionadas con los mecanismos subyacentes que vinculan las variables meteorológicas con los niveles de material particulado.

Por otro lado, el estudio de Tai et al. (2010), sobre las correlaciones entre el material particulado fino (PM2.5) y las variables meteorológicas en los Estados Unidos brinda una perspectiva valiosa sobre los predictores claves de la variabilidad del PM2.5. Sus hallazgos resaltan la importancia de factores como la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la circulación atmosférica. Estos resultados respaldan nuestras observaciones y sugieren la necesidad de incorporar estas variables en posteriores estudios para obtener informaciones más precisas sobre los niveles de PM2.5.

Si bien nuestros resultados son relevantes, es importante reconocer que la dinámica del material particulado y su interacción con los parámetros meteorológicos es un fenómeno complejo y de dinámica no lineal. Factores adicionales, como las emisiones antropogénicas, la topografía local y los patrones de circulación atmosférica a gran escala, pueden desempeñar un papel preponderante y requerirán una investigación más profunda.

#### **4.2. Caracterización fisicoquímica del material particulado**

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del material particulado se obtuvieron mediante el uso del microscopio electrónico de barrido de mesa JCM-7000. Este equipo tiene incorporado un sistema (EDS) que proporcionó información valiosa sobre la composición elemental de las partículas PM2.5 y PM10 presentes en el aire de la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020. Además, permitió observar la morfología de las partículas, ofreciendo así una caracterización completa.

#### 4.2.1. Concentración de material particulado en los filtros seleccionados para la caracterización fisicoquímica

**Tabla 5**

*Concentración de material particulado PM2.5 y PM10 en los filtros seleccionados para la caracterización*

<b>ID</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tipo de material particulado</b>	<b>Código de filtro</b>	<b>Concentración del material particulado (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
S1	6/01/2017	PM2.5	22	34.47
	11/05/2017	PM10	31	54.88
S2	31/07/2017	PM2.5	42	158.54
	5/08/2017	PM10	46	160.37
S3	7/09/2017	PM2.5	54	74.51
	27/01/2020	PM2.5	194	47.38
	26/06/2020	PM2.5	237	57.84
	7/07/2017	PM10	37	81.35
	12/09/2017	PM10	57	92
	18/02/2020	PM10	202	73.54
	17/12/2020	PM10	268	29.97
S4	25/12/2017	PM2.5	87	76.16
	19/12/2017	PM10	83	75.54
S5	29/12/2017	PM2.5	90	85.58
	2/01/2018	PM10	94	75.64
S6	8/01/2018	PM2.5	98	120.48
	11/01/2018	PM10	101	99.44
S7	2/02/2018	PM2.5	118	49.19
	25/01/2018	PM10	110	39.5
S9	8/03/2018	PM2.5	131	28.97
	14/03/2018	PM10	137	26.72
S10	28/03/2018	PM2.5	149	73.22
	24/03/2018	PM10	145	54.3
S11	5/04/2018	PM2.5	151	84.49
	11/04/2018	PM10	155	64.9
S12	23/04/2018	PM2.5	163	136.17
	19/04/2018	PM10	159	103.92
S13	11/05/2018	PM2.5	168	105.9
	27/05/2018	PM10	174	58.38
S14	18/08/2018	PM2.5	189	142.74
	20/06/2018	PM10	181	63.11
S15	14/05/2020	PM2.5	214	27.97

Los datos presentados en la Tabla 5 representan muestras con valores de concentración de material particulado totalmente heterogéneas, confirmando que la concentración de material particulado es dependiente de la distribución geográfica y sus influencias cercanas de transporte vehicular (Dutta y Chavalparit, 2023). Cabe aclarar que, para la caracterización por sitios de monitoreo, se consideró que el sitio de monitoreo S8, al estar ubicado a menos de 20 metros del sitio S7, pertenece al mismo grupo de caracterización que el sitio S7.

#### **4.2.2. Caracterización de filtro blanco**

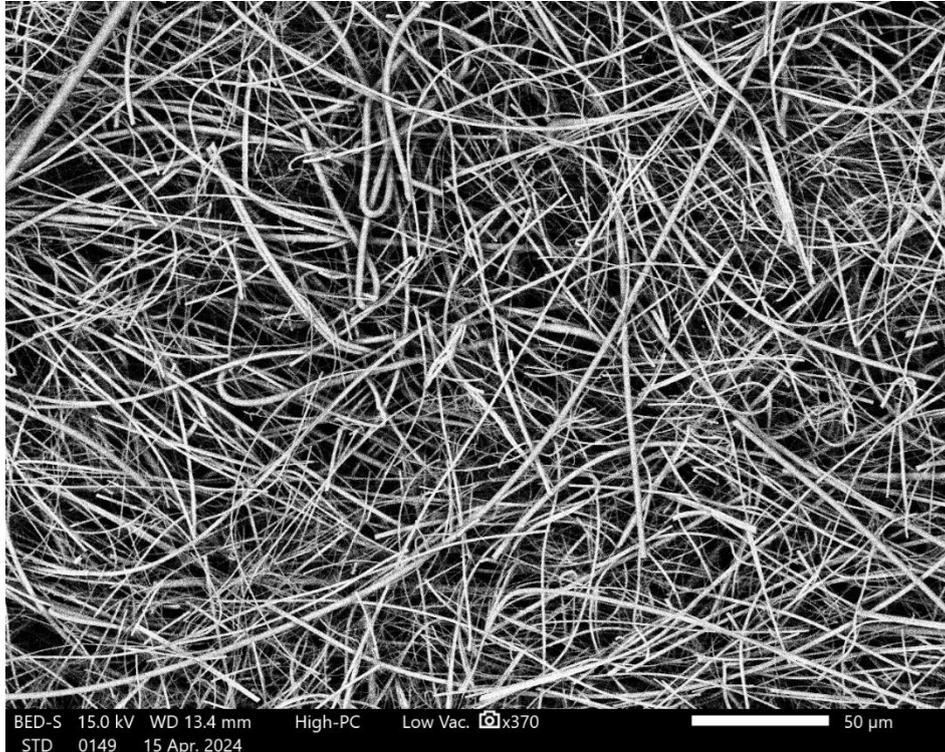
Antes de analizar los filtros con muestras de material particulado, es fundamental establecer una línea base caracterizando un filtro de cuarzo blanco, un filtro sin exposición previa a partículas o contaminantes atmosféricos. Esta caracterización es esencial para identificar y descartar cualquier elemento o impureza inherente al propio filtro, lo que permitirá una interpretación más precisa de los resultados obtenidos en los filtros con muestras.

La Figura 9 muestra una imagen representativa obtenida mediante microscopía electrónica de barrido del filtro de cuarzo blanco. Esta imagen revela la morfología y estructura superficial del filtro sin ninguna deposición de partículas externas.

Se aprecia que el filtro de cuarzo blanco está compuesto por fibras de cuarzo entrelazadas, formando una red porosa, con una notable ausencia de partículas o irregularidades morfológicas. Esta característica es fundamental, ya que cualquier elemento o partícula detectada en los filtros con muestras de material particulado podrá atribuirse exclusivamente a contaminantes atmosféricos, descartando posibles interferencias o contaminaciones inherentes al propio filtro.

## Figura 9

*Filtro de cuarzo blanco sin impurezas*

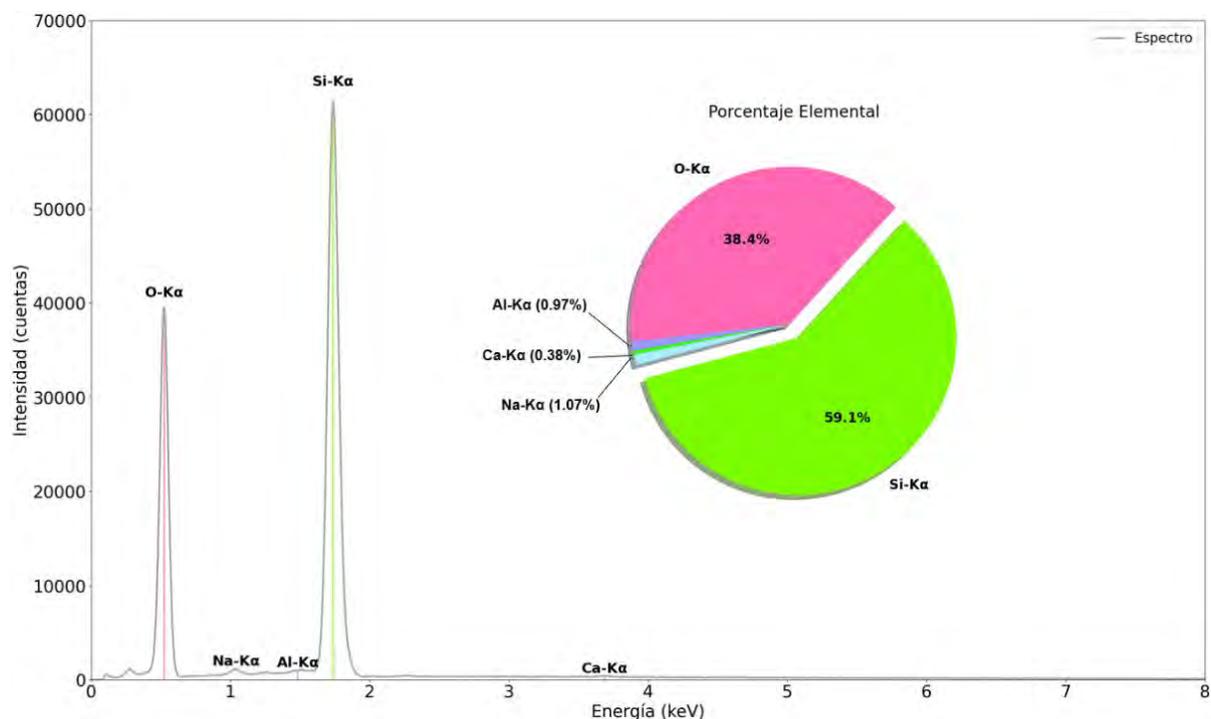


*Nota.* Imagen del filtro de cuarzo sin ninguna impureza tomada por el microscopio electrónico de barrido de mesa JCM-7000 de la marca JEOL.

Además de la observación morfológica, se realizó un análisis de la composición elemental del filtro mediante (EDS) acoplada al microscopio de barrido. Los espectros en la (Figura 10) revelaron mayor presencia de elementos como el silicio (Si), el oxígeno (O), lo cual es consistente con la naturaleza química del cuarzo, el material constituyente de los filtros utilizados. Se encontró también en menor cantidad los elementos de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Aluminio (Al), esto concuerda cercanamente con el estudio realizado por Alberto y Pineda (2020), en su trabajo de investigación que menciona elementos similares en la composición del filtro de cuarzo. Sin embargo, no se detectaron otros elementos significativos en el filtro blanco, lo que confirma su pureza y ausencia de contaminación previa.

**Figura 10**

*Espectro del filtro de cuarzo blanco*



*Nota.* Espectro del filtro blanco y sus elementos abundantes.

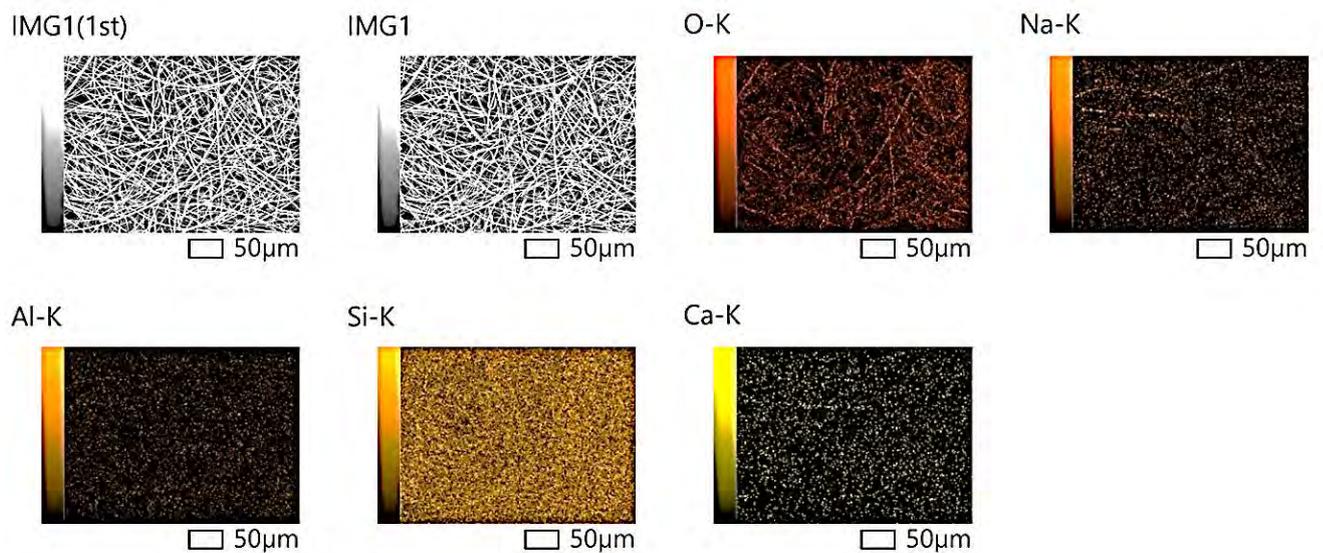
Estos elementos característicos detectados en los espectros del filtro de cuarzo blanco, junto con su análisis detallado, se presentan de manera más clara y precisa en la Figura 11. Esta figura ilustra un mapeo de cada elemento presente en el filtro, proporcionando una visualización que permite comprender mejor la distribución espacial de los elementos en la muestra.

En la imagen superior izquierda IMG1(1st) de la Figura 11, se observa el cuadrante analizado del filtro. Las imágenes restantes muestran mapas de los elementos individuales oxígeno (O), sodio (Na), aluminio (Al), silicio (Si) y calcio (Ca), presentes en la región analizada del filtro. Se puede visualizar la distribución espacial de los elementos en la muestra analizada, distinguiendo partículas de diferente composición. Se aprecian partículas de oxígeno en color rojo, partículas de sodio en naranja,

aluminio en mostaza oscuro, silicio en mostaza claro y calcio en amarillo. Esta visualización muestra que la mayor parte de la composición de la fibra del filtro es silicio.

### Figura 11

*Mapeo elemental del filtro de cuarzo sin contaminantes.*



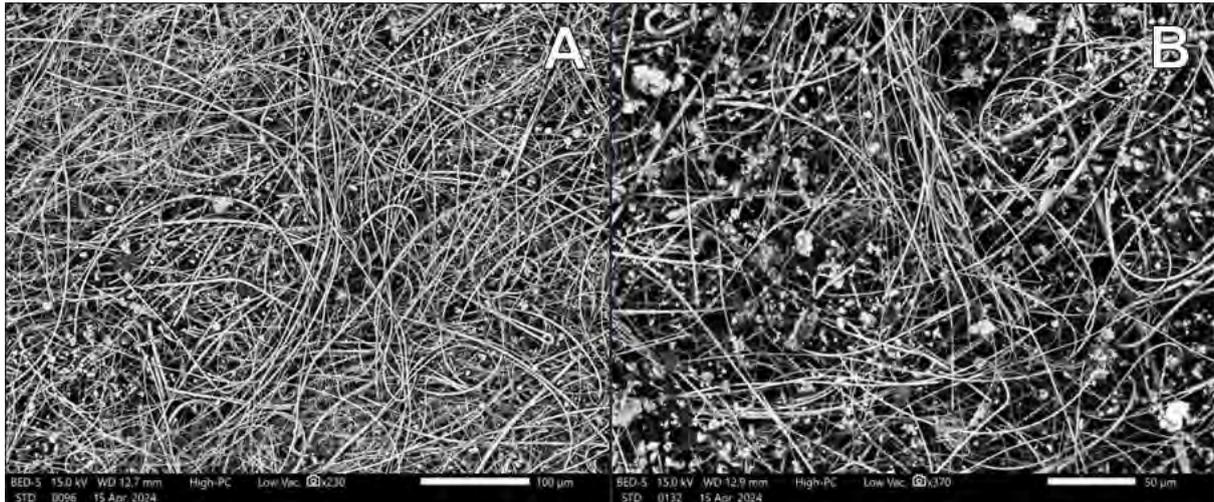
*Nota.* Cada imagen de la distribución de cada elemento del filtro de cuarzo fue generada automáticamente por el Software del Microscopio electrónico de barrido de mesa JCM-7000 de la marca JEOL.

La notación de elementos con su respectiva línea de energía en la Figura 11, como O-K, Na-K, Al-K, Si-K y Ca-K, son las notaciones proporcionadas por el software del equipo JCM-7000. Sin embargo, en el resto del trabajo, se analizaron los espectros individuales utilizando el código elaborado en Python, que emplea una notación diferente para las líneas de energía. En este caso, se utiliza la notación estándar que indica la línea de transición específica de la serie K, como  $K\alpha$ ,  $K\beta$ , etc.

#### 4.2.3. Caracterización del punto de muestreo S1: Campus Universitario, Facultad de Educación.

### Figura 12

*Morfología de las diferentes partículas en los filtros de PM2.5 y PM10 en el sitio de monitoreo S1.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 22 recolectado el 6/01/2017 para PM2.5, y en (B) el filtro 31 recolectado el 11/05/2017 para PM10 en el punto de muestreo S1.

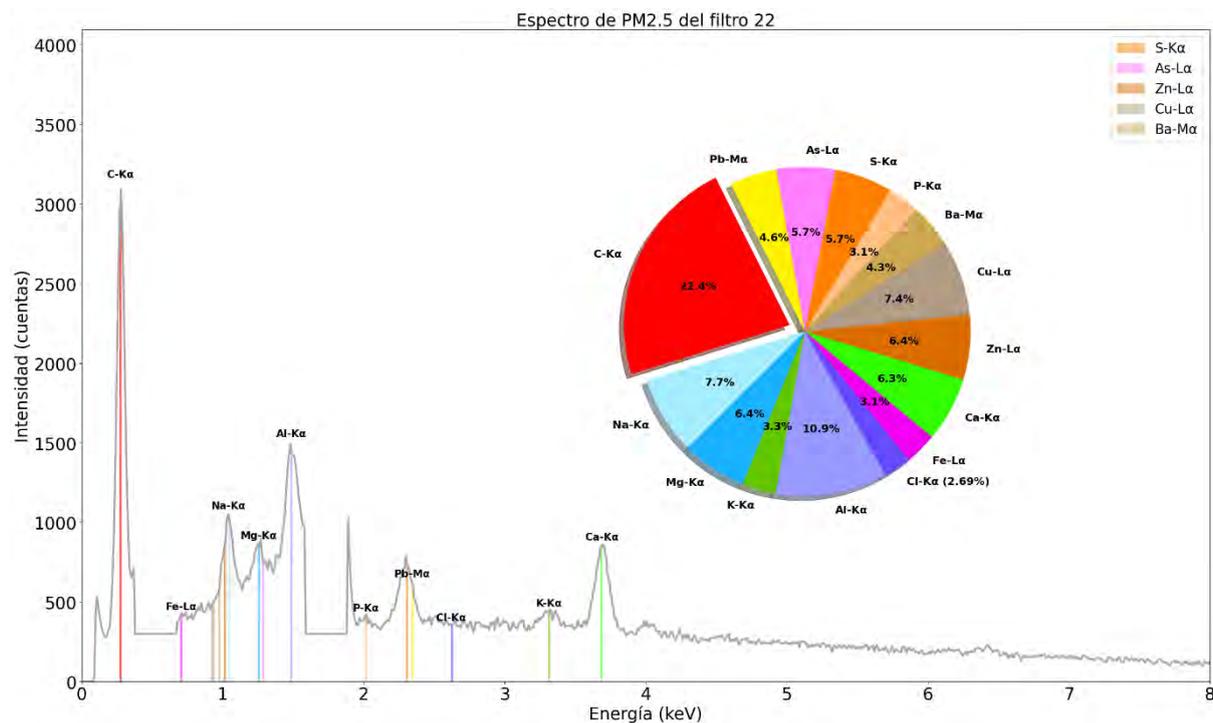
En la figura 12(A), se observa una morfología predominantemente irregular y pequeñas esferas, mientras que en la figura 12(B) se aprecian partículas con una morfología irregular y esférica pequeña. Este tipo de morfología sugiere una mezcla de partículas provenientes de fuentes naturales y antropogénicas. La presencia de partículas pequeñas y esféricas puede ser indicativa de material biogénico, como el polen, que tiende a tener formas irregulares y esféricas (Tello et al., 2016). Por otro lado, la presencia de partículas irregulares sugiere contribuciones de fuentes antropogénicas, como emisiones industriales o de vehículos.

Estos resultados que muestran la presencia de partículas pequeñas y esféricas podrían relacionarse con emisiones vehiculares y tipos de combustibles (Goel et al., 2020; Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018). La morfología irregular observada en ambas figuras también puede estar asociada con partículas provenientes del suelo, corteza local o procesos de combustión, como se ha documentado previamente en estudios similares (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.3.1. Caracterización elemental de PM<sub>2.5</sub> del punto de muestreo S1 del año 2017 (Código de Filtro: 22)

**Figura 13**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 22 de PM<sub>2.5</sub> en el sitio de monitoreo S1.*



*Nota.* Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral del material particulado recolectado en el filtro 22 el 6/01/2017 para PM<sub>2.5</sub> en el punto de muestreo S1.

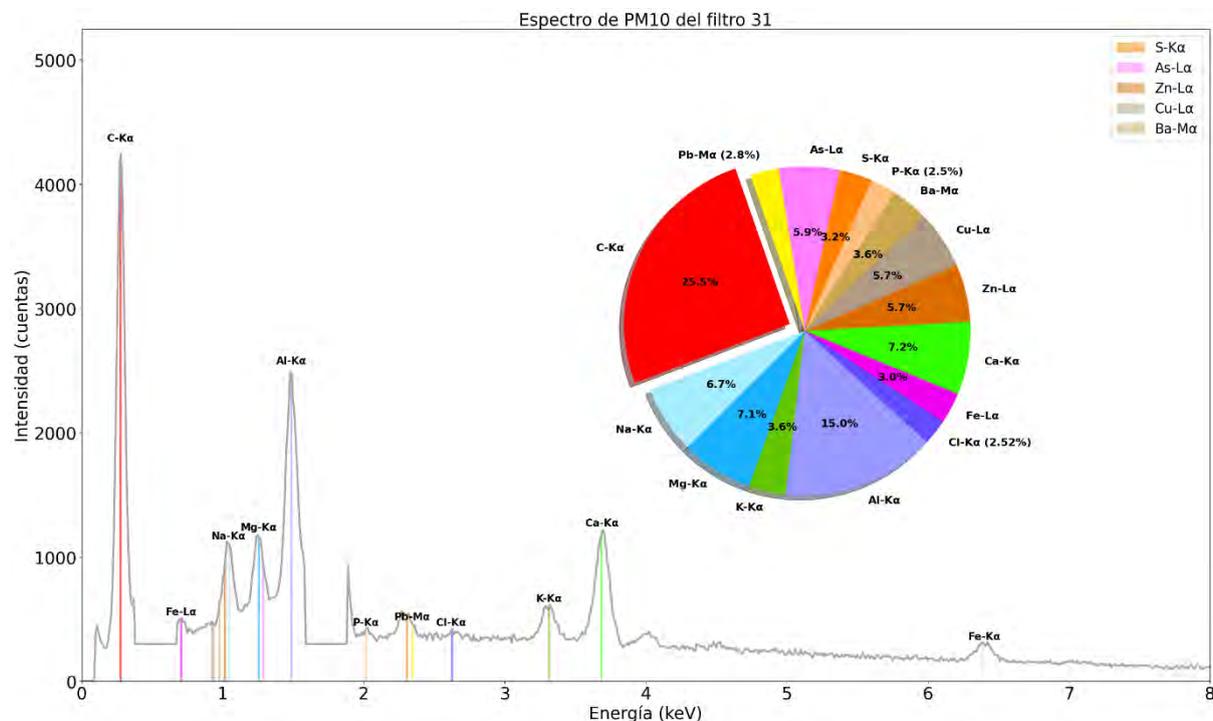
La caracterización elemental del material particulado PM2.5 recolectado en el Campus Universitario, Facultad de Educación (S1) en el año 2017 reveló una composición compleja con una amplia gama de elementos. En total, se identificaron quince elementos diferentes en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos presentes en mayor porcentaje fueron el Carbono (C) con un 22.44%, el Aluminio (Al) con un 10.91% y el Sodio (Na) con un 7.68%. Por otro lado, los tres elementos con menor porcentaje fueron el Cloro (Cl) con un 2.69%, el Fósforo (P) con un 3.10% y el Potasio (K) con un 3.29%.

#### 4.2.3.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S1 del año 2017

(Código de Filtro: 31)

**Figura 14**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 31 de PM10 en el sitio de monitoreo campus universitario, Facultad de Educación, Cusco.*



*Nota.* Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición

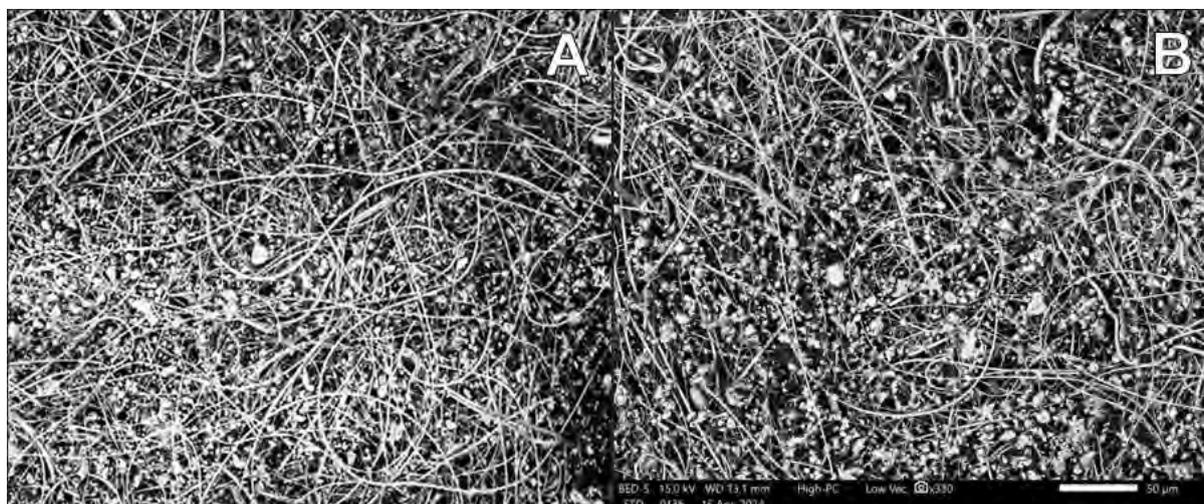
elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas el filtro 31 recolectado el 11/05/2017 para PM10 en el punto de monitoreo campus universitario, Facultad de Educación, Cusco.

El análisis elemental del material particulado PM10 recogido en el Campus Universitario, Facultad de Educación (S1) en el año 2017 para el filtro 31, mostró una composición amplia de elementos. En total, se identificaron quince elementos diferentes en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 25.50%, el Aluminio (Al) con un 15.04% y el Calcio (Ca) con un 7.16%. En contraste, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.52%, el Fósforo (P) con un 2.50% y el Hierro (Fe) con un 3.04%, lo que indica una considerable diversidad de materiales presentes en el aire.

#### 4.2.4. Caracterización del punto de muestreo S2: San Sebastián, APV Paraiso de Fátima.

### Figura 15

*Morfología de las diferentes partículas en los filtros de PM2.5 y PM10 en el sitio de monitoreo S2.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 42 recolectado el 31/07/2017 para PM2.5, y en (B) el filtro 46 recolectado el 5/08/2017 para PM10 en el punto de muestreo S2, ubicado en el distrito de San Sebastián, APV Paraiso de Fátima.

En la figura 15(A), se observa una morfología que incluye partículas grandes y pequeñas con formas irregulares y esféricas, mientras que la figura 15(B) muestra partículas con una morfología predominantemente irregular y esférica pequeña. Esta variedad morfológica indica una mezcla de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas grandes e irregulares podrían provenir de fuentes como el suelo y la corteza local, así como de procesos de combustión (Goel et al., 2020). Las partículas pequeñas y esféricas, por otro lado, son características de emisiones vehiculares y tipos de combustibles, así como de , resuspensión de suelos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018; Goel et al., 2020).

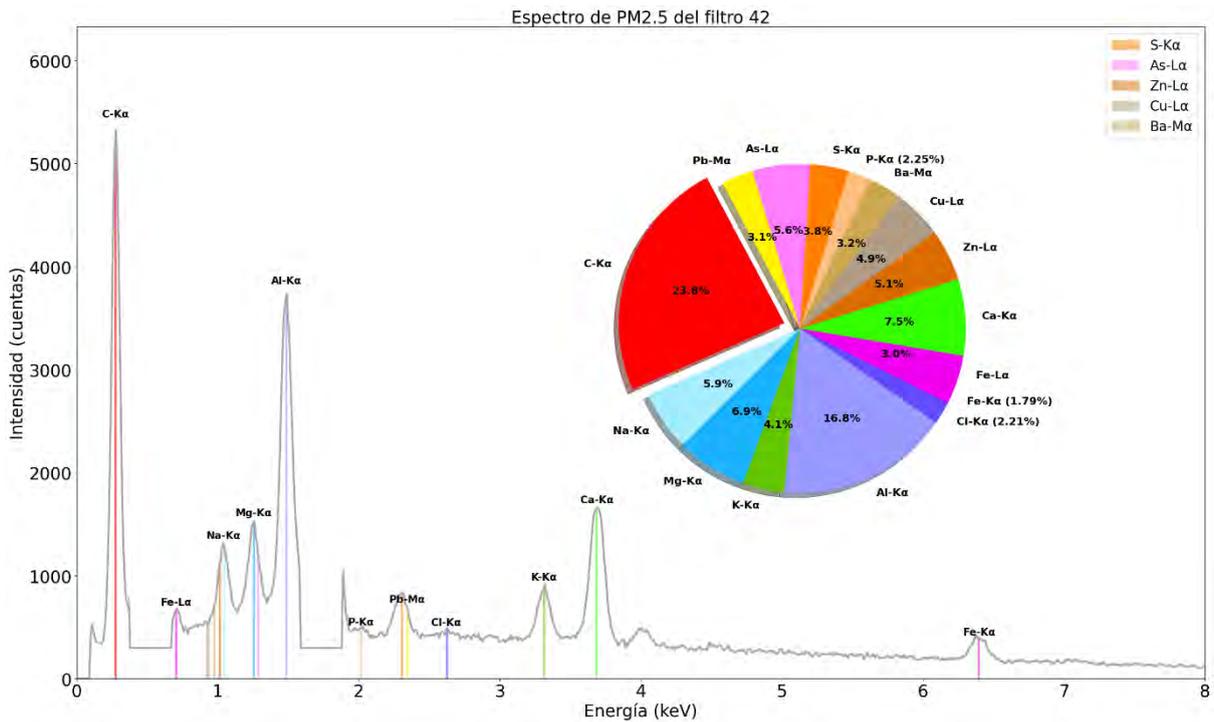
La morfología irregular observada en ambas figuras podría estar asociada con partículas provenientes de erosión del suelo y procesos industriales, que son fuentes naturales y antropogénicas documentadas en la literatura (Satsangi y Yadav, 2014). La presencia de partículas pequeñas y esféricas, tanto en PM2.5 como en PM10, sugiere contribuciones de emisiones vehiculares y combustión de combustibles fósiles, lo que es consistente con estudios previos (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020).

#### 4.2.4.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S2 del año 2017

(Código de Filtro: 42)

Figura 16

Composición elemental y análisis espectral del filtro 42 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Paraiso de Fátima, San Sebastián.



Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 42 el 31/07/2017 para PM2.5 en el punto de muestreo Paraiso de Fátima, San Sebastián.

El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en el punto de monitoreo APV Paraiso de Fátima, en San Sebastián (S2), en el año 2017, correspondiente al filtro 42, reveló una composición diversa de elementos. En total, se detectaron quince elementos diferentes en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 23.82%, el Aluminio (Al) con un 16.82%, y el Calcio (Ca) con un 7.51%.

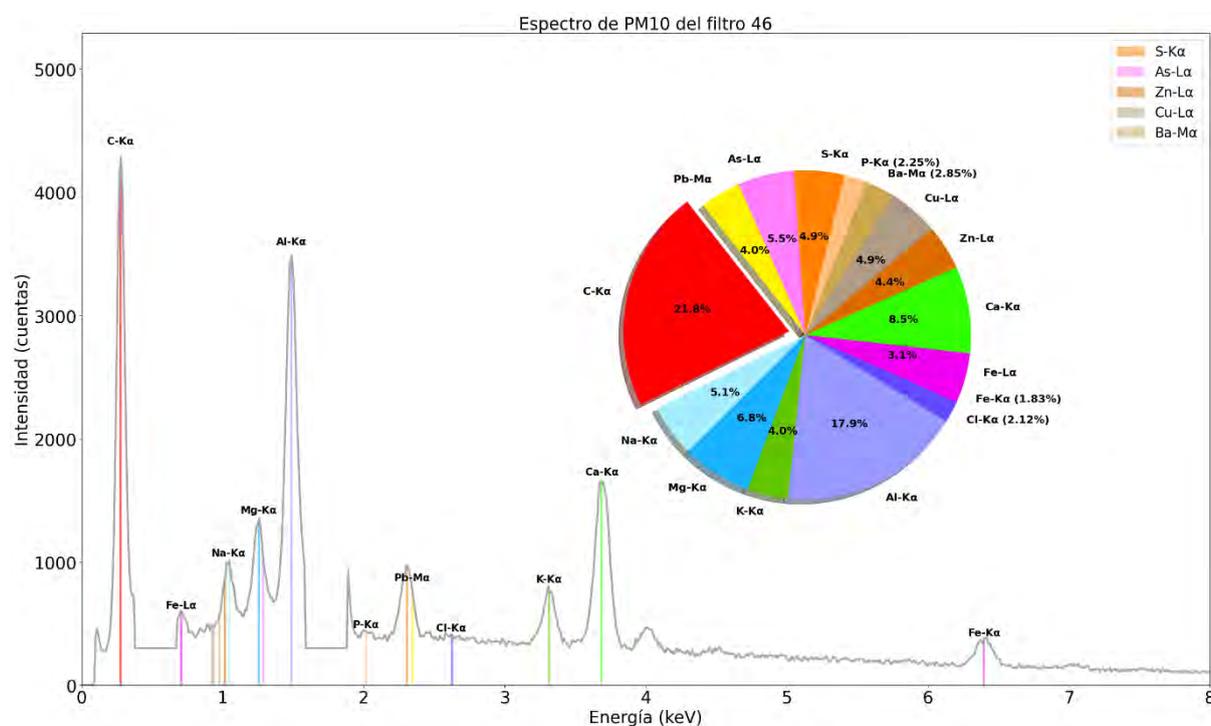
En contraste, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.21%, el Fósforo (P) con un 2.25%, y el Hierro (Fe) con un 1.79%, lo que indica una considerable diversidad de materiales presentes en el PM que se encuentra en el aire.

#### 4.2.4.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S2 del año 2017

(Código de Filtro: 46)

**Figura 17**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 46 de PM10 en el sitio de monitoreo APV Paraiso de Fátima, San Sebastián.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 46 el 5/08/2017 para PM10 en el punto de muestreo APV Paraiso de Fátima, San Sebastián.*

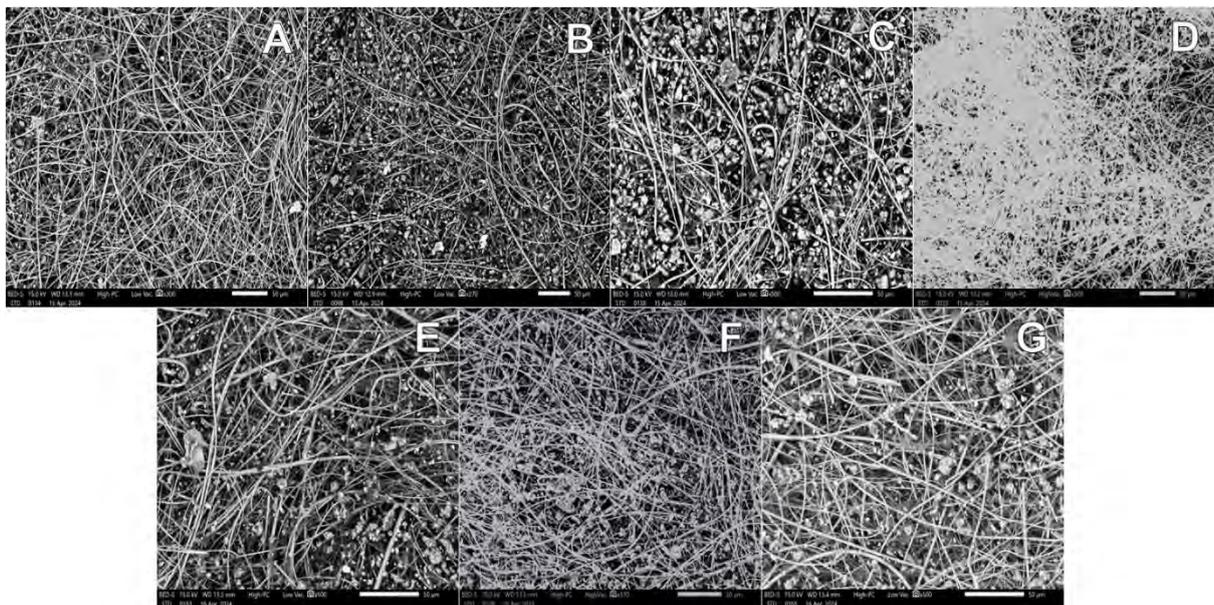
El análisis elemental del material particulado PM10 recogido en el punto de monitoreo APV Paraiso de Fátima, en San Sebastián (S2), en el año 2017, correspondiente al filtro 46, mostró una composición variada de elementos. Se

identificaron quince elementos diferentes en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 21.78%, el Aluminio (Al) con un 17.86%, y el Calcio (Ca) con un 8.52%. Los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.12%, el Fósforo (P) con un 2.25%, y el Hierro (Fe) con un 1.83%, lo que indica una considerable diversidad de materiales presentes en el PM que contamina el aire.

#### 4.2.5. Caracterización del punto de muestreo S3: Campus Universitario, puerta número 05 (Multired).

### Figura 18

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S3.*



*Nota.* Las imágenes SEM-EDX muestran la morfología de las partículas recolectadas en los filtros de cuarzo para el punto de muestreo S3 en los años 2017 y 2020. (A) Imagen SEM-EDX del filtro 37 recolectado el 12/09/2017 para PM10. (B) Imagen SEM-EDX del filtro 54 recolectado el 07/09/2017 para PM2.5. (C) Imagen SEM-EDX del filtro 57 recolectado el 12/09/2017 para PM10. (D) Imagen SEM-EDX del filtro 194 recolectado el 27/01/2020 para PM2.5. (E) Imagen SEM-EDX del filtro 202 recolectado el 18/02/2020 para PM10 (F)

Imagen SEM-EDX del filtro 237 recolectado el 26/06/2020 para PM2.5. (G) Imagen SEM-EDX del filtro 268 recolectado el 17/12/2020 para PM10.

En la figura 18(A), se observa una morfología predominante irregular, con partículas esféricas pequeñas y formas de láminas irregulares con extremos afilados. Este tipo de morfología es indicativa de una mezcla de fuentes, tanto naturales como antropogénicas. Las partículas esféricas pequeñas pueden provenir de emisiones vehiculares y combustión de combustibles (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las formas de láminas irregulares con extremos afilados podrían estar asociadas a emisiones vehiculares y el mantenimiento de carreteras (Bora et al., 2021).

En la figura 18(B), la presencia de partículas irregulares y esféricas pequeñas sugiere contribuciones de fuentes biogénicas y antropogénicas, como polen y emisiones vehiculares (Telloli et al., 2016; Zeb et al., 2018). La figura 18(C) también muestra una mezcla de morfologías irregulares y esféricas, apuntando hacia fuentes provenientes de suelo local y procesos de combustión (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020).

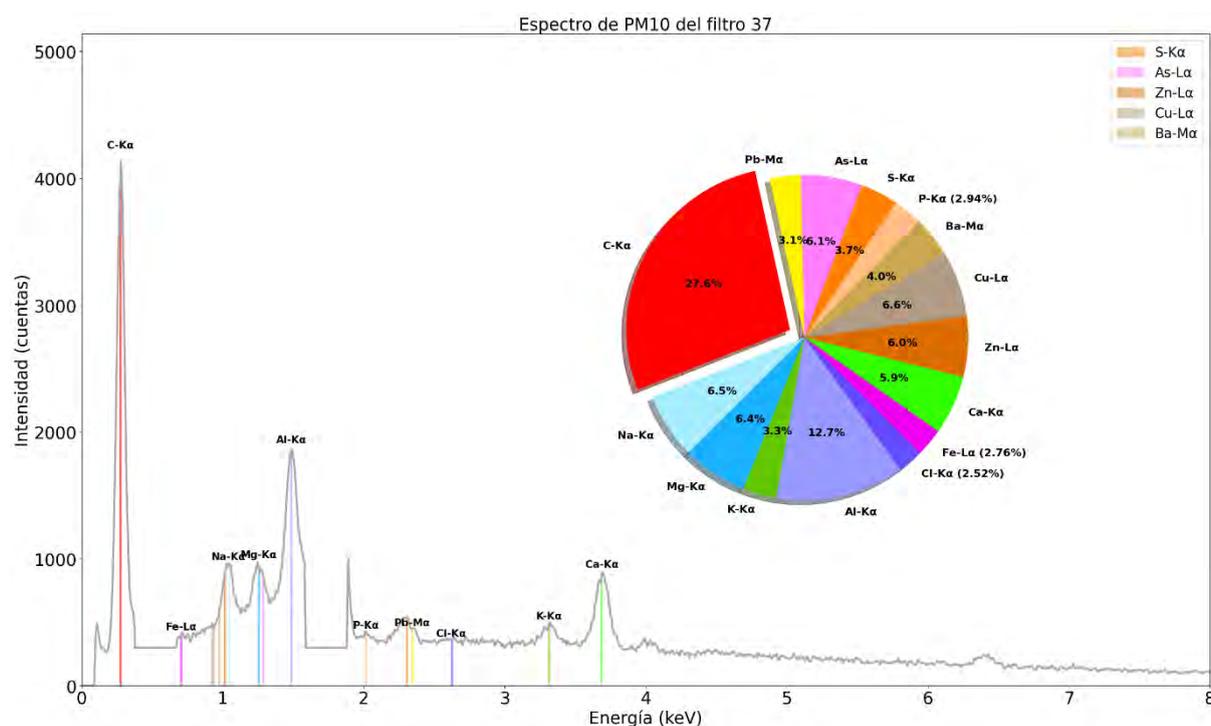
La figura 18(E) revela una combinación de morfologías irregulares, esféricas e irregulares en forma de lámina con bordes afilados, lo que puede ser indicativo de emisiones industriales y vehiculares (Bora et al., 2021). Las figuras 18(F) y 18(G), que muestran partículas irregulares, sugieren una fuerte influencia de fuentes naturales como la erosión del suelo y el polvo local (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.5.1. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2017

(Código de Filtro: 37)

**Figura 19**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 37 de PM10 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 37 el 7/07/2017 para PM10 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*

El análisis elemental de la muestra de material particulado PM10 recolectada en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) en el año 2017, correspondiente al filtro 37, reveló una composición diversa de elementos. En total, se identificaron quince elementos distintos en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono

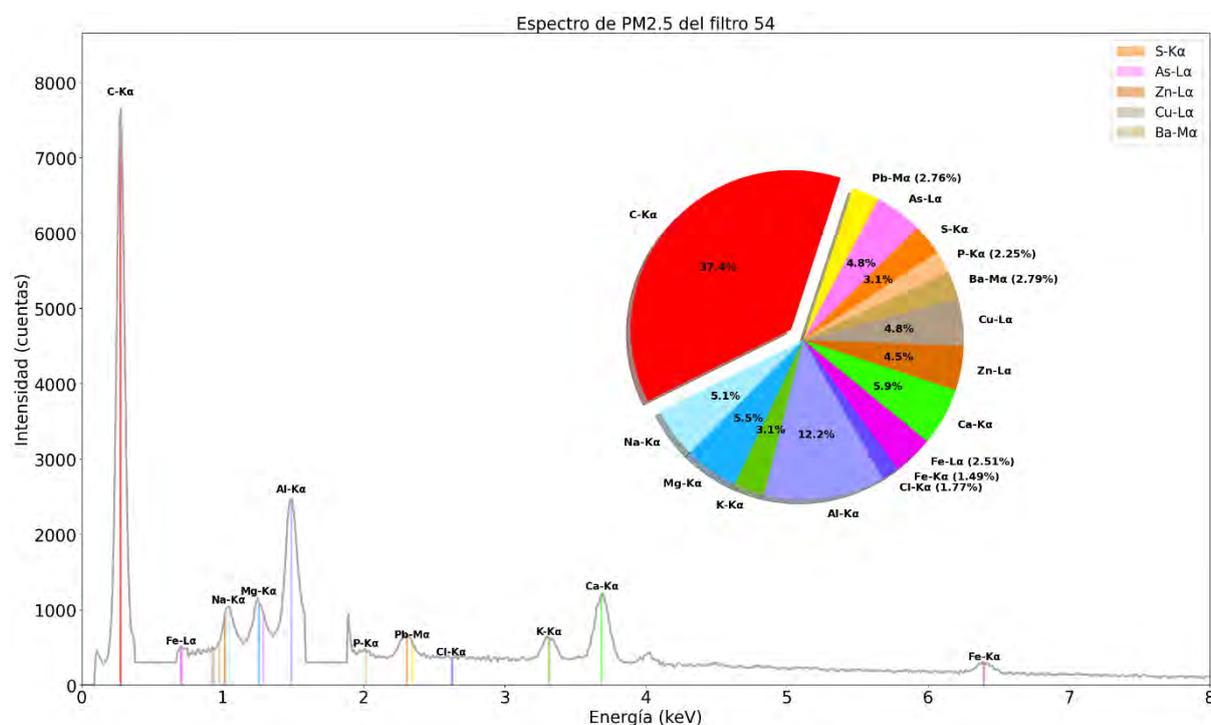
(C) con un 27.56%, el Aluminio (Al) con un 12.70% y el Magnesio (Mg) con un 6.43%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.52%, el Fósforo (P) con un 2.94% y el Plomo (Pb) con un 3.07%, lo que indica una considerable variedad de materiales presentes en el aire.

#### 4.2.5.2. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S3 del año 2017

(Código de Filtro: 54)

**Figura 20**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 54 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 54 el 7/09/2017 para PM2.5 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*

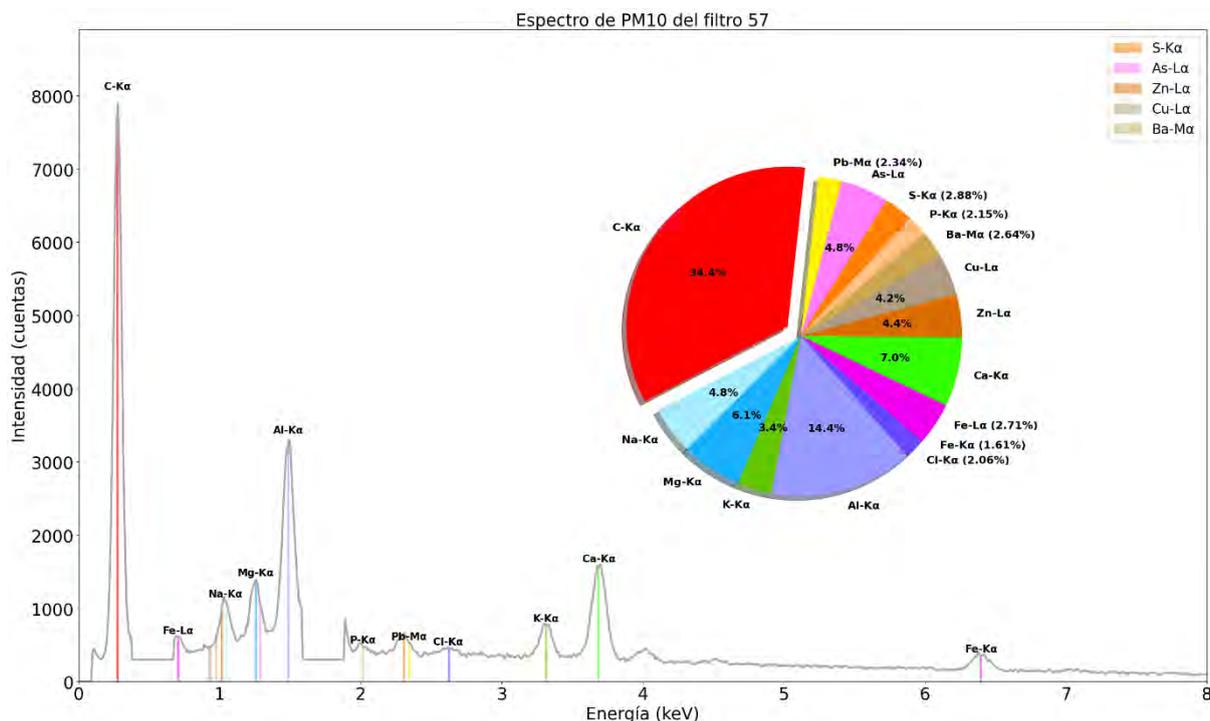
El análisis elemental de la muestra de material particulado PM2.5 recolectada en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) (S3) en el año 2017,

correspondiente al filtro 54, mostró una composición variada de elementos. Se identificaron quince elementos diferentes en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 37.37%, el Aluminio (Al) con un 12.18% y el Sodio (Na) con un 5.13%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 1.77%, el Hierro (Fe) con un 1.49% y el Plomo (Pb) con un 2.76%.

#### 4.2.5.3. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2017 (Código de Filtro: 57)

**Figura 21**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 57 de PM10 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 57 el 12/09/2017 para PM10 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired),*

Cusco.

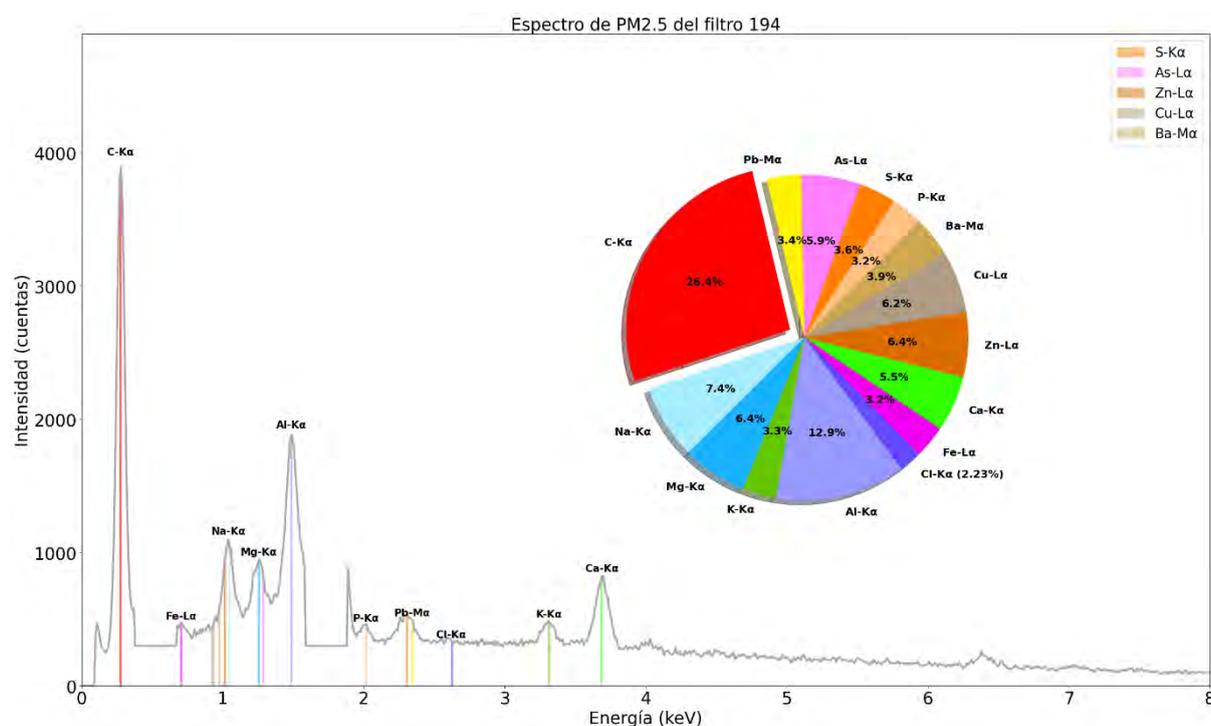
El análisis elemental de la muestra de material particulado PM10 recolectada en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) (S3) en el año 2017, correspondiente al filtro 57, reveló una composición diversa de elementos. En total, se identificaron quince elementos distintos en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 34.42%, el Aluminio (Al) con un 14.40% y el Magnesio (Mg) con un 6.12%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.06%, el Fósforo (P) con un 2.15% y el Hierro (Fe) con un 1.61%.

#### 4.2.5.4. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S3 del año 2020

(Código de Filtro: 194)

Figura 22

Composición elemental y análisis espectral del filtro 194 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 194 el 27/01/2020 para PM2.5 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*

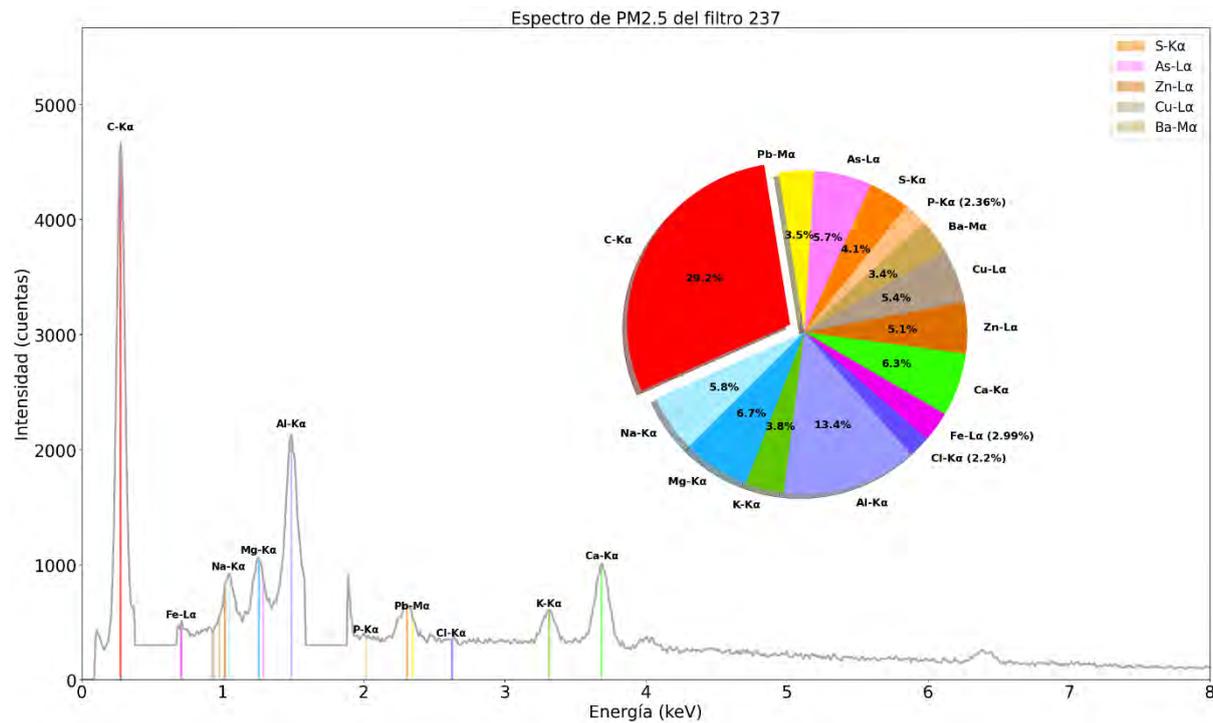
El análisis elemental de la muestra de material particulado PM2.5 recolectada en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) (S3) en el año 2020, correspondiente al filtro 194. Se identificaron quince elementos diferentes en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 26.40%, el Aluminio (Al) con un 12.85% y el Sodio (Na) con un 7.38%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.23%, el Hierro (Fe) con un 3.24% y el Plomo (Pb) con un 3.40%.

#### 4.2.5.5. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S3 del año 2020

(Código de Filtro: 237)

**Figura 23**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 237 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 237 el 26/06/2020 para PM2.5 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*

El análisis elemental de la muestra de material particulado PM2.5 recolectada en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) (S3) en el año 2020, correspondiente al filtro 237. En total, se identificaron quince elementos distintos en la muestra (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 29.16%, el Aluminio (Al) con un

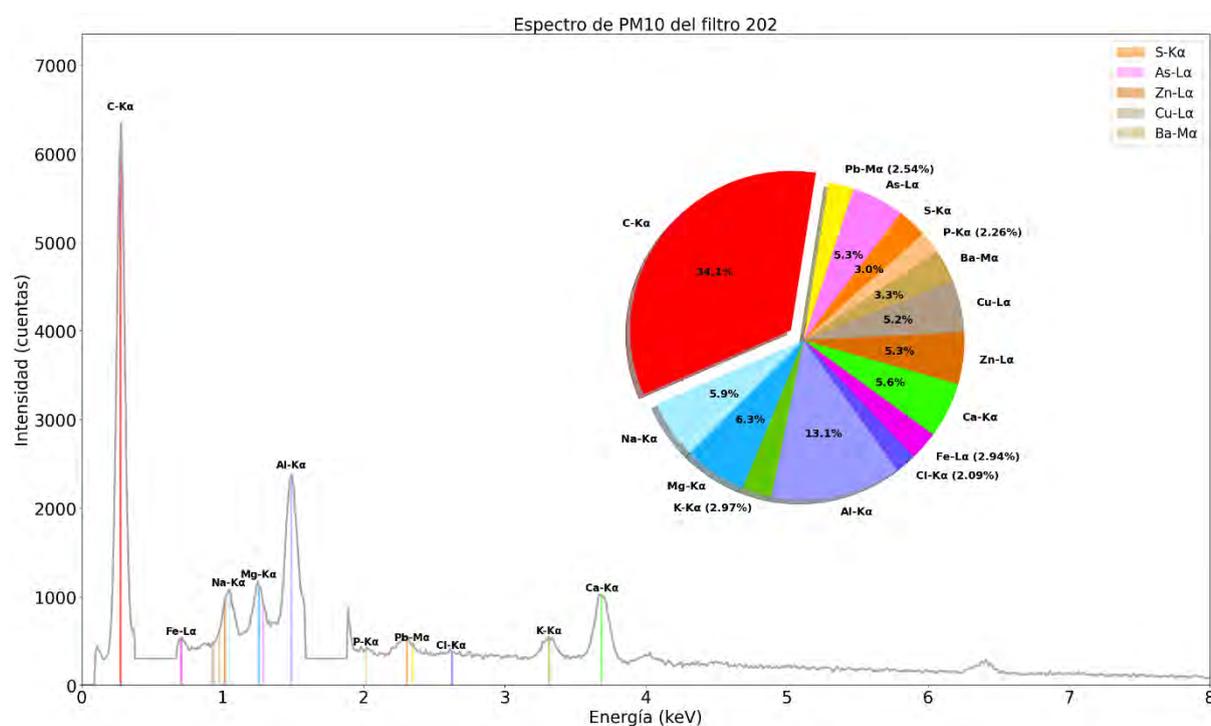
13.41% y el Magnesio (Mg) con un 6.65%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.20%, el Fósforo (P) con un 2.36% y el Hierro (Fe) con un 2.99%.

#### 4.2.5.6. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2020

(Código de Filtro: 202)

**Figura 24**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 202 de PM10 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 202 el 18/02/2020 para PM10 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*

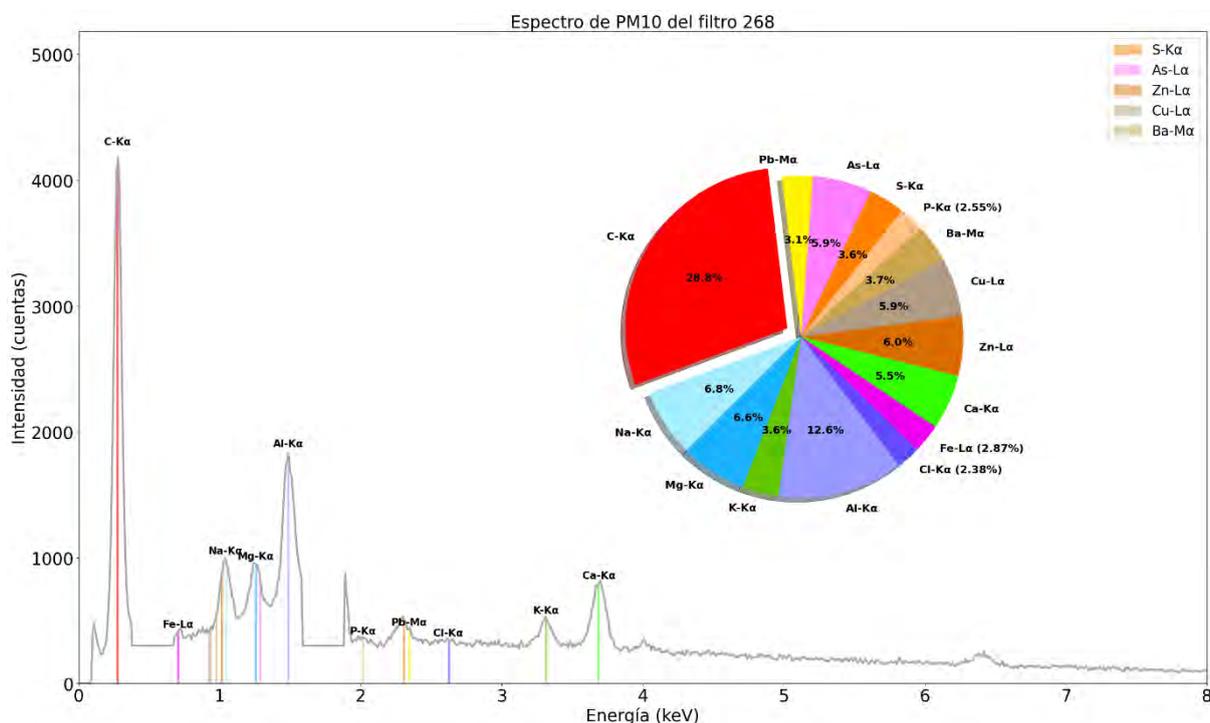
El análisis elemental de la muestra de material particulado PM10 recolectada

en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) (S3) en el año 2020, correspondiente al filtro 202. Se identificaron (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 34.05%, el Aluminio (Al) con un 13.09% y el Magnesio (Mg) con un 6.32%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.09%, el Plomo (Pb) con un 2.54% y el Fósforo (P) con un 2.26%.

#### 4.2.5.7. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S3 del año 2020 (Código de Filtro: 268)

**Figura 25**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 268 de PM10 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 268 el 17/12/2020 para PM10 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 05 (multired),*

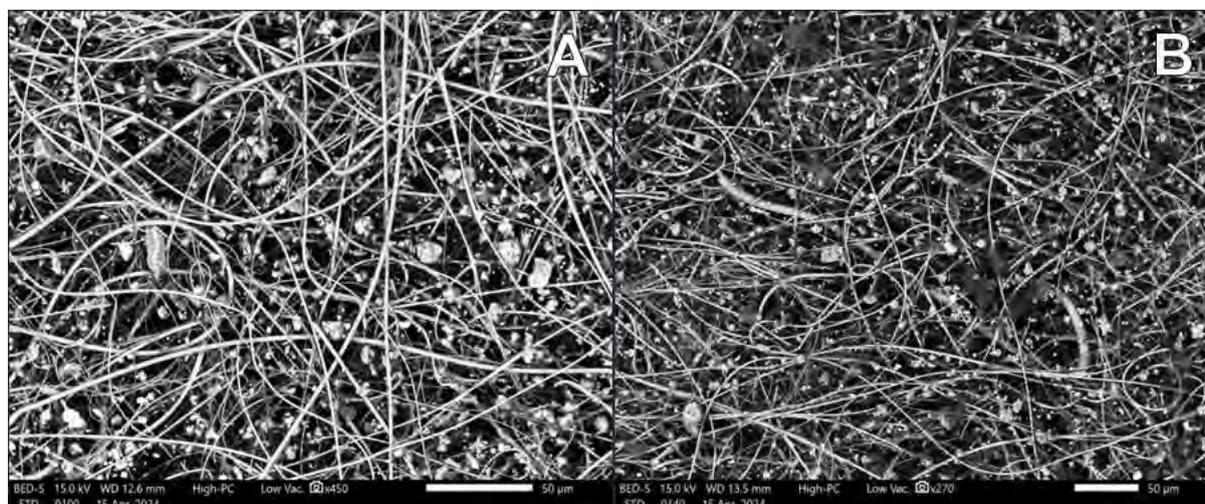
Cusco.

El análisis elemental de la muestra de material particulado PM10 recolectada en el Campus Universitario, puerta número 05 (multired) (S3) en el año 2020, correspondiente al filtro 268. Se identificaron (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos en mayor proporción fueron el Carbono (C) con un 28.78%, el Aluminio (Al) con un 12.56% y el Sodio (Na) con un 6.80%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 2.38%, el Fósforo (P) con un 2.55% y el Hierro (Fe) con un 2.87%.

#### 4.2.6. Caracterización del punto de muestreo S4: Colegio Clorinda Matto de Turner.

### Figura 26

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S4.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 87 recolectado el 25/12/2017 para PM2.5, y en (B) el filtro 83 recolectado el 19/12/2017 para PM10 en el punto de muestreo S4, ubicado en el Colegio Clorinda Matto de Turner del distrito de Cusco.

En la figura 26(A), se observa una morfología predominantemente irregular, con partículas esféricas y formas de láminas irregulares. Este tipo de morfología sugiere una mezcla de partículas provenientes de diversas fuentes. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y de combustibles fósiles, mientras que las formas de láminas irregulares podrían indicar la presencia de partículas originadas en procesos de mantenimiento de carreteras o emisiones industriales (Bora et al., 2021; Yin et al., 2013).

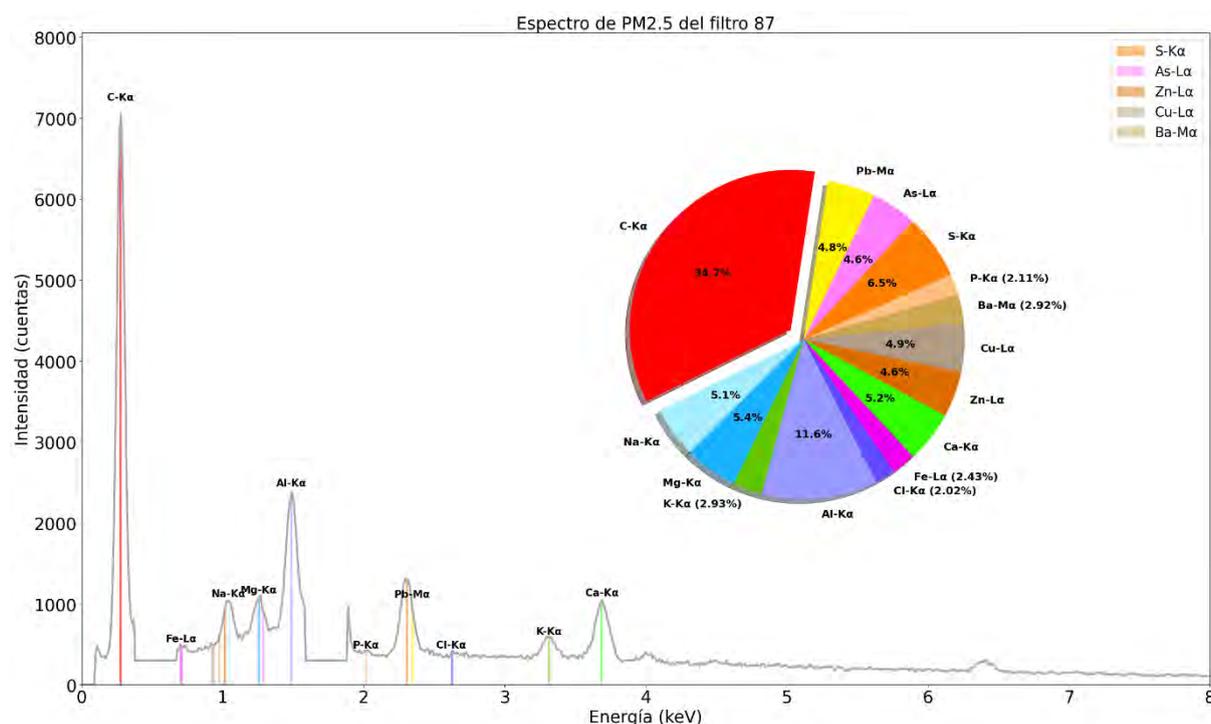
La figura 26(B) muestra partículas irregulares y esféricas, lo que también apunta a una combinación de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de emisiones vehiculares y la quema de combustibles (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían estar asociadas con el polvo del suelo y partículas de origen de corteza local (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.6.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S4 del año 2017

(Código de Filtro: 87)

Figura 27

Composición elemental y análisis espectral del filtro 87 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Colegio Clorinda Matto de Turner, Cusco.



Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 87 el 25/12/2017 para PM2.5 en el punto de muestreo Colegio Clorinda Matto de Turner, Cusco.

El análisis composicional de la muestra de material particulado fino PM2.5 recolectada en el Colegio Clorinda Matto de Turner (S4) en el año 2017, correspondiente al filtro 87, reveló la presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres componentes con mayor concentración fueron el Carbono (C) con un 34.75%, el Aluminio (Al) con un 11.64% y el Azufre (S) con un 6.55%. Por otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un

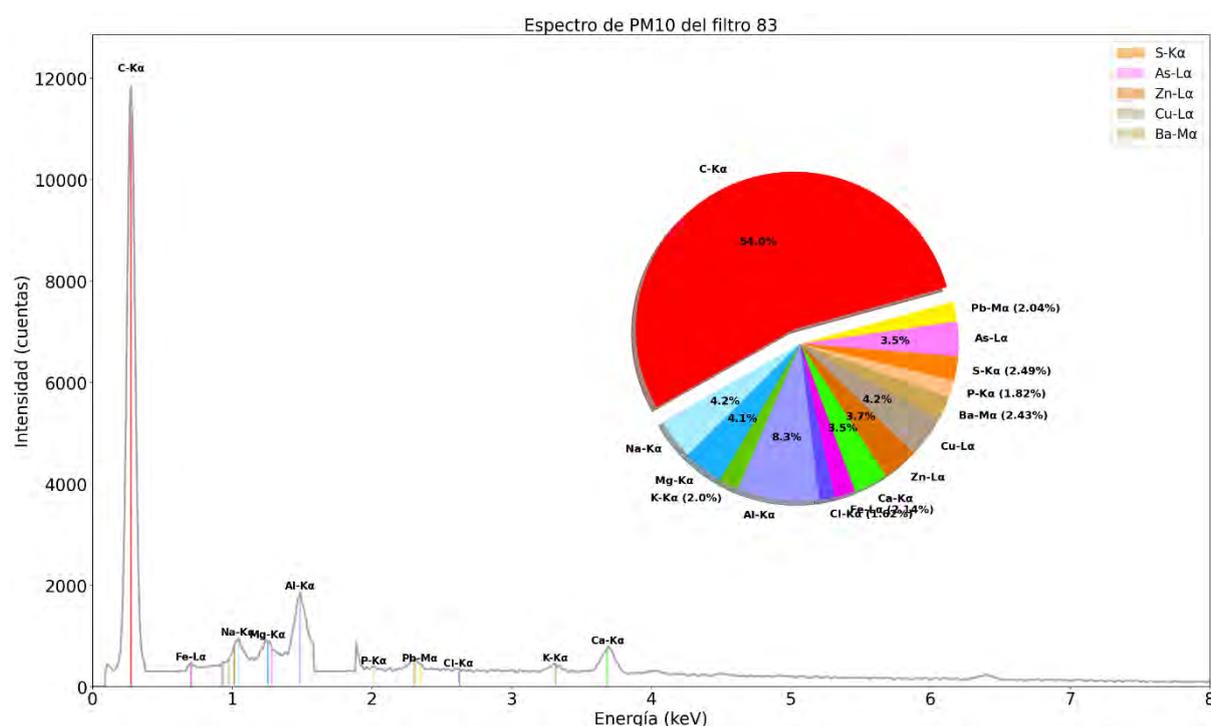
2.02%, el Fósforo (P) con un 2.11% y el Potasio (K) con un 2.93%.

#### 4.2.6.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S4 del año 2017

(Código de Filtro: 83)

**Figura 28**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 83 de PM10 en el sitio de monitoreo Colegio Clorinda Matto de Turner, Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 83 el 19/12/2017 para PM10 en el punto de muestreo Colegio Clorinda Matto de Turner, Cusco.*

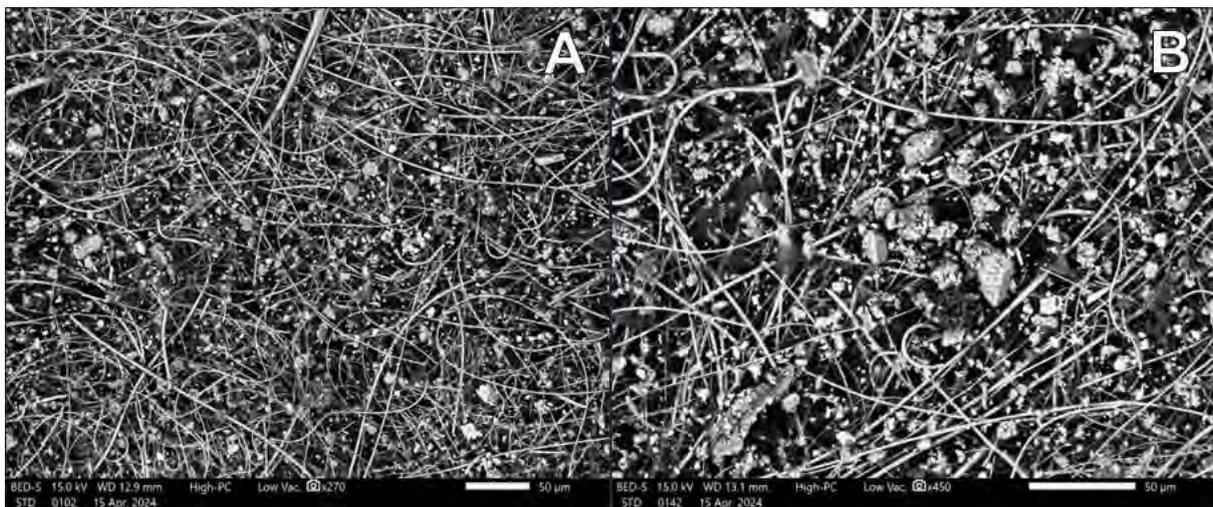
El análisis composicional de la muestra de material particulado grueso PM10 recolectada en el Colegio Clorinda Matto de Turner (S4) en el año 2017, correspondiente al filtro 83, mostró presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres componentes con mayor concentración fueron el Carbono (C) con un 53.97%, el Aluminio (Al) con un 8.31% y el Sodio (Na) con un 4.24%. Por

otro lado, los tres elementos con menor proporción fueron el Cloro (Cl) con un 1.62%, el Fósforo (P) con un 1.82% y el Potasio (K) con un 2.00%.

#### 4.2.7. Caracterización del punto de muestreo S5: Wanchaq, Local del Municipio Distrital.

**Figura 29**

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S5.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 90 recolectado el 29/12/2017 para PM2.5 en el punto de muestreo S5, ubicado en el Local del Municipio Distrital de Wanchaq, y en (B) el filtro 94 recolectado el 2/01/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

En la figura 29(A), se observa una morfología irregular y esférica en las partículas de PM2.5. Este tipo de morfología sugiere una combinación de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas esféricas pueden estar asociadas con emisiones vehiculares y tipos de combustibles (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018; Goel et al., 2020), mientras que las formas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de corteza local y procesos de combustión (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et

al., 2020).

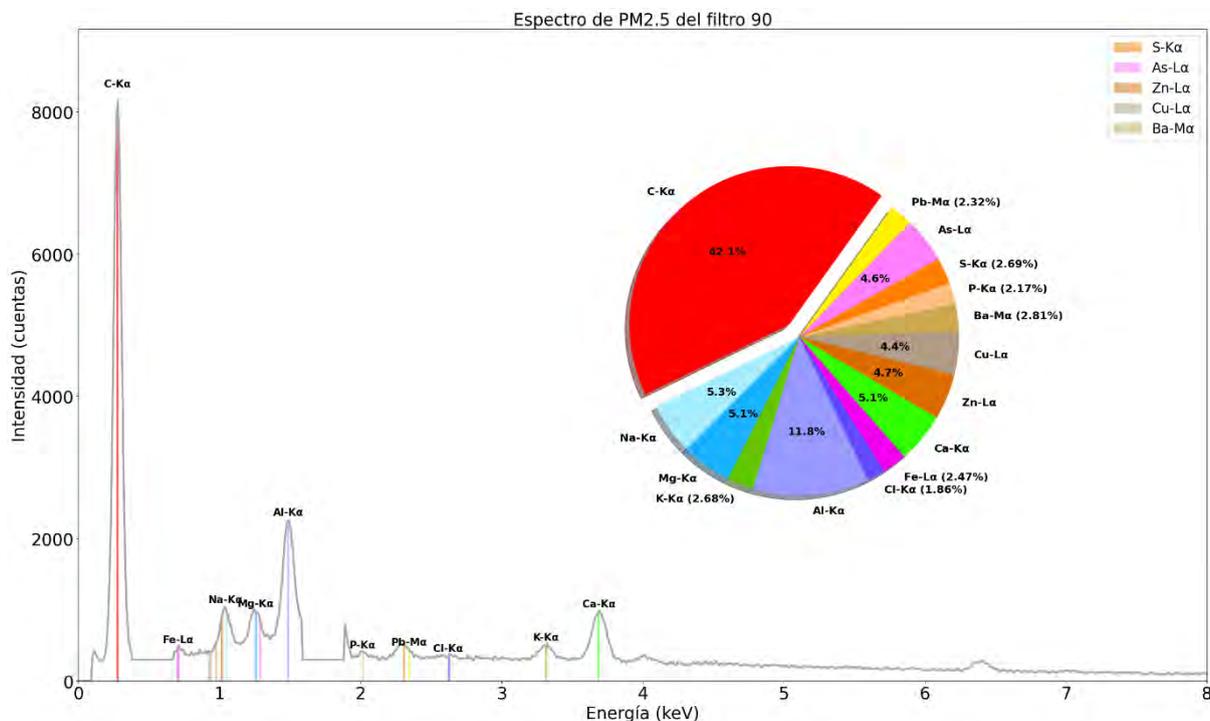
En la figura 29(B), se observan partículas irregulares y esféricas, junto con una partícula esférica porosa. La presencia de partículas esféricas porosas es indicativa de procesos de combustión incompleta y emisiones de fuentes industriales (Bora et al., 2021; Rana et al., 2022). Las partículas irregulares y esféricas podrían ser el resultado de la resuspensión de suelos, la corteza local y proceso de combustión, así como de emisiones vehiculares y procesos industriales (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020).

#### 4.2.7.1. Caracterización de PM<sub>2.5</sub> del punto de muestreo S5 del año 2017

(Código de Filtro: 90)

**Figura 30**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 90 de PM<sub>2.5</sub> en el sitio de monitoreo Local del Municipio Distrital, Wanchaq.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición*

elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 90 el 29/12/2017 para PM2.5 en el punto de muestreo Local del Municipio Distrital, Wanchaq.

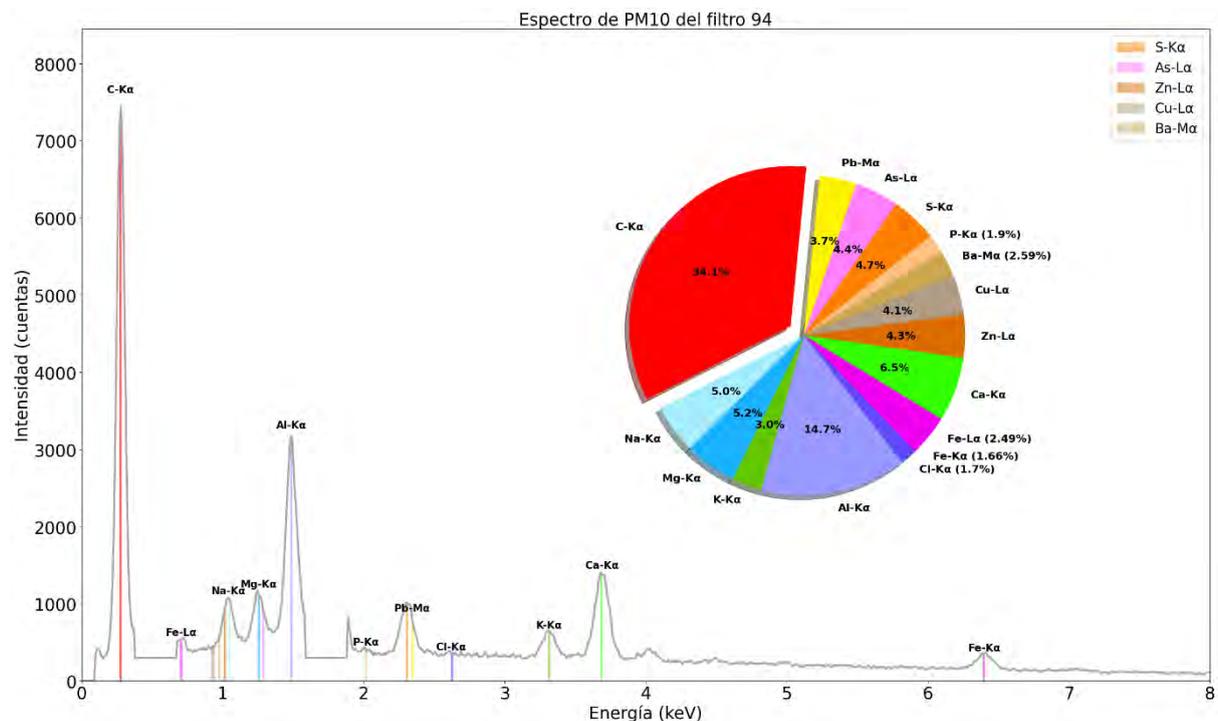
El espectro composicional de la muestra de material particulado fino PM2.5 obtenida en el Local del Municipio Distrital de Wanchaq (S5) en el año 2017, correspondiente al filtro 90, exhibió la presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos con mayor presencia fueron el Carbono (C) con un 42.07%, el Aluminio (Al) con un 11.76% y el Sodio (Na) con un 5.28%. Por otra parte, Los tres elementos con menor abundancia relativa fueron el Cloro (Cl) con un 1.86%, el Fósforo (P) con un 2.17% y el Potasio (K) con un 2.68%.

#### 4.2.7.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S5 del año 2018

(Código de Filtro: 94)

**Figura 31**

Composición elemental y análisis espectral del filtro 94 de PM10 en el sitio de monitoreo Local del Municipio, Wanchaq.



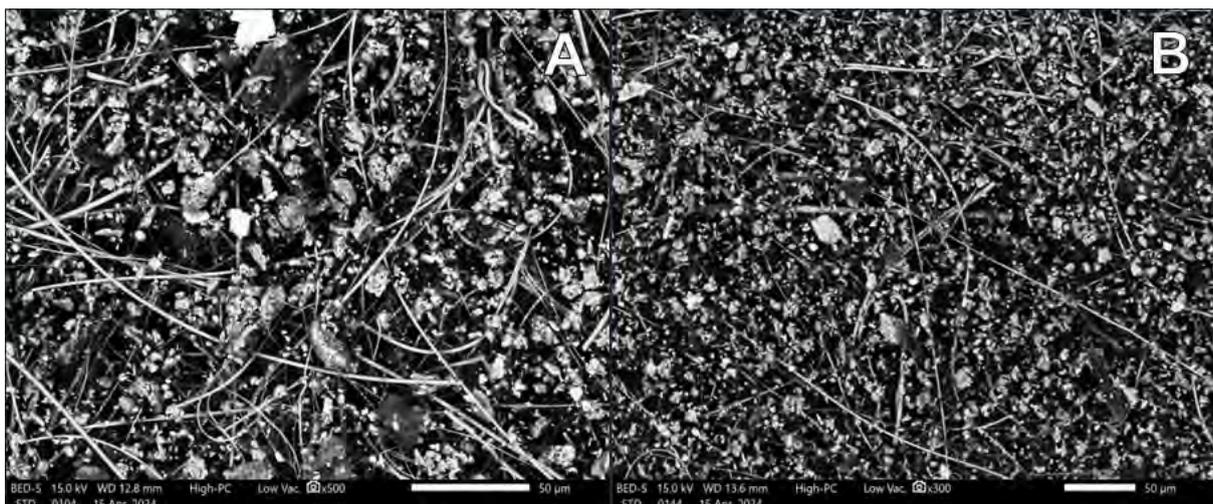
*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 94 el 2/01/2018 para PM10 en el punto de muestreo Local del Municipio, Wanchaq.*

El espectro composicional de la muestra de material particulado grueso PM10 obtenida en el Local del Municipio de Wanchaq (S5) en el año 2018, correspondiente al filtro 94, exhibió la presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos con mayor presencia fueron el Carbono (C) con un 34.08%, el Aluminio (Al) con un 14.67% y el Calcio (Ca) con un 6.47%. Por otra parte, Los tres elementos con menor abundancia relativa fueron el Cloro (Cl) con un 1.70%, el Hierro (Fe) con un 1.66% y el Fósforo (P) con un 1.90%.

#### **4.2.8. Caracterización del punto de muestreo S6: Wanchaq, Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos.**

### **Figura 32**

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S6.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 98 recolectado el 8/01/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S6, ubicado en el Centro de Salud (CLAS) contiguo a la

estación de bomberos de Wanchaq, y en (B) el filtro 101 recolectado el 11/01/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

En la figura 32(A), se observa una morfología predominantemente irregular y esférica en las partículas de PM2.5. Este tipo de morfología sugiere una combinación de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y combustibles fósiles (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local y procesos de combustión (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020).

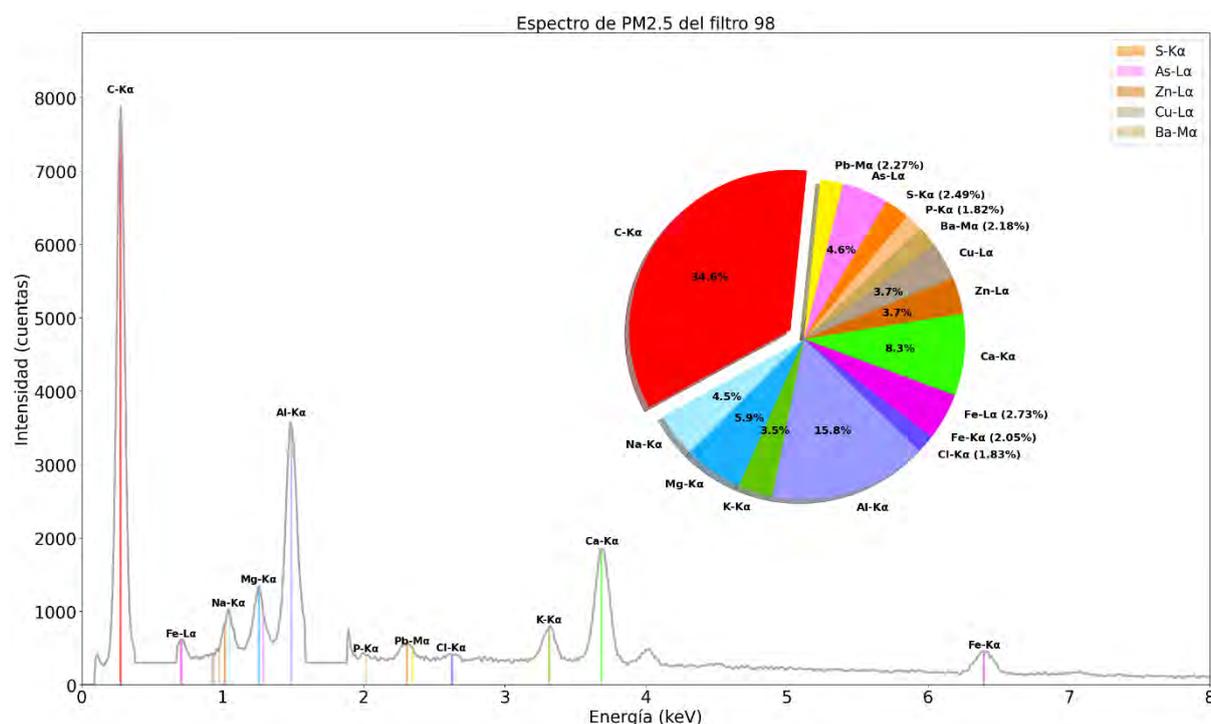
En la figura 32(B), se observan partículas con morfología irregular y esférica, junto con una lámina irregular con bordes afilados. La presencia de láminas irregulares con bordes afilados sugiere una posible influencia de emisiones vehiculares y mantenimiento de carreteras (Bora et al., 2021). Las partículas esféricas pueden originarse de procesos de combustión incompleta y fuentes industriales (Bora et al., 2021; Rana et al., 2022), mientras que las partículas irregulares podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos, corteza local y proceso de combustión (Satsangi y Yadav, 2014).

### 4.2.8.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S6 del año 2018

(Código de Filtro: 98)

Figura 33

Composición elemental y análisis espectral del filtro 98 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos, Wanchaq.



Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 98 el 8/01/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos, Wanchaq.

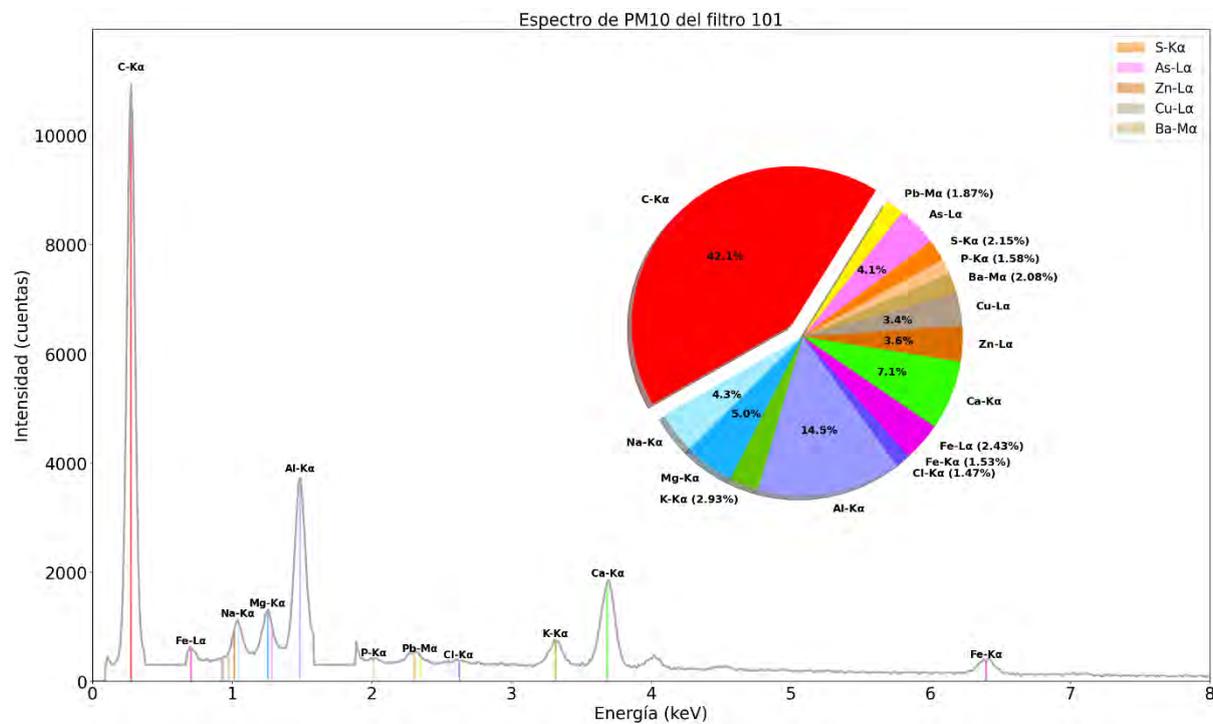
El espectro composicional de la muestra de material particulado fino PM2.5 obtenida en el Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos de Wanchaq (S6) en el año 2018, correspondiente al filtro 98, exhibió presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos con mayor presencia fueron el Carbono (C) con un 34.62%, el Aluminio (Al) con un 15.82% y el

Calcio (Ca) con un 8.25%. En contraste, Los tres elementos con menor abundancia relativa fueron el Cloro (Cl) con un 1.83%, el Fósforo (P) con un 1.82% y el Plomo (Pb) con un 2.27%.

#### 4.2.8.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S6 del año 2018 (Código de Filtro: 101)

**Figura 34**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 101 de PM10 en el sitio de monitoreo Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos, Wanchaq.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 101 el 11/01/2018 para PM10 en el punto de muestreo Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos, Wanchaq.*

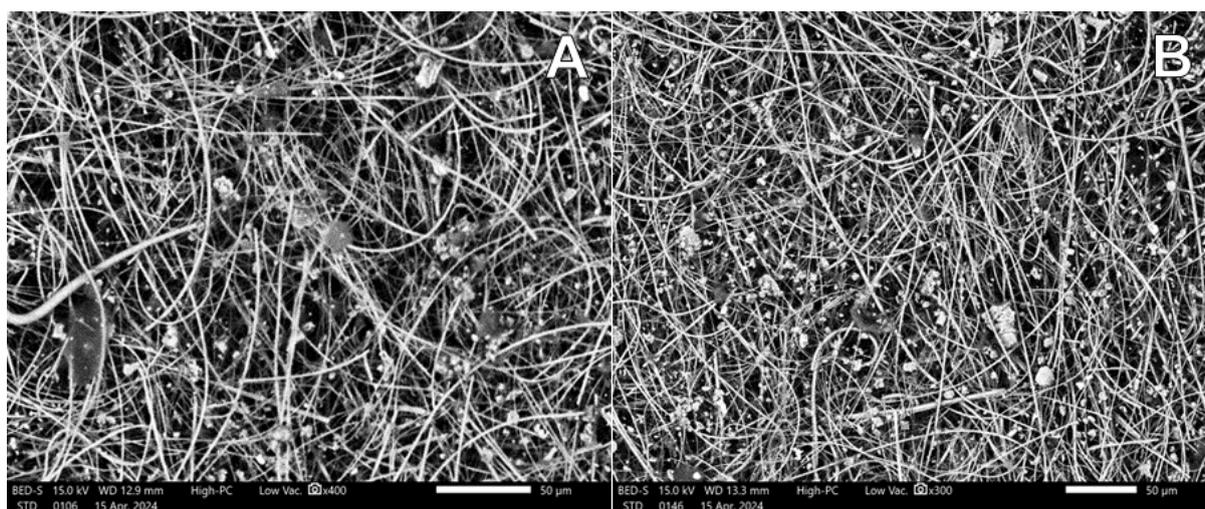
El espectro composicional de la muestra de material particulado grueso PM10 obtenida en el Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos de

Wanchaq (S6) en el año 2018, correspondiente al filtro 101, exhibió presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los tres elementos con mayor presencia fueron el Carbono (C) con un 42.07%, el Aluminio (Al) con un 14.50% y el Calcio (Ca) con un 7.05%. En contraste, Los tres elementos con menor abundancia relativa fueron el Cloro (Cl) con un 1.47%, el Plomo (Pb) con un 1.87% y el Fósforo (P) con un 1.58%.

#### 4.2.9. Caracterización del punto de muestreo S7: Cusco, Plaza San Francisco (cerca a pileta).

### Figura 35

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S7.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 118 recolectado el 2/02/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S7, ubicado en la Plaza San Francisco del distrito de Cusco, y en (B) el filtro 110 recolectado el 25/01/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

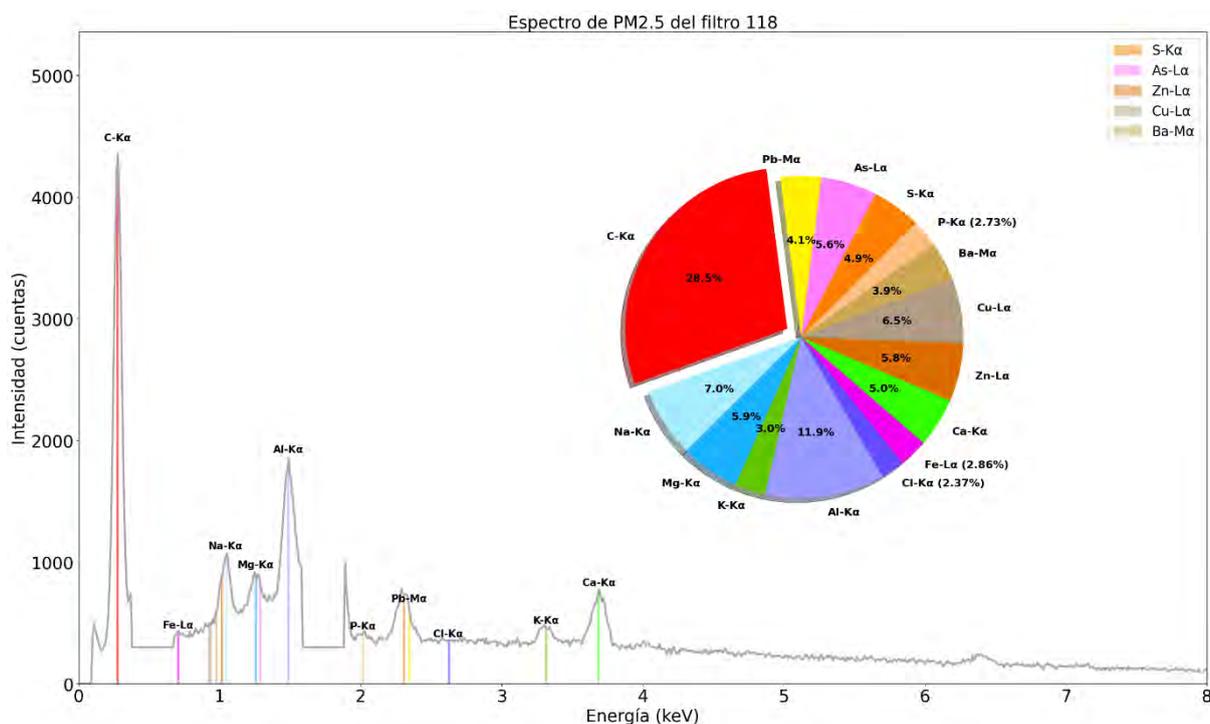
En la figura 35(A), se observa una combinación de partículas con morfología irregular y esférica en las muestras de PM2.5. Esta morfología sugiere una diversidad

de fuentes de emisión, tanto naturales como antropogénicas. Las partículas esféricas pueden estar asociadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020). En la figura 35(B), se observan partículas con una mezcla de morfologías irregulares y esféricas en las muestras de PM10. La presencia de estas morfologías sugiere una variedad de fuentes de emisión, incluyendo la resuspensión de suelos, emisiones vehiculares y procesos industriales (Satsangi y Yadav, 2014; Bora et al., 2021). Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018).

#### 4.2.9.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S7 del año 2018 (Código de Filtro: 118)

**Figura 36**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 118 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Plaza San Francisco (cerca a pileta), Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 118 el 2/02/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo Plaza San Francisco (cerca a pileta), Cusco.*

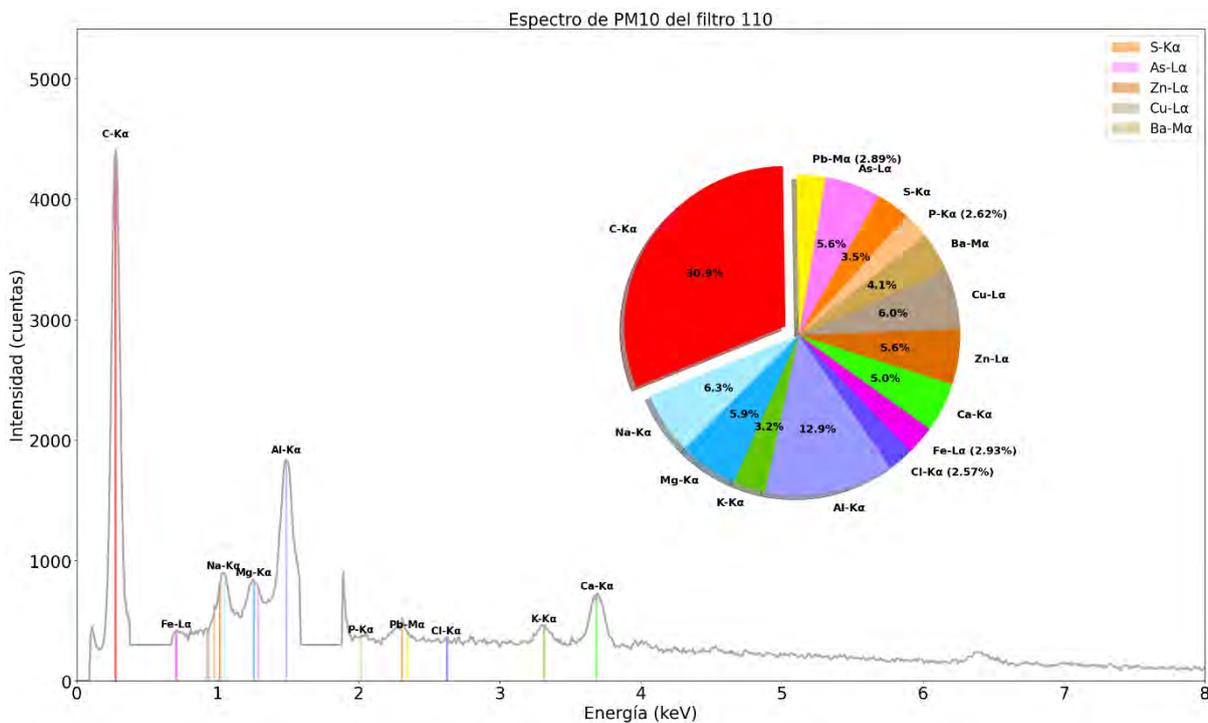
El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en la Plaza San Francisco (cerca a pileta) en Cusco (S7) en el año 2018 para el filtro 118 reveló la presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con 28.46%, el Aluminio (Al) con 11.94% y el Sodio (Na) con 6.97%. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Fósforo (P) con 2.74%, el Cloro (Cl) con 2.37% y el Hierro (Fe) con 2.86%.

#### 4.2.9.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S7 del año 2018

(Código de Filtro: 110)

**Figura 37**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 110 de PM10 en el sitio de monitoreo Plaza San Francisco (cercano a pileta), Cusco.*



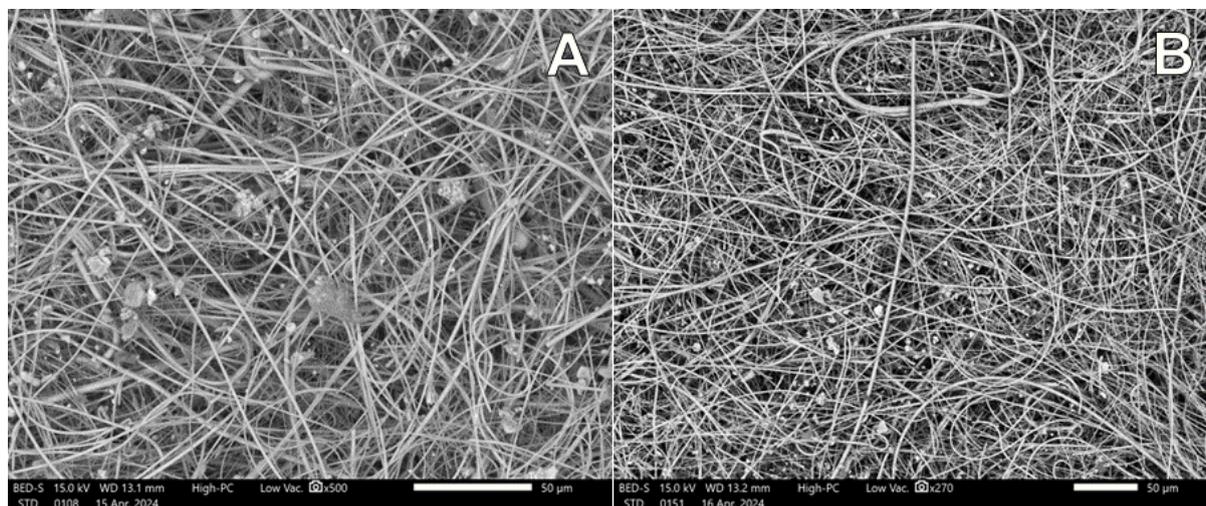
*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 110 el 25/01/2018 para PM10 en el punto de muestreo Plaza San Francisco (cercano a pileta), Cusco.*

El análisis elemental del material particulado PM10 recolectado en la Plaza San Francisco (cercano a pileta) en Cusco (S7) en el año 2018 para el filtro 110 reveló la presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con 30.93%, el Aluminio (Al) con 12.91% y el Sodio (Na) con 6.32%. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Fósforo (P) con 2.62%, el Cloro (Cl) con 2.57 % y el Hierro (Fe) con 2.93%.

#### **4.2.10. Caracterización del punto de muestreo S9: Cusco, San Blas.**

### **Figura 38**

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S9.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 131 recolectado el 8/03/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S9, ubicado en San Blas del distrito de Cusco, y en (B) el filtro 137 recolectado el 14/03/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

En la figura 38(A), se observa una baja presencia de partículas, pero las que

están presentes muestran una morfología irregular y esférica en las muestras de PM2.5. Esta observación podría indicar condiciones atmosféricas particulares durante el período de muestreo en el punto de muestreo S9. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes locales y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020).

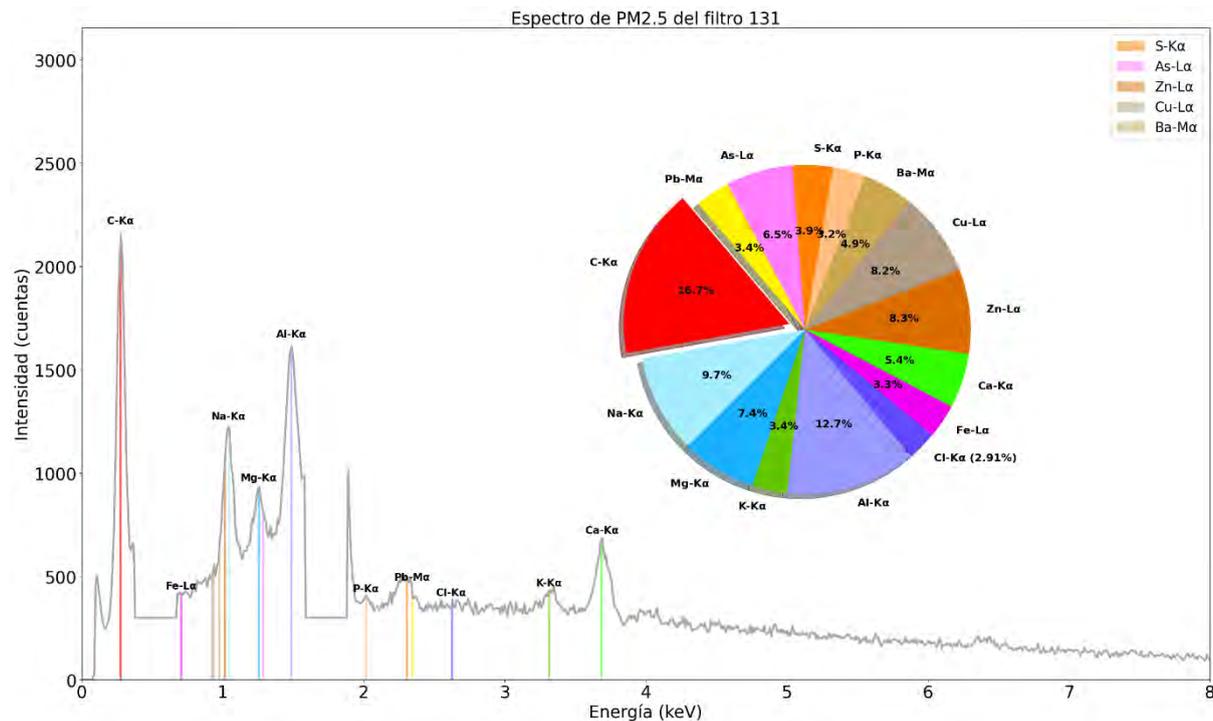
En la figura 38(B), también se observa una baja presencia de partículas, con una mezcla de morfologías irregulares y esféricas en las muestras de PM10. Esta observación puede ser atribuible a factores como condiciones climáticas, estacionales o patrones de emisión fluctuantes en el punto de muestreo durante el período de muestreo. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018), mientras que las partículas irregulares podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos, corteza local y proceso de combustión (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.10.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S9 del año 2018

(Código de Filtro: 131)

**Figura 39**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 131 de PM2.5 en el sitio de monitoreo San Blas, Cusco.*



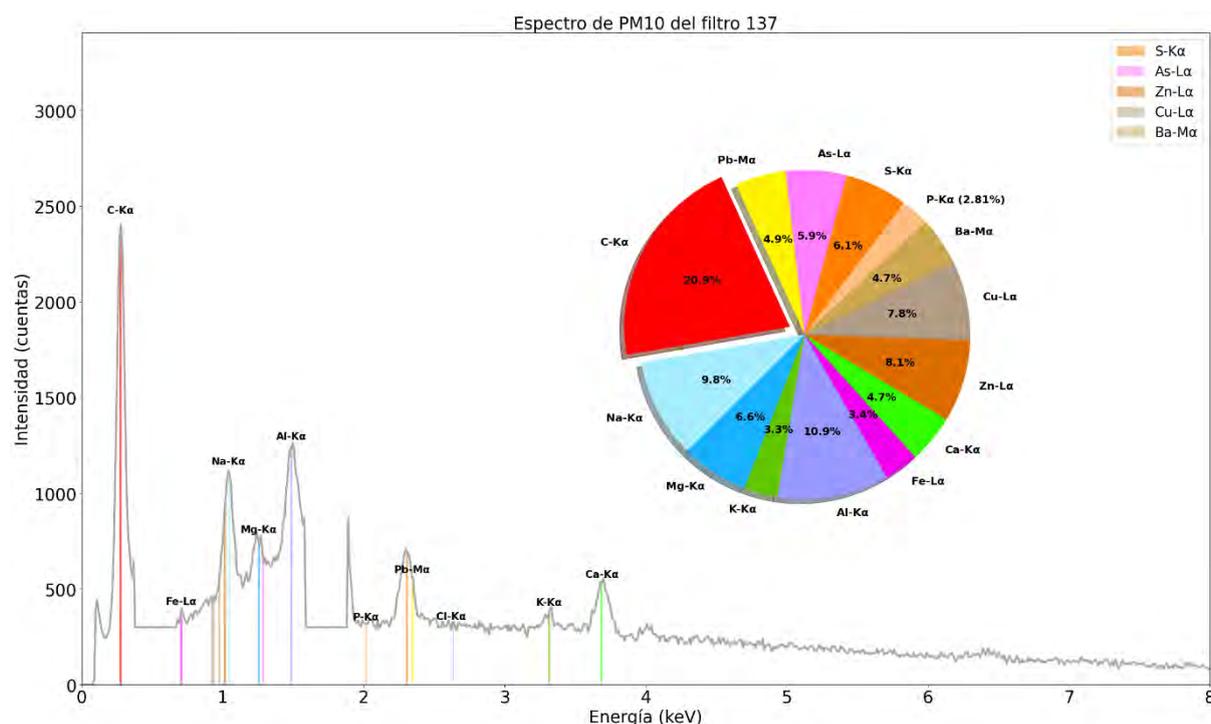
*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 131 el 8/03/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo San Blas, Cusco.*

El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en San Blas, Cusco (S9) en el año 2018 para el filtro 131 reveló la presencia de quince elementos diferentes (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con 16.67%, el Aluminio (Al) con 12.73% y el Sodio (Na) con 9.67 %. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Cloro (Cl) con 2.91%, el Fósforo (P) con 3.21 % y el Potasio (K) con 3.43%.

4.2.10.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S9 del año 2018  
(Código de Filtro: 137)

Figura 40

Composición elemental y análisis espectral del filtro 137 de PM10 en el sitio de monitoreo San Blas, Cusco.



Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 137 el 14/03/2018 para PM10 en el punto de muestreo San Blas, Cusco.

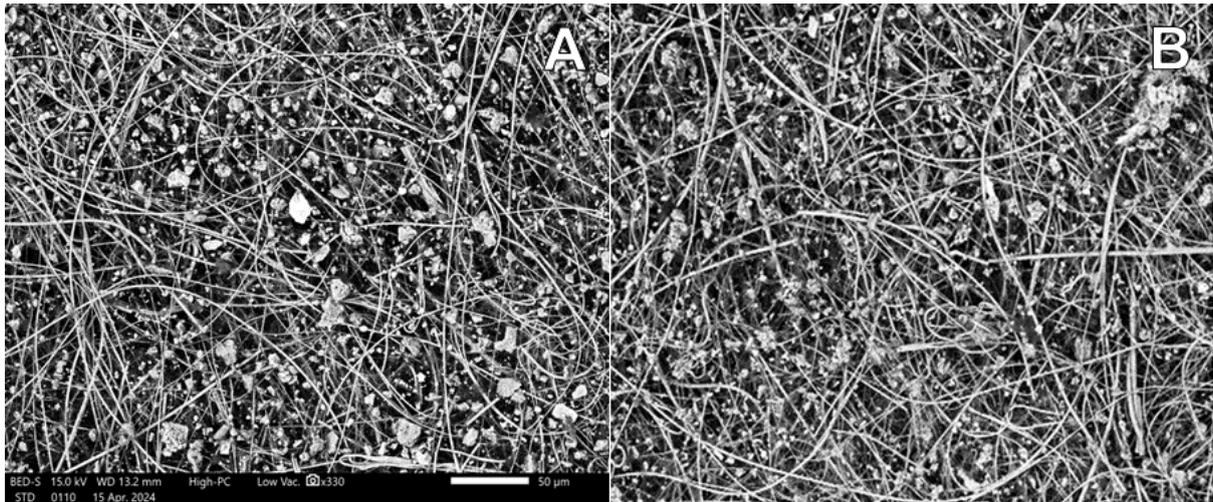
El análisis elemental del material particulado PM10 recolectado en San Blas, Cusco (S9) en el año 2018 para el filtro 137 reveló presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con 20.94%, el Aluminio (Al) con 10.91% y el Sodio (Na) con 9.77%. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Fósforo (P) con 2.81%, el Potasio (K) con 3.28% y el Hierro (Fe) con 3.35%.

#### 4.2.11. Caracterización del punto de muestreo S10: Cusco, Plazoleta

##### Limacpampa.

#### Figura 41

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S10.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 149 recolectado el 28/03/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S10, ubicado en la Plazoleta Limacpampa del distrito de Cusco, y en (B) el filtro 145 recolectado el 24/03/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

En la figura 41(A), se observa una morfología predominantemente irregular y esférica en las partículas de PM2.5 recolectadas en el punto de muestreo S10. Esta combinación de morfologías sugiere una mezcla de partículas provenientes de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020).

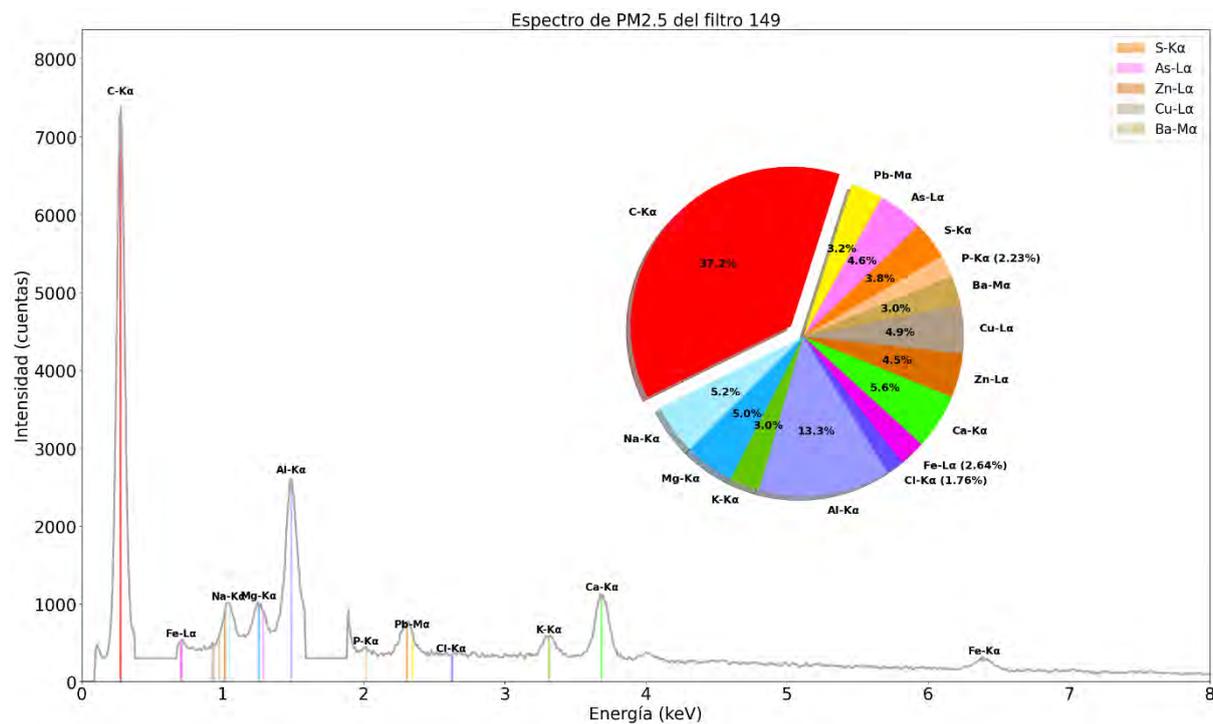
En la figura 41(B), también se observa una mezcla de morfologías irregulares

y esféricas en las partículas de PM10 recolectadas en el mismo punto de muestreo. Esta observación sugiere una variedad de fuentes de emisión y procesos atmosféricos que afectan la morfología de las partículas. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018), mientras que las partículas irregulares podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos, corteza local y proceso de combustión (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.11.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S10 del año 2018 (Código de Filtro: 149)

**Figura 42**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 149 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Plazoleta Limacpampa, Cusco.*



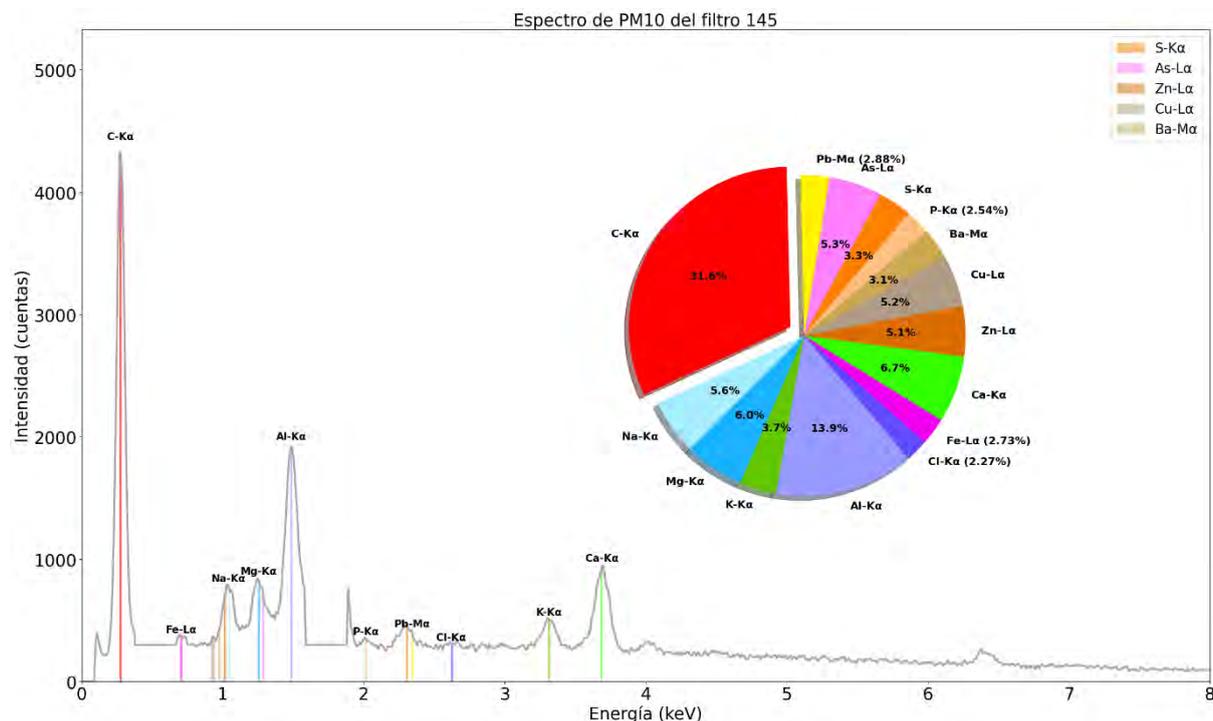
*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 149 el 28/03/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo Plazoleta Limacpampa, Cusco.*

El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en la Plazoleta Limacpampa, Cusco (S10) en 2018 para el filtro 149 mostró presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos mayormente presentes fueron el Carbono (C) con un 37.23%, el Aluminio (Al) con un 13.25%, y el Calcio (Ca) con un 5.60%. En contraste, los elementos menos representados fueron el Cloro (Cl) con 1.76%, el Fósforo (P) con 2.23%, y el Hierro (Fe) con 2.64%.

#### 4.2.11.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S10 del año 2018 (Código de Filtro: 145)

**Figura 43**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 145 de PM10 en el sitio de monitoreo Plazoleta Limacpampa, Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 145 el 24/03/2018 para PM10 en el punto de muestreo Plazoleta Limacpampa*

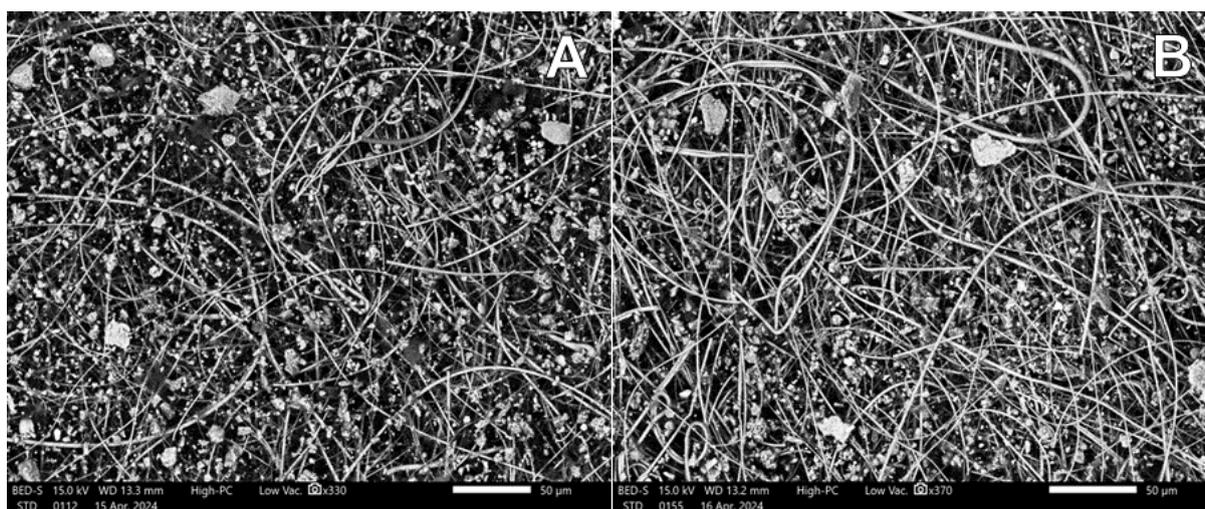
El análisis elemental del material particulado PM10 recolectado en la Plazoleta Limacpampa, Cusco (S10) en 2018 para el filtro 145 también reveló presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos mayormente presentes fueron el Carbono (C) con un 31.56%, el Aluminio (Al) con un 13.94%, y el Calcio (Ca) con un 6.73%. En contraste, los elementos menos representados fueron el Fósforo (P) con 2.54%, el Cloro (Cl) con 2.27%, y el Hierro (Fe) con 2.73%.

#### 4.2.12. Caracterización del punto de muestreo S11: Cusco, Plazoleta

##### Pumacchupan.

#### Figura 44

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S11.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 151 recolectado el 5/04/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S11, ubicado en la Plazoleta Pumacchupan del distrito de Cusco, y en (B) el filtro 155 recolectado el 11/04/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

En la figura 44(A), se observa una combinación de partículas con morfología irregular y esférica en las muestras de PM2.5 recolectadas en el punto de muestreo

S11. Esta observación sugiere una variedad de fuentes de emisión y procesos atmosféricos que afectan la morfología de las partículas. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020).

En la figura 44(B), se observa una combinación de morfologías irregulares, esféricas y laminas irregulares en las partículas de PM10 recolectadas en el mismo punto de muestreo. Esta variabilidad en la morfología puede ser atribuible a la complejidad de las fuentes de emisión y los procesos atmosféricos que afectan la composición de las partículas. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018), mientras que las partículas irregulares podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos y la presencia de partículas más grandes con formas laminadas (Satsangi y Yadav, 2014; Bora et al., 2021).

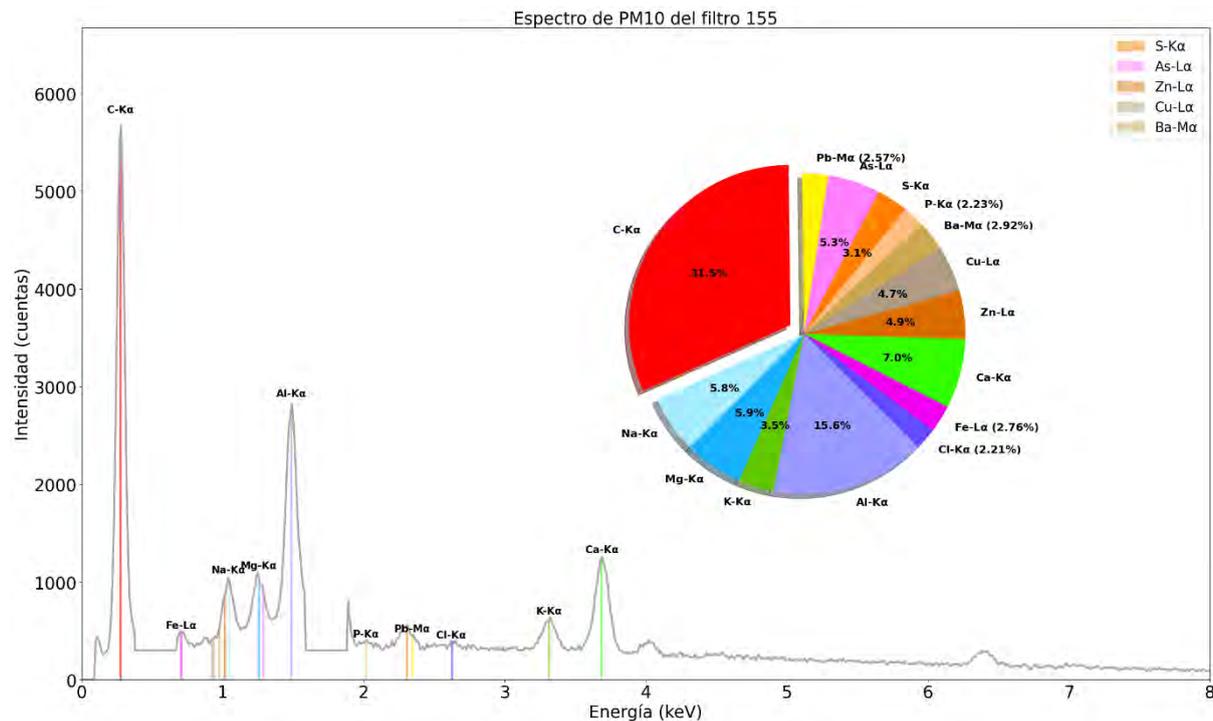


#### 4.2.12.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S11 del año 2018

(Código de Filtro: 155)

Figura 46

Composición elemental y análisis espectral del filtro 155 de PM10 en el sitio de monitoreo Plazoleta Pumacchupan, Cusco.



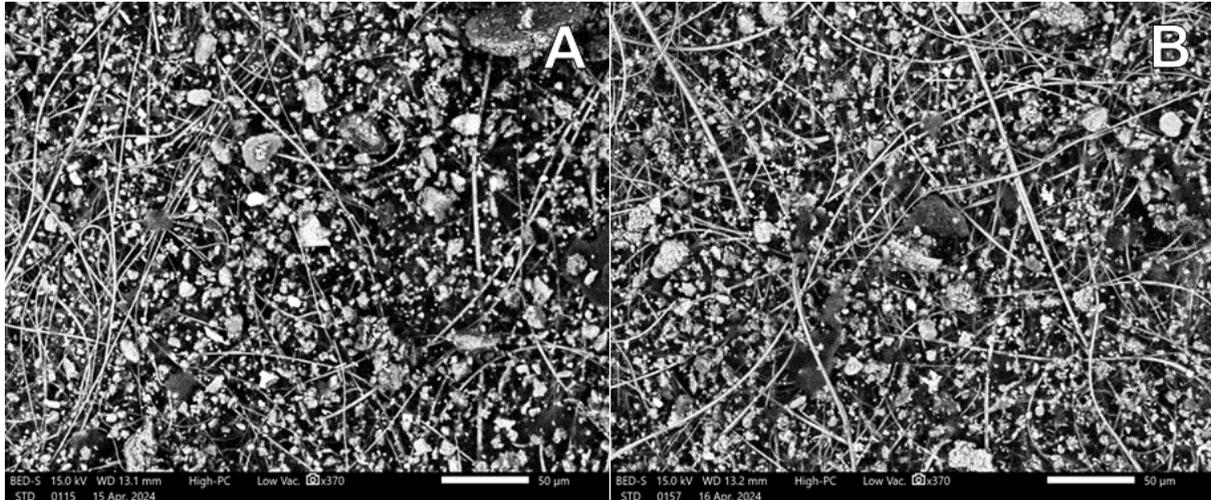
Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 155 el 11/04/2018 para PM10 en el punto de muestreo Plazoleta Pumacchupan, Cusco.

El análisis elemental del material particulado PM10 recolectado en la Plazoleta Pumacchupan, Cusco (S11) en 2018 para el filtro 155 también reveló presencia de (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos mayormente presentes fueron el Carbono (C) con un 31.53%, el Aluminio (Al) con un 15.55%, y el Calcio (Ca) con un 6.99%. En contraste, los elementos menos representados fueron el Fósforo (P) con 2.23 %, el Cloro (Cl) con 2.21 %, y el Hierro (Fe) con 2.76 %.

#### 4.2.13. Caracterización del punto de muestreo S12: Cusco, Calle Matará.

**Figura 47**

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S12.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 163 recolectado el 23/04/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S12, ubicado en la Calle Matará del distrito de Cusco, y en (B) el filtro 159 recolectado el 19/04/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

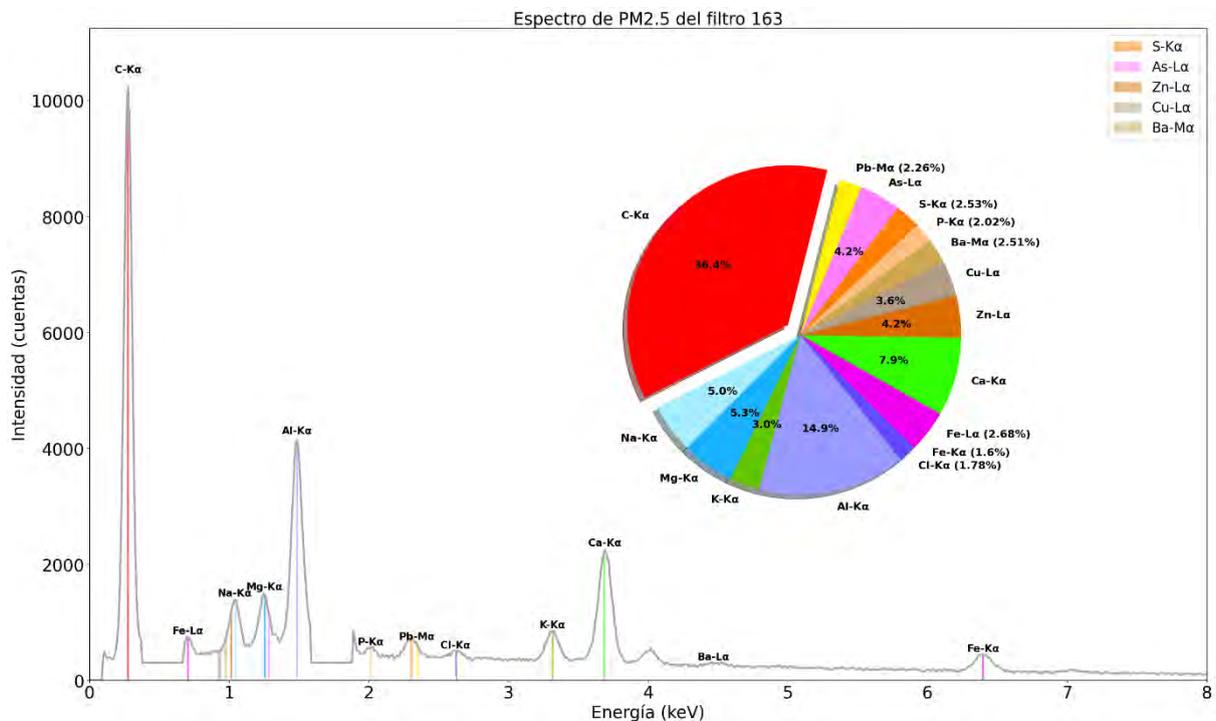
En la figura 47(A), se observa una combinación de partículas con morfología irregular, esférica y de lámina irregular en las muestras de PM2.5 recolectadas en el punto de muestreo S12. Esta variedad de morfologías sugiere la influencia de múltiples fuentes de emisión y procesos atmosféricos en la composición de las partículas. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares y de lámina irregular podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local, corteza local, proceso de combustión y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Bora et al., 2021).

En la figura 47(B), se observa una combinación de morfologías irregulares y esféricas en las partículas de PM10 recolectadas en el mismo punto de muestreo. Esta variabilidad morfológica puede reflejar la diversidad de fuentes de emisión y procesos atmosféricos que afectan la composición de las partículas en suspensión. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018), mientras que las partículas irregulares podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos y la presencia de partículas más grandes con formas irregulares (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.13.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S12 del año 2018 (Código de Filtro: 163)

**Figura 48**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 163 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Calle Matará, Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición*

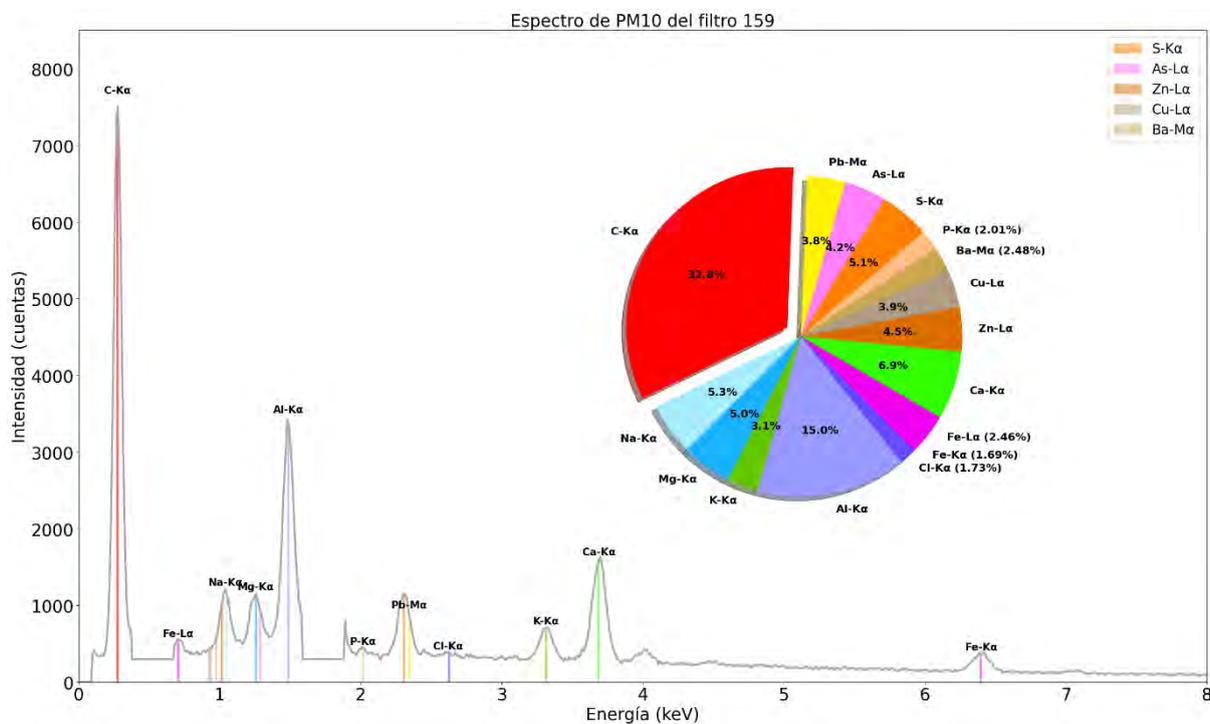
elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 163 el 23/04/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo Calle Matará, Cusco.

En el análisis del material particulado PM2.5 recolectado en la Calle Matará, Cusco (S12) en el año 2018 con el código de filtro 163, se identificaron (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los componentes mayoritarios fueron el Carbono (C) con 36.44%, el Aluminio (Al) con 14.87% y el Calcio (Ca) con 7.93%. En contraste, los elementos menos abundantes fueron el Cloro (Cl) con 1.78%, el Fósforo (P) con 2.02% y el Hierro (Fe) con 1.60% y 2.68%.

#### 4.2.13.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S12 del año 2018 (Código de Filtro: 159)

**Figura 49**

Composición elemental y análisis espectral del filtro 159 de PM10 en el sitio de monitoreo Calle Matará, Cusco.



Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición

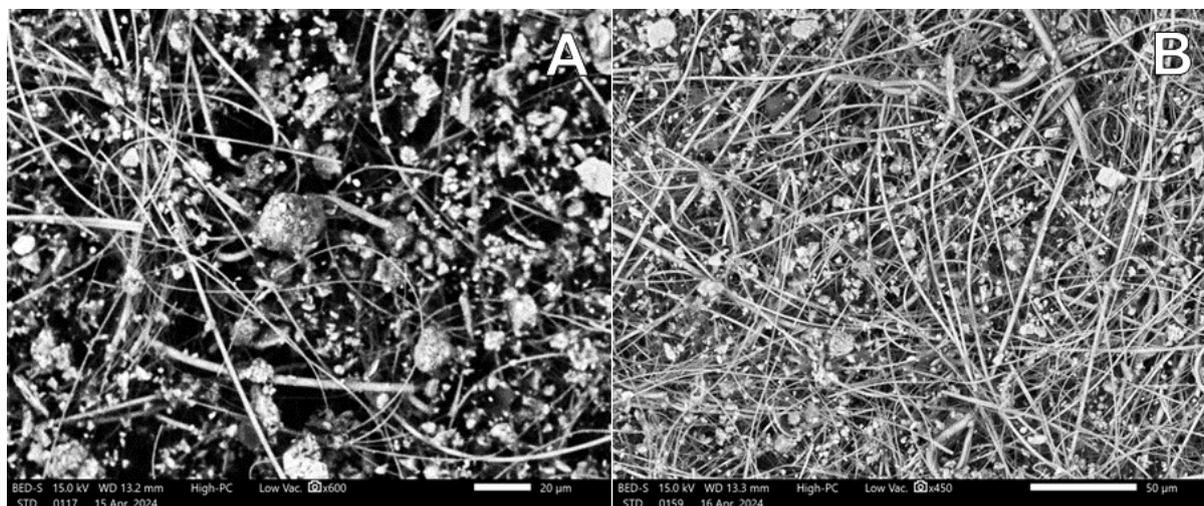
*elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 159 el 19/04/2018 para PM10 en el punto de muestreo Calle Matará, Cusco.*

En cuanto al análisis del material particulado PM10 recolectado en la Calle Matará, Cusco (S12) en el año 2018 con el código de filtro 159, se detectaron (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los componentes más abundantes fueron el Carbono (C) con 32.84%, el Aluminio (Al) con 14.99% y el Calcio (Ca) con 6.92%. En contraste, los elementos menos presentes fueron el Fósforo (P) con 2.01%, el Cloro (Cl) con 1.73% y el Hierro (Fe) con 1.69% y 2.46%.

#### **4.2.14. Caracterización del punto de muestreo S13: Santiago, Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa.**

#### **Figura 50**

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S13.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 168 recolectado el 11/05/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S13, ubicado en el Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa del distrito de Santiago, y en (B) el filtro 174 recolectado el 27/05/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

En la figura 50(A), se observa una combinación de partículas con morfología irregular y esférica en las muestras de PM<sub>2.5</sub> recolectadas en el punto de muestreo S13. Esta variabilidad en la morfología sugiere la influencia de diferentes fuentes de emisión y procesos atmosféricos en la composición de las partículas. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local, corteza local y proceso de combustión y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Bora et al., 2021).

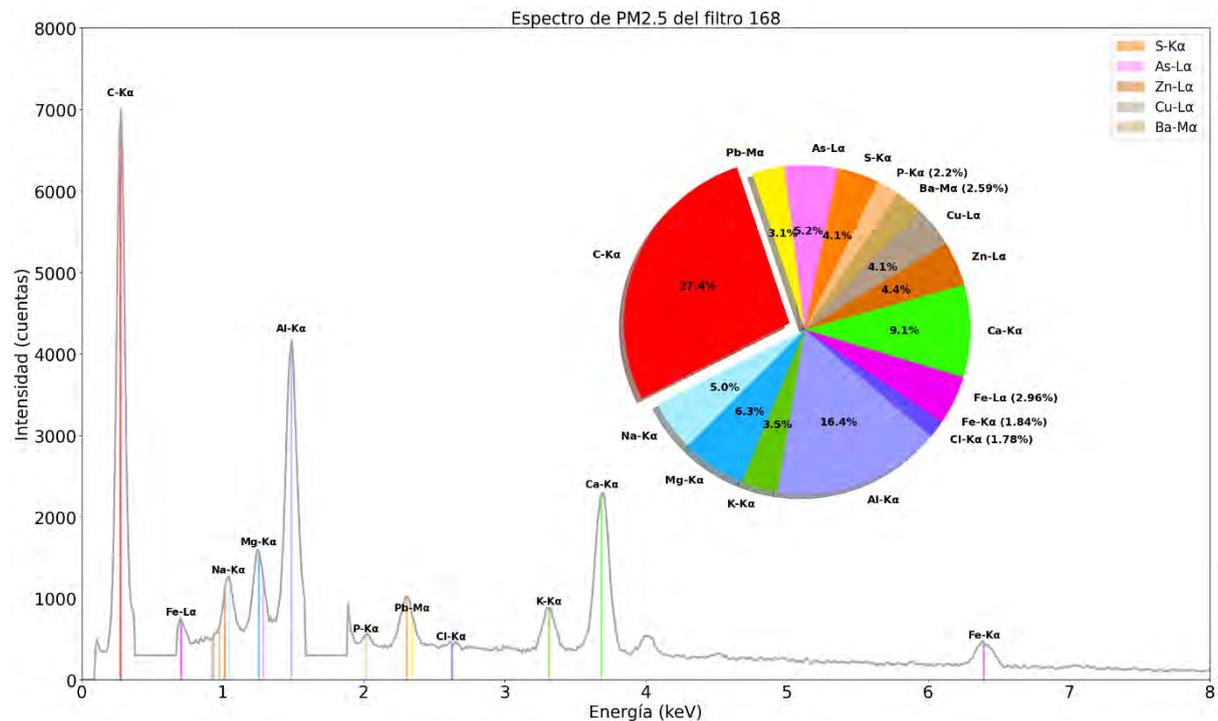
En la figura 50(B), se observa una combinación de morfologías irregulares y esféricas en las partículas de PM<sub>10</sub> recolectadas en el mismo punto de muestreo. Esta variabilidad morfológica puede reflejar la diversidad de fuentes de emisión y procesos atmosféricos que afectan la composición de las partículas en suspensión. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018), mientras que las partículas irregulares podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos y la presencia de partículas más grandes con formas irregulares (Satsangi y Yadav, 2014).

#### 4.2.14.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S13 del año 2018

(Código de Filtro: 168)

Figura 51

Composición elemental y análisis espectral del filtro 168 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa, Santiago.



Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 168 el 11/05/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa, Santiago.

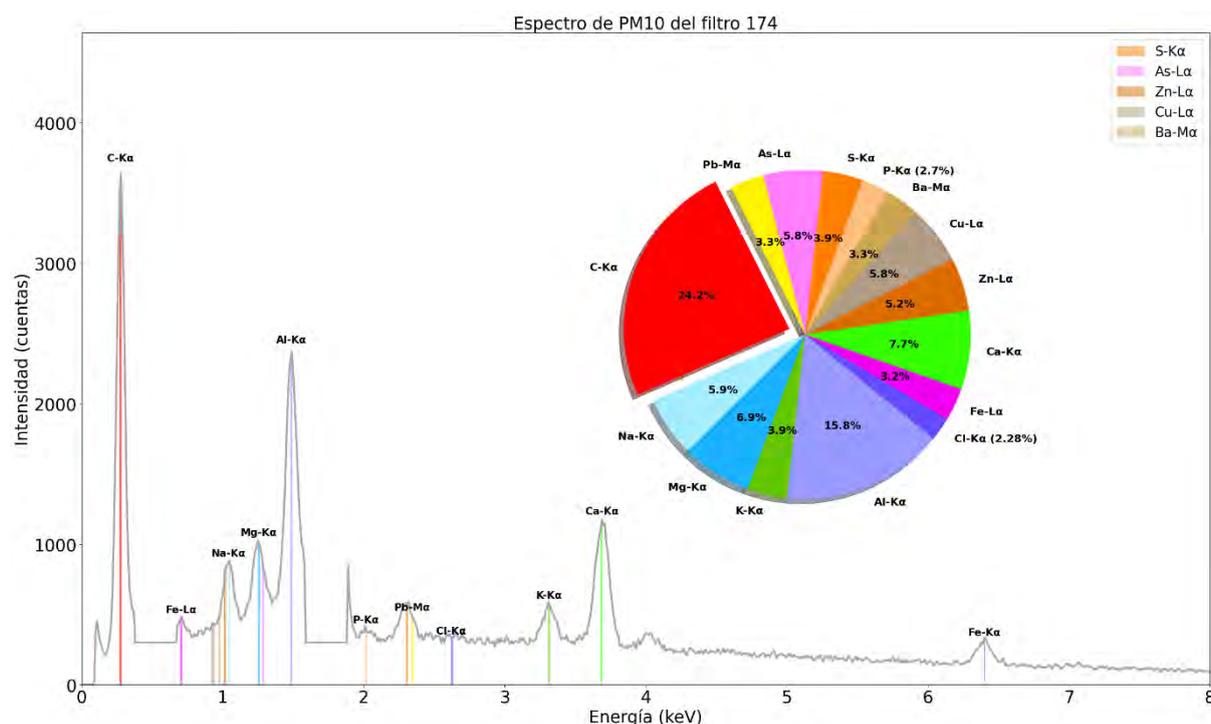
El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en el Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa, Santiago (S13) en el año 2018 con el código de filtro 168, reveló (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con 27.38%, el Aluminio (Al) con 16.39% y el Calcio (Ca) con 9.08%. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Cloro (Cl) con 1.78%, el Fósforo (P) con 2.20% y el Hierro (Fe) con 1.84% y 2.96%.

#### 4.2.14.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S13 del año 2018

(Código de Filtro: 174)

Figura 52

Composición elemental y análisis espectral del filtro 174 de PM10 en el sitio de monitoreo Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa, Santiago.



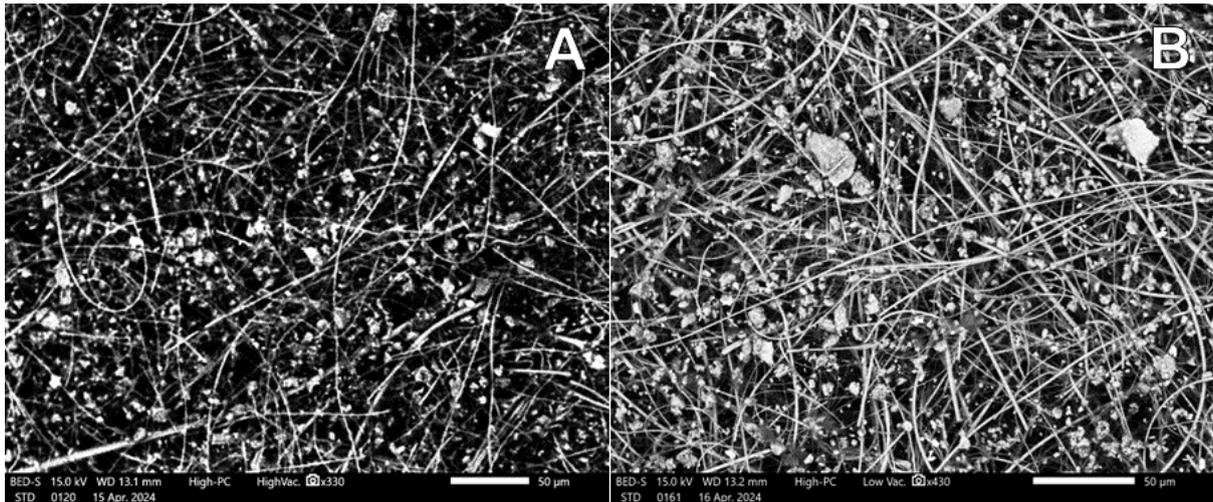
Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 174 el 27/05/2018 para PM10 en el punto de muestreo Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa, Santiago.

En el análisis del material particulado PM10 recolectado en el Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa, Santiago (S13) en el año 2018 con el código de filtro 174, se identificaron (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con 24.19%, el Aluminio (Al) con 15.84% y el Calcio (Ca) con 7.73%. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Cloro (Cl) con 2.28%, el Plomo (Pb) con 3.30% y el Hierro (Fe) con 3.22%.

#### 4.2.15. Caracterización del punto de muestreo S14: San Jerónimo, Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaría.

**Figura 53**

*Morfología de las diferentes partículas en filtros de PM10 y PM2.5 en el sitio de monitoreo S14.*



*Nota.* La microfotografía SEM-EDX revela la morfología y características microestructurales de las partículas recolectadas en (A) el filtro 189 recolectado el 18/08/2018 para PM2.5 en el punto de muestreo S14, ubicado en el Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaría del distrito de San Jerónimo, y en (B) el filtro 181 recolectado el 20/06/2018 para PM10 en el mismo punto de muestreo.

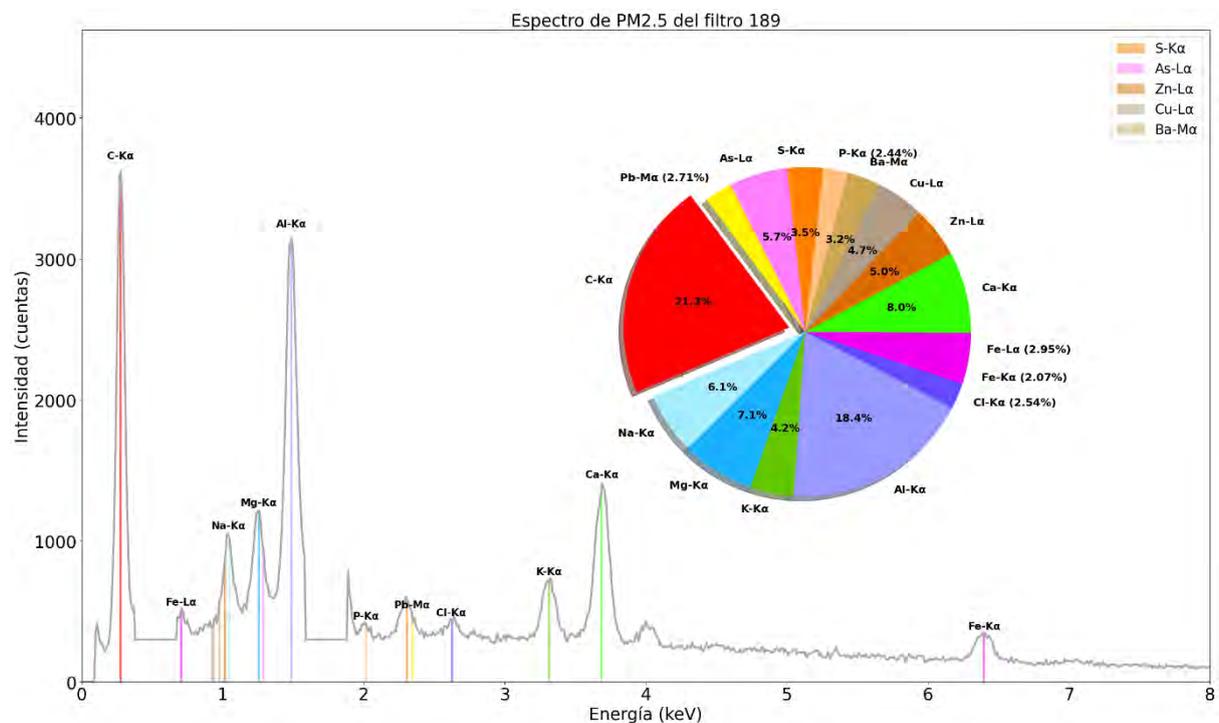
En la figura 53(A), se observa una combinación de partículas con morfología irregular y esférica en las muestras de PM2.5 recolectadas en el punto de muestreo S14. Esta variabilidad morfológica sugiere la influencia de múltiples fuentes de emisión y procesos atmosféricos en la composición de las partículas. Las partículas esféricas pueden estar relacionadas con emisiones vehiculares y procesos de combustión (Yin et al., 2013; Goel et al., 2020), mientras que las partículas irregulares podrían indicar contribuciones de fuentes de suelo local, corteza local, proceso de combustión y actividades humanas (Satsangi y Yadav, 2014; Bora et al., 2021). En la

figura 53(B), se observa una combinación de morfologías irregulares, esféricas y de lámina irregular en las partículas de PM10 recolectadas en el mismo punto de muestreo. Esta variabilidad morfológica refleja la complejidad de las fuentes de emisión y los procesos atmosféricos que afectan la composición de las partículas en suspensión. Las partículas esféricas pueden ser indicativas de procesos de combustión y emisiones de vehículos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018), mientras que las partículas irregulares y de lámina irregular podrían estar relacionadas con la resuspensión de suelos y la presencia de partículas más grandes con formas irregulares (Satsangi y Yadav, 2014; Bora et al., 2021).

#### 4.2.15.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S14 del año 2018 (Código de Filtro: 189)

**Figura 54**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 189 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria, San Jerónimo.*



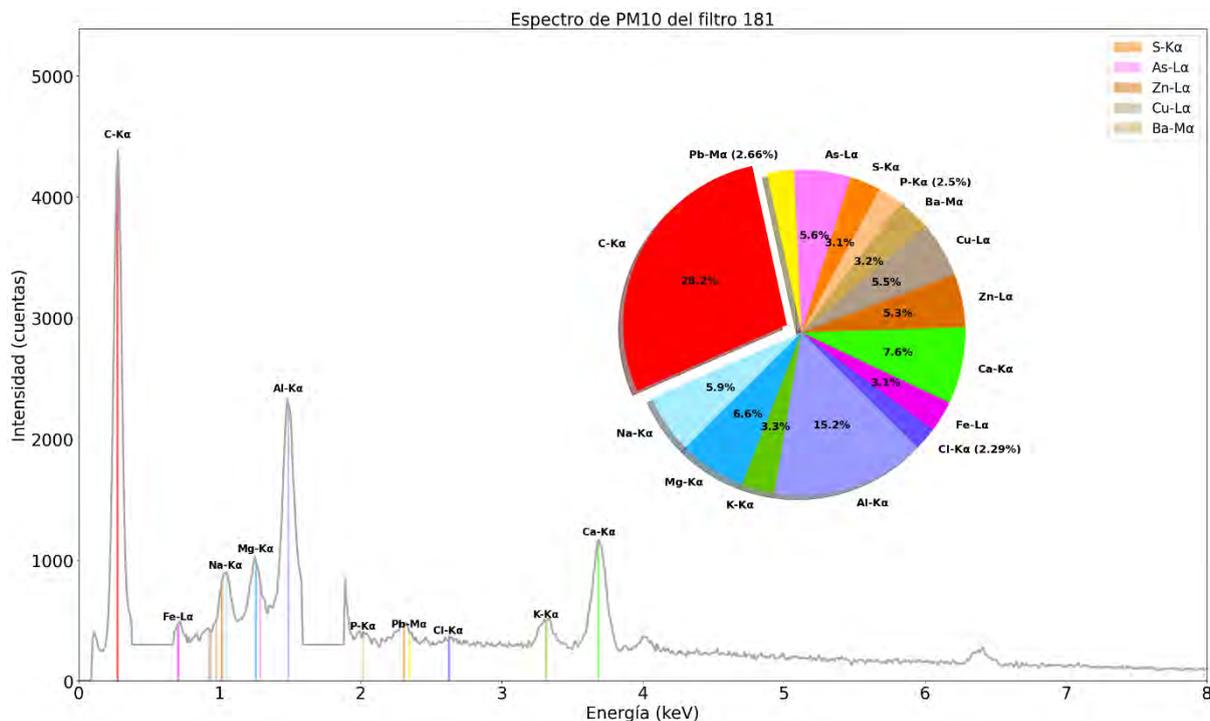
*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de PM en el filtro 189 el 18/08/2018 para PM2.5.*

El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en San Jerónimo, Cusco (S14) en el año 2018 para el filtro 189 reveló la presencia de quince elementos diferentes (P, S, As, Pb, C, Na, Mg, K, Al, Cl, Fe, Ca, Zn, Cu, Ba). Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con un porcentaje de 21.27%, el Aluminio (Al) con 18.45%, y el Sodio (Na) con 6.08%. En contraste, los elementos menos presentes fueron el Plomo (Pb) con 2.71%, el Fósforo (P) con 2.44%, y el Hierro (Fe) con 2.07%.

#### 4.2.15.2. Caracterización de PM10 del punto de muestreo S14 del año 2018 (Código de Filtro: 181)

**Figura 55**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 181 de PM10 en el sitio de monitoreo Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria, San Jerónimo.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 181 el 20/06/2018 para PM10 en el punto de muestreo Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria, San Jerónimo.*

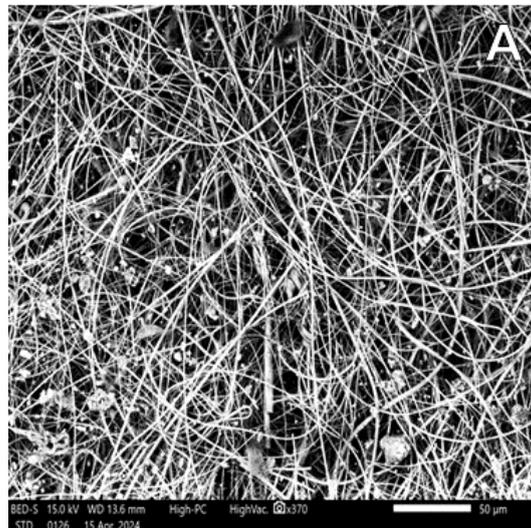
El análisis elemental del material particulado PM10 recolectado en San Jerónimo, Cusco (S14) el 20/06/2018 para el filtro 181. Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con un porcentaje de 28.23%, el Aluminio (Al) con 15.15%, y el Sodio (Na) con 5.87%. En contraste, los elementos menos presentes fueron el Plomo (Pb) con 2.66%, el Fósforo (P) con 2.50%, y el Cloro (Cl) con 2.29%.

#### **4.2.16. Caracterización del punto de muestreo S15: Cusco, Campus**

**Universitario, puerta número 03.**

#### **Figura 56**

*Morfología de las diferentes partículas en el filtro de PM2.5 en el sitio de monitoreo S15.*



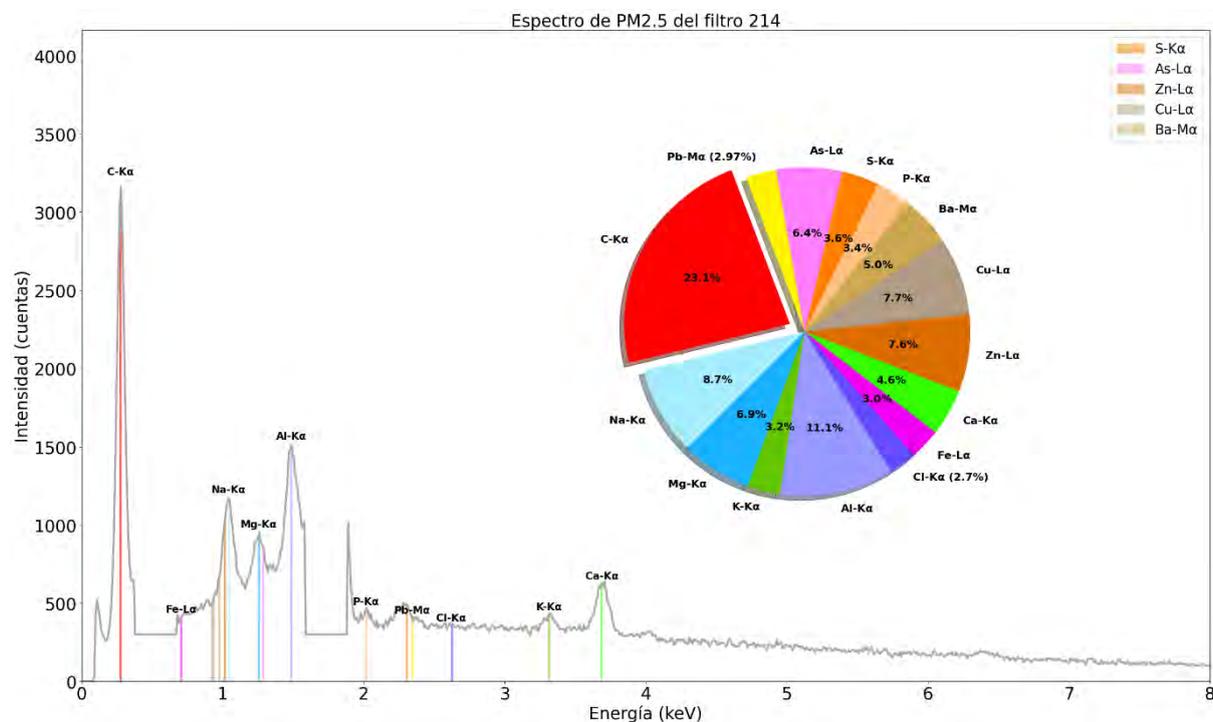
*Nota.* La imagen (A) SEM-EDX muestra la morfología de las partículas recolectadas en el filtro de cuarzo 214 para material particulado PM2.5 en el punto de muestreo S15 recolectado el 14/05/2020.

La presencia de partículas con morfología irregular y esférica en la figura 56(A) SEM-EDX indica una composición diversa y posiblemente una baja concentración de material particulado PM2.5 en la muestra recolectada en el punto de muestreo S15. Las partículas irregulares podrían estar asociadas con fuentes de emisión locales, como el tráfico vehicular y las actividades industriales (Yin et al., 2013; Satsangi y Yadav, 2014). Por otro lado, las partículas esféricas podrían tener origen biogénico, como el polen, o estar relacionadas con procesos de combustión y emisiones antropogénicas (Telloli et al., 2016; Zeb et al., 2018).

#### 4.2.16.1. Caracterización de PM2.5 del punto de muestreo S15 del año 2020 (Código de Filtro: 214)

**Figura 57**

*Composición elemental y análisis espectral del filtro 214 de PM2.5 en el sitio de monitoreo Campus Universitario, puerta número 03, Cusco.*



*Nota: Gráfico generado por los autores utilizando Python para visualizar la composición elemental y el análisis espectral de las partículas recolectadas en el filtro 214 el 14/05/2020*

para PM2.5 en el punto de muestreo Campus Universitario, puerta número 03, Cusco.

El análisis elemental del material particulado PM2.5 recolectado en el Campus Universitario, puerta número 03, Cusco (S15) el 14/05/2020 para el filtro 214. Los elementos más abundantes fueron el Carbono (C) con un porcentaje de 23.06%, el Aluminio (Al) con 11.13%, y el Sodio (Na) con 8.70%. Por otro lado, los elementos menos presentes fueron el Plomo (Pb) con 2.97%, el Fósforo (P) con 3.41%, y el Cloro (Cl) con 2.69%.

#### 4.3. Discusión General

El análisis elemental de los filtros de PM2.5 y PM10 se resume en la Tabla 6, la cual presenta los datos recolectados en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020. El análisis reveló en la mayoría de los filtros la presencia de quince elementos principales: fósforo (P), azufre (S), arsénico (As), plomo (Pb), carbono (C), sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), aluminio (Al), cloro (Cl), hierro (Fe), calcio (Ca), zinc (Zn), cobre (Cu) y bario (Ba). Estos resultados excluyen los elementos silicio (Si) y oxígeno (O), que son componentes predominantes del cuarzo en los filtros utilizados, lo cual concuerda con la literatura previa, como el estudio de Alberto y Pineda (2020) y Park et al. (2023)

**Tabla 6**

*Distribución elemental por sitio de monitoreo*

ID	Distrito	Sitio de Monitoreo	Tipo de Material Particulado	Elementos determinados (%)
S1	Cusco	Campus Universitario, Facultad de Educación	PM2.5	C>Al>Na>Cu>Mg>Zn>Ca>As>S>Pb>Ba>K>Fe>P>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Cu>Zn>Ba>K>S>Fe>Pb>Cl>P

S2	San Sebastián	APV Paraiso de Fátima	PM2.5	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Zn>Cu>Fe>K>S>Ba>Pb>P>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Mg>As>Na>Cu>S>Fe>Zn>K>Pb>Ba>P>Cl
			PM2.5	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Cu>Zn>Fe>S>K>Ba>Pb>P>Cl
			PM2.5	C>Al>Na>Zn>Mg>Cu>As>Ca>Ba>S>Pb>K>Fe>P>Cl
S3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	PM2.5	C>Al>Mg>Ca>Na>As>Cu>Zn>S>K>Pb>Ba>Fe>P>Cl
			PM10	C>Al>Cu>Na>Mg>As>Zn>Ca>Ba>S>K>Pb>P>Fe>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Mg>As>Na>Zn>Fe>Cu>K>S>Ba>Pb>P>Cl
			PM10	C>Al>Mg>Na>Ca>As>Zn>Cu>Ba>S>K>Fe>Pb>P>Cl
S4	Cusco	Colegio Clorinda Matto de Turner	PM10	C>Al>Na>Mg>Zn>Cu>As>Ca>Ba>S>K>Pb>Fe>P>Cl
			PM2.5	C>Al>S>Mg>Ca>Na>Cu>Pb>Zn>As>K>Ba>Fe>P>Cl
			PM10	C>Al>Na>Cu>Mg>Zn>As>Ca>S>Ba>Fe>Pb>K>P>Cl
			PM2.5	C>Al>Na>Mg>Ca>Zn>As>Cu>Ba>S>K>Fe>Pb>P>Cl
S5	Wanchaq	Local del Municipio Distrital	PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>S>As>Zn>Fe>Cu>Pb>K>Ba>P>Cl
			PM2.5	C>Al>Ca>Mg>Fe>As>Na>Cu>Zn>K>S>Pb>Ba>Cl>P
S6	Wanchaq	Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos	PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Fe>Zn>Cu>K>S>Ba>Pb>P>Cl
			PM2.5	C>Al>Na>Cu>Mg>Zn>As>Ca>S>Pb>Ba>K>Fe>P>Cl
S7	Cusco	Plaza San Francisco (cerca a pileta)	PM2.5	C>Al>Na>Cu>Mg>Zn>As>Ca>S>Pb>Ba>K>Fe>P>Cl

			PM10	C>Al>Na>Cu>Mg>Zn>As>Ca> Ba>S>K>Fe>Pb>P>Cl
S9	Cusco	San Blas	PM2.5	C>Al>Na>Zn>Cu>Mg>As>Ca> Ba>S>K>Pb>Fe>P>Cl
			PM10	C>Al>Na>Zn>Cu>Mg>S>As>Pb> Ba>Ca>Fe>K>P>Cl
S10	Cusco	Plazoleta Limacpampa	PM2.5	C>Al>Ca>Na>Mg>Cu>As>Zn>S> Pb>Ba>K>Fe>P>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Cu>Zn>K> S>Ba>Pb>Fe>P>Cl
S11	Cusco	Plazoleta Pumacchupan	PM2.5	C>Al>S>Ca>Pb>Mg>Na>As>Cu> Zn>K>Ba>Fe>P>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Zn>Cu>K> S>Ba>Fe>Pb>P>Cl
S12	Cusco	Calle Matará	PM2.5	C>Al>Ca>Mg>Na>Fe>Zn>As>Cu> K>S>Ba>Pb>P>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Na>S>Mg>Zn>As>Fe> Cu>Pb>K>Ba>P>Cl
S13	Santiago	Centro de Salud (CLAS) de Belenpampa	PM2.5	C>Al>Ca>Mg>As>Na>Fe>Zn>Cu> S>K>Pb>Ba>P>Cl
			PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>Cu>As>Zn>S> K>Pb>Ba>Fe>P>Cl
S14	San Jerónimo	Centro de Salud (CLAS) aledaño a la comisaria	PM2.5	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Zn>Fe>Cu> K>S>Ba>Pb>Cl>P
			PM10	C>Al>Ca>Mg>Na>As>Cu>Zn>K> Ba>Fe>S>Pb>P>Cl
S15	Cusco	Campus Universitario, puerta número 03	PM2.5	C>Al>Na>Cu>Zn>Mg>As>Ba> Ca>S>P>K>Fe>Pb>Cl

La identificación de estos elementos proporciona información importante sobre la composición química del material particulado y su posible origen. Las fuentes de los elementos detectados en los filtros de PM2.5 y PM10 son diversas y abarcan tanto

fuentes antropogénicas como naturales. Fung y Wong (1995) destacaron la presencia de fósforo (P), azufre (S) y arsénico (As) en las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles. El tráfico vehicular es una fuente importante de contaminación en áreas urbanas. Searle (2001) identificó plomo (Pb), carbono (C), sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), aluminio (Al), fósforo (P) y cloro (Cl) en las emisiones vehiculares de diésel. Estos elementos provienen de aditivos de combustibles, desgaste de neumáticos y frenos, y la resuspensión de partículas del pavimento. Searle (2001) detectó aluminio (Al), silicio (Si), hierro (Fe), calcio (Ca), azufre (S), sodio (Na) y zinc (Zn) en sus resultados de las emisiones de material particulado. Las actividades de construcción también contribuyen a la contaminación del aire. Song et al. (2015) identificaron carbono (C), oxígeno (O) y calcio (Ca) en el polvo generado por estas actividades. Además de las fuentes antropogénicas, las fuentes naturales también juegan un papel importante en la composición del material particulado. Ottelé et al. (2010) y Song et al. (2015) identificaron carbono (C), oxígeno (O), silicio (Si), calcio (Ca), sodio (Na) y magnesio (Mg) en fuentes naturales como la erosión del suelo, emisiones volcánicas, aerosoles marinos y polvo transportado por el viento. Finalmente, los aerosoles carbonáceos, compuestos por hollín y material orgánico particulado, son importantes en la contaminación del aire. Galvez et al. (2022) detectaron oxígeno (O), nitrógeno (N), carbono (C) y azufre (S) en su composición. Estos aerosoles son asociados con la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa.

Nuestros resultados revelan que entre los elementos más predominantes se encuentra el carbono. Esta observación concuerda con un estudio realizado en Islamabad, Pakistán, donde se obtuvieron concentraciones elevadas de silicio y carbono. Estos hallazgos sugieren la presencia de partículas minerales provenientes del

suelo, así como de carbono derivado de diversas actividades antropogénicas. Los altos niveles de partículas de carbono, conocidas por adsorber varios compuestos semivolátiles, plantean preocupaciones significativas en materia de salud pública (Hussain et al., 2024).

La morfología de las diferentes partículas recolectadas en los filtros de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> fue estudiada mediante las microfotografías del SEM, revelando características microestructurales clave. En general, se observó una mezcla de partículas con morfología irregular y esférica, lo cual sugiere una combinación de fuentes naturales y antropogénicas.

En diversos puntos de muestreo en la ciudad del Cusco, las partículas de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> mostraron características morfológicas similares. Las partículas irregulares y esféricas fueron predominantes, lo que sugiere una mezcla de fuentes. Las formas esféricas pequeñas, que pueden provenir de emisiones vehiculares y tipos de combustibles, se observaron consistentemente en todas las muestras, lo cual es coherente con estudios previos (Yin et al., 2013; Zeb et al., 2018; Goel et al., 2020). Las partículas irregulares grandes, observadas en varios puntos de muestreo, indican la resuspensión de suelos y actividades industriales. La presencia de partículas esféricas porosas, especialmente en áreas cercanas a fuentes industriales, sugiere procesos de combustión incompleta y emisiones industriales (Bora et al., 2021; Rana et al., 2022). La combinación de partículas esféricas y morfologías irregulares con bordes afilados en las muestras sugiere una influencia significativa de fuentes vehiculares y procesos de mantenimiento de carreteras, además de las emisiones industriales. Estos resultados son consistentes con estudios que han identificado partículas similares en áreas urbanas con alta actividad vehicular e industrial (Satsangi y Yadav, 2014; Goel et al., 2020). También se observaron partículas en forma de

lámina que pueden ser atribuidas al desgaste de las llantas de los vehículos de transporte público (Alberto y Pineda, 2020).

En el análisis de los resultados, se identificó mayor presencia y variabilidad en el porcentaje de elementos en puntos específicos de muestreo. En particular, para PM10, los puntos de muestreo S6 del 2018, en la Composición Elemental y Análisis Espectral del filtro 101 del Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos en Wanchaq, y S4 del año 2017, en la Composición Elemental y Análisis Espectral del filtro 83 en el sitio de monitoreo Colegio Clorinda Matto de Turner, Cusco, los cuales presentaron los mayores porcentajes de Carbono y Aluminio.

Para PM2.5, las mayores cuentas de los elementos detectados se encontraron en la Composición Elemental y Análisis Espectral del filtro 163 del sitio de monitoreo Calle Matará, Cusco (S12, año 2018), y en el sitio S2 del año 2017 (Código de Filtro: 42), en la Composición Elemental y Análisis Espectral del filtro 42 en el sitio de monitoreo Paraíso de Fátima, San Sebastián.

Por el contrario, para las partículas PM2.5 y PM10, se detectaron menos cuentas de elementos en el sitio de muestreo de San Blas, lo que indica una menor presencia de contaminantes en esta área en comparación con los otros sitios evaluados.

Esta combinación de análisis elemental y morfológico es esencial para una caracterización completa del material particulado los materiales, permitiéndonos identificar las posibles fuentes de emisión del contaminante a través de su composición química y la estructura física de la partícula observada.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- i. Se caracterizó fisicoquímicamente el material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la ciudad del Cusco durante los años 2017, 2018 y 2020, logrando identificar quince elementos principales en las muestras analizadas: Carbono (C), aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), arsénico (As), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), potasio (K), azufre (S), bario (Ba), plomo (Pb), fósforo (P) y cloro (Cl). Estos hallazgos subrayan la complejidad y la naturaleza multicomponente del material particulado en la región, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones sobre contaminación atmosférica en entornos urbanos similares. Además, se verifica nuestra hipótesis de que la caracterización fisicoquímica del material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> evidencia la presencia de elementos químicos derivados de actividades antropogénicas y del tráfico vehicular, debido a la procedencia de los elementos identificados.
- ii. Se identificaron las fuentes de contaminación en función de los elementos encontrados, observándose variaciones significativas en la composición del material particulado en diferentes sitios de monitoreo. Tanto las fuentes antropogénicas, como el tráfico vehicular, las actividades industriales y de construcción, como las fuentes naturales, como el polvo suspendido y actividad biogénica, contribuyen significativamente a la composición del material particulado en Cusco. Se encontró que en los sitios con mayor incidencia de tráfico vehicular se registran mayores cuentas de elementos contaminantes. Este hallazgo

es crucial para el desarrollo de políticas ambientales efectivas, permitiendo enfocar los esfuerzos hacia la mitigación de emisiones provenientes de actividades humanas y procesos naturales.

- iii. Se analizaron los datos de concentración de material particulado en diversos puntos de muestreo, revelando una notable variación espacial y temporal en las concentraciones de elementos detectados. Por ejemplo, los puntos de muestreo S6 (Centro de Salud contiguo a la estación de bomberos, Wanchaq) y S4 (Colegio Clorinda Matto de Turner, Cusco) presentaron las mayores concentraciones de elementos para PM10 en los años 2018 y 2017, respectivamente. Para PM2.5, las mayores concentraciones se encontraron en los puntos de muestreo S12 (Calle Matará, Cusco) y S2 (Paraíso de Fátima, San Sebastián) en los años 2018 y 2017, respectivamente. Estas diferencias pueden atribuirse a factores como la densidad de tráfico, las actividades industriales específicas de cada zona y las condiciones meteorológicas locales, resaltando la importancia de un monitoreo continuo y localizado.
- iv. Respecto de la correlación de las concentraciones de PM2.5 y PM10 con variables meteorológicas, se concluye que las correlaciones de Pearson no mostraron una influencia significativa de factores como la temperatura media, la precipitación media o la presión media sobre las concentraciones de material particulado. Por tanto, este estudio enfatiza que las diversas fuentes de emisión, tanto antropogénicas como naturales, son los principales contribuyentes a la contaminación por PM2.5 y PM10. Este hallazgo es fundamental para reevaluar las

estrategias de control de la contaminación, enfocándose más en las fuentes de emisión directas.

- v. La utilización del SEM-EDS ha sido esencial para identificar los elementos químicos presentes en las partículas y su variación según los puntos de muestreo. Esta metodología ha demostrado ser una herramienta poderosa para la caracterización detallada del material particulado, permitiendo la detección precisa de elementos traza y mayoritarios en las partículas. En nuestro estudio, se encontró que los tres elementos más abundantes fueron, en su mayoría, el carbono, el aluminio y una fluctuación entre sodio, calcio y magnesio. Los elementos que menos contribuían eran el cloro, el fósforo. Este enfoque debería considerarse en estudios futuros de monitoreo ambiental para mejorar la comprensión de la composición del material particulado y sus posibles fuentes.
- vi. Es urgente implementar estrategias integrales para reducir las emisiones de material particulado en Cusco, abordando las fuentes antropogénicas, como el transporte y la industria. Políticas que promuevan el uso de tecnologías limpias, el control de las emisiones industriales, la gestión adecuada de la construcción y la mejora de las infraestructuras de transporte podrían ser efectivas para mitigar la contaminación atmosférica en la región. Además, la educación y concientización de la población sobre prácticas sostenibles es crucial para el éxito de estas estrategias.

## 5.2.Recomendaciones

- La evaluación de la calidad del aire en la ciudad del Cusco es compleja, por lo que es necesario continuar con la investigación y mediciones de material particulado tanto de PM2.5 como de PM10; sin embargo, para realizar esto es necesario mayor apoyo a la investigación científica por parte de las instituciones encargadas de financiar estas iniciativas científicas.
- También es necesario que las muestras de material particulado obtenidas durante los años 2017, 2018 y 2020, sean caracterizadas por otras técnicas adicionales tales como el XRF, RAMAN, FTIR, entre otras. Esto para realizar un análisis más profundo en función a las principales fuentes de contaminantes en la ciudad del Cusco y para evaluar las variabilidades en el tiempo y espacio del material particulado.
- Se recomienda implementar un sistema de monitoreo integrado que combine mediciones estacionarias de material particulado con una estación meteorológica fija en el mismo punto. Esta configuración permitirá una evaluación más precisa y detallada de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre las concentraciones de material particulado. La recolección de datos simultáneos y continuos facilitará un análisis más robusto de las correlaciones entre las variables atmosféricas y los niveles de contaminación, mejorando así la comprensión de la dinámica de la calidad del aire en la zona de estudio.
- Se sugiere llevar a cabo investigaciones que profundicen en la relación

entre las diferentes enfermedades y los elementos químicos identificados en el material particulado en la ciudad del Cusco. El análisis detallado de la composición química del material particulado, junto con datos epidemiológicos específicos de la región, podría proporcionar información crucial para desarrollar estrategias de prevención más efectivas y políticas de salud pública adaptadas a las necesidades particulares de la población cusqueña.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdillah, S. F. I., & Wang, Y. F. (2023). Ambient ultrafine particle (PM<sub>0.1</sub>): Sources, characteristics, measurements and exposure implications on human health. *Environmental Research*, 218, 115061. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.115061>
- Alberto, D., & Pineda, F. (2020). ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM 10 Y PM 2.5 EN LA CIUDAD DE MANIZALES. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Al-Easawi, N. A. F. (2023). Estimation of the Concentrations of Some Pollutants Resulting from the Use of Arabian Bakhour and Their Effect in Patients with Asthma in the City of Baghdad. *International Journal of Environmental Science and Development*, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.18178/IJESD.2023.14.1.1413>
- Alexandrina, E. C., Schornobay-Lui, E., Corrêa, N. A., & Aguiar, M. L. (2014). CARACTERIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL PARTICULADO GROSSO (MP 10) DA CIDADE DE SÃO CARLOS (SP).
- Allen, A. G., Nemitz, E., Shi, J. P., Harrison, R. M., & Greenwood, J. C. (2001). Size distributions of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom. *Atmospheric Environment*, 35(27), 4581-4591. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00190-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00190-X)
- Arif, I., Adams, M. D., & Johnson, M. T. J. (2024). A meta-analysis of the carcinogenic effects of particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Pollution*, 351, 123941. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2024.123941>
- 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* 2022, Vol. 12, Page 2656, 12(15), 2656. <https://doi.org/10.3390/NANO12152656>
- Brostrøm, A., Kling, K. I., Hougaard, K. S., & Mølhøve, K. (2020). Complex Aerosol

- Characterization by Scanning Electron Microscopy Coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65383-5>
- Brunekreef, B., & Forsberg, B. (2005). Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health. *European Respiratory Journal*, 26(2), 309-318. <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00001805>
- Bunge, M. (1957). Mario-Bunge-la-Ciencia-su-Metodo-y-Filosofia. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Carrión, M. F. V. (2018). Análisis y Caracterización del Material Particulado Atmosférico. En *Academia*. [https://www.academia.edu/35808371/An%C3%A1lisis\\_y\\_Caracterizaci%C3%B3n\\_del\\_Material\\_Particionado\\_Atmosf%C3%A9rico](https://www.academia.edu/35808371/An%C3%A1lisis_y_Caracterizaci%C3%B3n_del_Material_Particionado_Atmosf%C3%A9rico)
- Ceppi, S. A. (2012). Espectroscopía de emisión  $K\beta$  de rayos X de alta resolución. Instrumentación y aplicaciones. por. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA*.
- Chen, R., Hu, B., Liu, Y., Xu, J., Yang, G., Xu, D., & Chen, C. (2016). Beyond PM<sub>2.5</sub>: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1860(12), 2844-2855. <https://doi.org/10.1016/J.BBAGEN.2016.03.019>
- Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., & Countess, R. J. (1996). Sources and chemistry of PM<sub>10</sub> aerosol in Santa Barbara County, CA. *Atmospheric Environment*, 30(9), 1489-1499. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00363-0](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00363-0)
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., ... Forouzanfar, M. H. (2017). 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*,

- 389(10082), 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Copat, C., Cristaldi, A., Fiore, M., Grasso, A., Zuccarello, P., Signorelli, S. S., Conti, G. O., & Ferrante, M. (2020). The role of air pollution (PM and NO<sub>2</sub>) in COVID-19 spread and lethality: A systematic review. *Environmental Research*, *191*, 110129. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2020.110129>
- Cormier, S. A., Lomnicki, S., Backes, W., & Dellinger, B. (2006). Origin and health impacts of emissions of toxic by-products and fine particles from combustion and thermal treatment of hazardous wastes and materials. *Environmental Health Perspectives*, *114*(6), 810-817. <https://doi.org/10.1289/EHP.8629/ASSET/F13B1965-67DC-4876-892F-08F8D070726E/ASSETS/GRAPHIC/EHP0114-000810F3.JPG>
- De La Cruz, A. H., Roca, Y. B., Suarez-Salas, L., Pomalaya, J., Tolentino, D. A., & 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* 2019, *Vol. 10*, Page 21, *10*(1), 21. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10010021>
- Deabji, N., Fomba, K. W., dos Santos Souza, E. J., Mellouki, A., & Herrmann, H. (2024). Influence of anthropogenic activities on metals, sugars and PAHs in PM<sub>10</sub> in the city of Fez, Morocco: Implications on air quality. *Environmental Science and Pollution Research* 2024 *31:17*, *31*(17), 25238-25257. <https://doi.org/10.1007/S11356-024-32740-0>
- DIGESA. (2005). *DIGESA - DIRECCION GENERAL DE SALUD AMBIENTAL PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y GESTIÓN DE LOS DATOS 2005 CONTENIDO*.
- Doğan, B., Ben Jebli, M., Shahzad, K., Farooq, T. H., & Shahzad, U. (2020). Investigating the Effects of Meteorological Parameters on COVID-19: Case Study of New Jersey, United States. *Environmental Research*, *191*, 110148. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2020.110148>

- Dutta, A., & Chavalparit, O. (2023). Assessment of health burden due to the emissions of fine particulate matter from motor vehicles: A case of Nakhon Ratchasima province, Thailand. *Science of The Total Environment*, 872, 162128. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.162128>
- ElSharkawy, M. F., & Javed, W. (2018). Study of indoor air quality level in various restaurants in Saudi Arabia. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(5), 1713-1721. <https://doi.org/10.1002/EP.12859>
- Evangelopoulos, D., Perez-Velasco, R., Walton, H., Gumy, S., Williams, M., Kelly, F. J., & Künzli, N. (2020). The role of burden of disease assessment in tracking progress towards achieving WHO global air quality guidelines. *International Journal of Public Health*, 65(8), 1455-1465. <https://doi.org/10.1007/S00038-020-01479-Z/FIGURES/3>
- Fang, D., Wang, Q., Li, H., Yu, Y., Lu, Y., & Qian, X. (2016). Mortality effects assessment of ambient PM<sub>2.5</sub> pollution in the 74 leading cities of China. *Science of The Total Environment*, 569-570, 1545-1552. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.06.248>
- Farahani, V. J., Altuwayjiri, A., Pirhadi, M., Verma, V., Ruprecht, A. A., Diapouli, E., Eleftheriadis, K., & Sioutas, C. (2022). The oxidative potential of particulate matter (PM) in different regions around the world and its relation to air pollution sources. *Environmental Science: Atmospheres*, 2(5), 1076-1086. <https://doi.org/10.1039/d2ea00043a>
- Faraji Ghasemi, F., Dobaradaran, S., Saeedi, R., Nabipour, I., Nazmara, S., Ranjbar Vakil Abadi, D., Arfaeinia, H., Ramavandi, B., Spitz, J., Mohammadi, M. J., & Keshtkar, M. (2020). Levels and ecological and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound heavy metals in the northern part of the Persian Gulf. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(5), 5305-5313. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-07272-7/METRICS>
- Feng, H., Qian, Y., Cochran, J. K., Zhu, Q., Hu, W., Yan, H., Li, L., Huang, X., Chu, Y. S.,

- Liu, H., Yoo, S., & Liu, C. J. (2017). Nanoscale measurement of trace element distributions in *Spartina alterniflora* root tissue during dormancy. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/srep40420>
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., & Wang, X. (2016). The health effects of ambient PM<sub>2.5</sub> and potential mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 67-74. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2016.01.030>
- Fung, Y. S., & Wong, L. W. Y. (1995). Apportionment of air pollution sources by receptor models in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 29(16), 2041-2048. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00239-H](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00239-H)
- Galvez, M. C. D., Vallar, E., Castilla, R. M., Mandia, P., Branzuela, R., Rempillo, O., Orbecido, A. H., Beltran, A., Ledesma, N., Deocarís, C., Morris, V., & Belo, L. P. (2022). *Principal Component Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Aerosols from Meycauayan, Bulacan, Philippines*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202202.0120.V1>
- GHCND. (s. f.). *Global Historical Climatology Network daily (GHCNd) | National Centers for Environmental Information (NCEI)*. Recuperado 7 de mayo de 2024, de <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily>
- Goel, V., Mishra, S. K., Ahlawat, A., Kumar, P., Senguttuvan, T. D., Sharma, C., & Reid, J. S. (2020). Insights into coarse particle optics based on field evidence of particle morphology, chemical composition and internal structure. *Atmospheric Environment*, 232, 117338. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2020.117338>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 1-550. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676->

9/COVER

- González Mancera, G., & Noguez Amaya, E. (2006). *Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química*.
- Grechkin, A. V., Kotlyarenko, A. V., & Kutenev, V. F. (2021). Scientific problems in the field of research of non-exhaust particulate matter emissions formed during the movement of wheeled vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 867(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012088>
- Hara, T., Inubushi, Y., Katayama, T., Sato, T., Tanaka, H., Tanaka, T., Togashi, T., Togawa, K., Tono, K., Yabashi, M., & Ishikawa, T. (2013). Two-colour hard X-ray free-electron laser with wide tunability. *Nature Communications* 2013 4:1, 4(1), 1-5. <https://doi.org/10.1038/ncomms3919>
- Hasabeldaim, E. H. H., Ntwaeaborwa, O. M., Kroon, R. E., Coetsee, E., & Swart, H. C. (2019). Cathodoluminescence degradation study of the green luminescence of ZnO nanorods. *Applied Surface Science*, 484, 105-111. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2019.04.113>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación -sampieri- 6ta EDICION*.
- Hubbard, J. A., Haglund, J. S., & Ezekoye, O. A. (2009). Simulation of the evolution of particle size distributions containing coarse particulate in the atmospheric surface layer with a simple convection-diffusion-sedimentation model. *Atmospheric Environment*, 43(29), 4435-4443. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2009.06.020>
- Hussain, S., Siddique, A., Hassan, M., Rasool, K., Shahzad, A., Asad Naqvi, S. A., & Ul Mustafa, M. R. (2024). Characteristics and health implications of fine particulate matter near urban road site in Islamabad, Pakistan. *Environmental Research*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118862>
- INEI. (2018). *INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA - TOMO I - CUSCO: RESULTADOS DEFINITIVOS*.

- J. A. Bearden. (1967). X-Ray Wavelengths. *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, 39(1), 78-124.
- JEOL. (s. f.). *Energy table for EDS analysis*. Recuperado 27 de mayo de 2024, de <https://www.unamur.be/services/microscopie/sme-documents/Energy-20table-20for-20EDS-20analysis-1.pdf>
- JEOL Company. (s. f.). *NeoScope TM JCM-7000 BENCHTOP SEM*.
- Jiao, A., Headon, K., Han, T., Umer, W., & Wu, J. (2024). Associations between short-term exposure to wildfire particulate matter and respiratory outcomes: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 907, 168134. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168134>
- Jiao, F., & Frei, H. (2009). Nanostructured Cobalt Oxide Clusters in Mesoporous Silica as Efficient Oxygen-Evolving Catalysts. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(10), 1841-1844. <https://doi.org/10.1002/ANIE.200805534>
- Josa-Culleré, A., Basagaña, X., Koch, S., Arbillaga-Etxarri, A., Balcells, E., Bosch de Basea, M., Celorrio, N., Foraster, M., Rodriguez-Roisin, R., Marin, A., Peralta, G. P., Rodríguez-Chiaradia, D. A., Simonet, P., Torán-Monserrat, P., Vall-Casas, P., & Garcia-Aymerich, J. (2024). Short-term effects of air pollution and weather on physical activity in patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD). *Environmental Research*, 247, 118195. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.118195>
- Kabir, A., Chowdhury, M. A., Hossain, N., Islam, M. A., Aoyon, H., & Masud Rana, M. (2023). Graphene reinforced 3D printed polymer nanocomposites for diverse applications. *Results in Chemistry*, 6, 101197. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2023.101197>
- Karen Alfonso, Astrid Consuegra, & Jaime Aguilar-Arias. (2023). *Particulate matter 10 µm (PM 10), 2.5 µm (PM 2.5) datasets gathered by direct measurement, low-cost sensor and by public air quality stations in Fontibón, Bogotá D.C., Colombia*.

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.6439400.v7>

- Khaltayev, N., & Axelrod, S. (2024). Cardiovascular disease mortality and air pollution in countries with different socioeconomic status. *Chronic Diseases and Translational Medicine*. <https://doi.org/10.1002/CDT3.116>
- Kim, K. H., Lee, J. H., & Jang, M. S. (2002). Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea. *Environmental Pollution*, 118(1), 41-51. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00279-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00279-2)
- Leão, M. L. P., Zhang, L., & da Silva Júnior, F. M. R. (2023). Effect of particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) on health indicators: climate change scenarios in a Brazilian metropolis. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(5), 2229-2240. <https://doi.org/10.1007/S10653-022-01331-8/TABLES/5>
- Mai, H., Shiraiwa, M., Flagan, R. C., & Seinfeld, J. H. (2015). Under What Conditions Can Equilibrium Gas-Particle Partitioning Be Expected to Hold in the Atmosphere? *Environmental Science and Technology*, 49(19), 11485-11491. [https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B02587/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ES-2015-02587H\\_0005.GIF](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B02587/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ES-2015-02587H_0005.GIF)
- Mainka, A. (2021). Children health risk assessment of metals in total suspended particulate matter (Tsp) and pm<sub>1</sub> in kindergartens during winter and spring seasons. *Atmosphere*, 12(9), 1096. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12091096/S1>
- Marina-Montes, C., Pérez-Arribas, L. V., Anzano, J., de Vallejuelo, S. F. O., Aramendia, J., Gómez-Nubla, L., de Diego, A., Manuel Madariaga, J., & Cáceres, J. O. (2022). Characterization of atmospheric aerosols in the Antarctic region using Raman Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120452>

- Martins, N. R., & Carrilho da Graça, G. (2018). Impact of PM<sub>2.5</sub> in indoor urban environments: A review. *Sustainable Cities and Society*, 42, 259-275. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.07.011>
- Martori, J. C., Lagonigro, R., & Iglesias-Pascual, R. (2022). Social status and air quality in Barcelona: A socio-ecological approach. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104210. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.104210>
- MINAM. (2019). *Decreto Supremo que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire | SINIA*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>
- Mishra, A., Pervez, S., Verma, M., Candeias, C., Pervez, Y. F., Dugga, P., Verma, S. R., Karbhal, I., Ghosh, K. K., Deb, M. K., Satnami, M. L., Shrivastava, K., & Tamrakar, A. (2023). Chemical fractionation of particulate-bound metal(loid)s to evaluate their bioavailability, sources and associated cancer risk in India. *Science of The Total Environment*, 857, 159516. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159516>
- Mushtaq, Z., Bangotra, P., Banerjee, S., Ashish, A., & Suman. (2023). Study of elemental concentration, surface morphology and chemical characterization of atmospheric aerosols and trace gases in an urban environment (India). *Urban Climate*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101377>
- Mushtaq, Z., Bangotra, P., Gautam, A. S., Sharma, M., Suman, Gautam, S., Singh, K., Kumar, Y., & Jain, P. (2024). Satellite or ground-based measurements for air pollutants (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) data and their health hazards: which is most accurate and why? *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4), 1-25. <https://doi.org/10.1007/S10661-024-12462-Z/METRICS>
- Nagar, P. K., Singh, D., Sharma, M., Kumar, A., Aneja, V. P., George, M. P., Agarwal, N., & Shukla, S. P. (2017). Characterization of PM<sub>2.5</sub> in Delhi: role and impact of secondary

- aerosol, burning of biomass, and municipal solid waste and crustal matter. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 25179-25189. <https://doi.org/10.1007/S11356-017-0171-3/METRICS>
- Ochoa-Pachas, Romero, Y.-, & Perú, Y. (. (2019). El estudio descriptivo en la investigación científica. *ACTA JURÍDICA PERUANA*, 2(2). <http://201.234.119.250/index.php/AJP/article/view/224>
- OMS. (2005). *Organización Mundial de la Salud. WHO air quality guidelines relating to particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide*. [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- OMS. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la C. y la C. (s. f.). *Centro del Patrimonio Mundial - CUSCO*. Recuperado 27 de mayo de 2024, de <https://whc.unesco.org/es/list/273>
- Oroji, B., Solgi, E., & Sadighzadeh, A. (2018). Recognition of the source and nature of atmospheric aerosols in Tehran, Iran. En *Aerosol and Air Quality Research* (Vol. 18, Número 8, pp. 2131-2140). AAGR Aerosol and Air Quality Research. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0098>
- Ottelé, M., van Bohemen, H. D., & Fraaij, A. L. A. (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 36(2), 154-162. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2009.02.007>
- Park, J. I., Kim, M. S., Yeo, M., Choi, M., Lee, J. Y., Natsagdorj, A., Kim, C., Song, M., & Jang, K. S. (2023). Chemical and morphological characterization by SEM–EDS of PM2.5

- collected during winter in Ulaanbaatar, Mongolia. *Atmospheric Environment*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119752>
- Patel, N., Lalwani, D., Gollmer, S., Injeti, E., Sari, Y., & Nesamony, J. (2016). Development and evaluation of a calcium alginate based oral ceftriaxone sodium formulation. *Progress in Biomaterials*, 5(2), 117-133. <https://doi.org/10.1007/S40204-016-0051-9/FIGURES/7>
- Pearce, J. L., Aguilar-Villalobos, M., Rathbun, S. L., & Naeher, L. P. (2009). Residential Exposures to PM<sub>2.5</sub> and CO in Cusco, A High-Altitude City in the Peruvian Andes: A Pilot Study. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 64(4), 278-282. <https://doi.org/10.1080/19338240903338205>
- Perera, R. C. C. (1992). Photon excitation for satellite-free X-ray spectroscopy: Instrumentation challenges. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 319(1-3), 277-284. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90566-M](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90566-M)
- Pope, A. C., Burnett, R. T., Krewski, D., Jerrett, M., Shi, Y., Calle, E. E., & Thun, M. J. (2009). Cardiovascular Mortality and Exposure to Airborne Fine Particulate Matter and Cigarette Smoke. *Circulation*, 120(11), 941-948. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.109.857888>
- PRAL. (2006). *PROGRAMA REGIONAL DE AIRE LIMPIO*. <https://core.ac.uk/download/pdf/48031408.pdf>
- Prodana, M., Ionita, D., Stoian, A. B., Demetrescu, I., Mihai, G. V., & Enăchescu, M. (2023). The Design and Characterization of New Chitosan, Bioglass and ZnO-Based Coatings on Ti-Zr-Ta-Ag. *Coatings 2023, Vol. 13, Page 493, 13(3), 493*. <https://doi.org/10.3390/COATINGS13030493>
- Quijano, M. F. C., Mateus, V. L., Saint’Pierre, T. D., Bott, I. S., & Gioda, A. (2019). Exploratory and comparative analysis of the morphology and chemical composition of

- PM 2.5 from regions with different socioeconomic characteristics. *Microchemical Journal*, 147, 507-515. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.071>
- Rahman, M. S., Bhuiyan, S. S., Ahmed, Z., Saha, N., & Begum, B. A. (2021). Characterization and source apportionment of elemental species in PM<sub>2.5</sub> with especial emphasis on seasonal variation in the capital city “Dhaka”, Bangladesh. *Urban Climate*, 36, 100804. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2021.100804>
- Ranzani, O., Alari, A., Olmos, S., Milà, C., Rico, A., Basagaña, X., Dadvand, P., Duarte-Salles, T., Forastiere, F., Nieuwenhuijsen, M., Vivanco-Hidalgo, R. M., & Tonne, C. (2024). Who is more vulnerable to effects of long-term exposure to air pollution on COVID-19 hospitalisation? *Environment International*, 185, 108530. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2024.108530>
- Rojas, E. J. T., Arias, J. F. G., Rivera, A. R. P., Rafael, M. H. P., & Chaca, M. D. (2023). Phytotoxic effect of particulate matter PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the city of Juliaca, Peru. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 63(2), 543-557. <https://doi.org/10.52808/bmsa.8e7.632.026>
- Saju, J. A., Bari, Q. H., Mohiuddin, K. A. B. M., & Strezov, V. (2023). Measurement of ambient particulate matter (PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) in Khulna City of Bangladesh and their implications for human health. *Environmental Systems Research*, 12(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/S40068-023-00327-2/TABLES/6>
- Saleem, N. F., ElSharkawy, M. F., & Azoz, A. M. (2022). Effect of Airborne Particulate Matter on Cardiovascular Diseases. *Atmosphere 2022, Vol. 13, Page 2030*, 13(12), 2030. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13122030>
- Sánchez-Soberón, F., Rovira, J., Mari, M., Sierra, J., Nadal, M., Domingo, J. L., & Schuhmacher, M. (2015). Main components and human health risks assessment of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub> in two areas influenced by cement plants. *Atmospheric Environment*,

120, 109-116. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2015.08.020>

Satsangi, P. G., & Yadav, S. (2014). Characterization of PM<sub>2.5</sub> by X-ray diffraction and scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometer: Its relation with different pollution sources. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(1), 217-232. <https://doi.org/10.1007/S13762-012-0173-0/METRICS>

Searle, D. E. (2001). *The comparative effects of diesel and coal particulate matter on the deterioration of Hollington sandstone and Portland limestone.*

Shao, L., Cao, Y., Jones, T., Santosh, M., Silva, L. F. O., Ge, S., da Boit, K., Feng, X., Zhang, M., & Bérubé, K. (2022). COVID-19 mortality and exposure to airborne PM<sub>2.5</sub>: A lag time correlation. *Science of The Total Environment*, 806, 151286. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151286>

Sielicki, P., Janik, H., Guzman, A., Reynolds, A., & Namieśnik, J. (2011). Analysis of airborne metal containing particles with EDX/EDS detectors in electron microscopes. *Central European Journal of Chemistry*, 9(2), 308-313. <https://doi.org/10.2478/s11532-010-0144-6>

Silveira, R. S., Corrêa, S. M., & de M. Neto, N. (2022). Possible influence of shipping emissions on metals in size-segregated particulate matter in Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(11), 1-15. <https://doi.org/10.1007/S10661-022-10517-7/FIGURES/9>

Sinha, A., Ischia, G., Straffelini, G., & Gialanella, S. (2021). A new sample preparation protocol for SEM and TEM particulate matter analysis. *Ultramicroscopy*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2021.113365>

Song, Y., Maher, B. A., Li, F., Wang, X., Sun, X., & Zhang, H. (2015). Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution. *Atmospheric Environment*, 105, 53-60.

<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2015.01.032>

Stephen, B., Olarte, W., Cesar, I., Hankgo, M., Ruben, I., Ccolque, Q., Ponce Amanca, R. E., Fernando, V., Salcedo, R., Isabel, A., Ponce De Leon, Z., Latorre, R. A., Lucas, J., & Ascarza, W. (2023). Evaluación de la Contaminación del Aire por Material Particulado PM2.5 en la ciudad del Cusco Respecto de los Índices de Calidad del Aire entre 2017 y 2018. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 6(1), 1-15.

<https://doi.org/10.51343/RACS.V6I1.1112>

Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendezú, Y., & Pomalaya RESUMEN, J. (2017a). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO DEL CENTRO URBANO DE HUANCAYO, PERÚ. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(2), 187-199. <https://doi.org/10.37761/RSQP.V83I2.197>

Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendezú, Y., & Pomalaya RESUMEN, J. (2017b). Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(2), 187-199. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2017000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2017000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Tai, A. P. K., Mickley, L. J., & Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM2.5 to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3976-3984. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2010.06.060>

Taiwo, A. M., Beddows, D. C. S., Shi, Z., & Harrison, R. M. (2014). Mass and number size distributions of particulate matter components: Comparison of an industrial site and an urban background site. *Science of The Total Environment*, 475, 29-38. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.12.076>

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metal Toxicity

- and the Environment. *EXS*, 101, 133-164. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)
- Telloli, C., Chicca, M., Leis, M., & Vaccaro, C. (2016). Fungal spores and pollen in particulate matter collected during agricultural activities in the Po Valley (Italy). *Journal of Environmental Sciences*, 46, 229-240. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2016.02.014>
- Tierrafría, J. M. G. (2007). Caracterización por SEM-EDS de aeropartículas antrópicas de la fracción respirable en la ciudad de Querétaro y su relación con fuentes contaminantes. *Universidad Autónoma de Querétaro*. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/4756>
- Tiwari, A., Pandey, M., Tirkey, A., Tiwari, A., Dubey, R., & Pandey, S. K. (2024). Image based analytical approaches for study of particulate matter (PM) in air. En *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 12). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1362422>
- US-EPA. (s. f.). *NAAQS Table | US EPA*. Recuperado 23 de agosto de 2023, de <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- US-EPA. (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, 2004)*. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=87903&Lab=NCEA](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=87903&Lab=NCEA)
- US-EPA. (2018). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) | US EPA*. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., & Vlachogianni, T. (2008). Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26(4), 339-362. <https://doi.org/10.1080/10590500802494538>
- Verzellesi, G., Saguatti, D., Meneghini, M., Bertazzi, F., Goano, M., Meneghesso, G., & Zanoni, E. (2013). Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies. *Journal of Applied Physics*, 114(7).

<https://doi.org/10.1063/1.4816434/398955>

- Warthon, J., Alvarez, M., Olarte, A., Quispe, Y., Jalixto, V., Valencia, N., Mio-Diaz, M., Zamalloa, A., & Warthon, B. (2024). Reduction of the concentration of particulate material at a sampling point in Cusco city at the beginning of the pandemic. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50955-y>
- Wikuats, C. F. H., Nogueira, T., Squizzato, R., de Freitas, E. D., & Andrade, M. de F. (2023). Health Risk Assessment of Exposure to Air Pollutants Exceeding the New WHO Air Quality Guidelines (AQGs) in São Paulo, Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(9), 5707. <https://doi.org/10.3390/IJERPH20095707/S1>
- Yin, H., Mu, S., Zhao, L., Qi, X., & Pan, X. (2013). Microscopic morphology and elemental composition of size distributed atmospheric particulate matter in Urumqi, China. *Environmental Earth Sciences*, 69(7), 2139-2150. <https://doi.org/10.1007/S12665-012-2043-Y/METRICS>
- Zeb, B., Alam, K., Sorooshian, A., Blaschke, T., Ahmad, I., & Shahid, I. (2018). On the Morphology and Composition of Particulate Matter in an Urban Environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(6), 1431-1447. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2017.09.0340>
- Zgłobicki, W., & Baran-Zgłobicka, B. (2024). Air pollution in major Polish cities in the period 2005–2021: Intensity, effects and attempts to reduce it. *Environmental Research*, 240, 117497. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.117497>
- Zhang, Y., He, Q., Tong, X., Yin, P., Liu, Y., Meng, X., Gao, Y., Shi, S., Li, X., Kan, H., Zhou, M., Li, Y., & Chen, R. (2024). Differential associations of fine and coarse particulate air pollution with cause-specific pneumonia mortality: A nationwide, individual-level, case-crossover study. *Environmental Research*, 252, 119054. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.119054>

- Zhao, C., Xie, P., Yong, T., Huang, W., Liu, J., Wu, D., Ji, F., Li, M., Zhang, D., Li, R., Dong, C., Ma, J., Dong, Z., Liu, S., & Cai, Z. (2021). Airborne fine particulate matter induces cognitive and emotional disorders in offspring mice exposed during pregnancy. *Science Bulletin*, 66(6), 578-591. <https://doi.org/10.1016/J.SCIB.2020.08.036>
- Zhao, Y., Zhang, Z., Ji, C., Liu, L., Zhang, B., & Huan, C. (2019). Characterization of particulate matter from heating and cooling several edible oils. *Building and Environment*, 152, 204-213. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.02.007>
- Zilli Vieira, C. L., & Koutrakis, P. (2021). The impact of solar activity on ambient ultrafine particle concentrations: An analysis based on 19-year measurements in Boston, USA. *Environmental Research*, 201, 111532. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.111532>

## ANEXOS

### A1. HI-VOL 3000 DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE ENERGÍA Y ATMÓSFERA



*Fuente:* <https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/ACS/article/view/1112>

El Hi-Vol 3000 es un equipo de alto volumen para la medición de partículas en el aire, específicamente PM2.5 y PM10. Utilizado en el Centro de Investigación de Energía y Atmósfera, recolecta grandes volúmenes de aire en filtros especializados, permitiendo análisis detallados de la contaminación atmosférica.

## A2. SHELTER DE MONITOREO AMBIENTAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE ENERGÍA Y ATMÓSFERA



Fuente: <https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/ACS/article/view/1112>

El shelter de monitoreo ambiental del Centro de Investigación de Energía y Atmósfera es una cabina diseñada para proteger equipos de medición climática y de calidad del aire. Proporciona un entorno controlado para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos recolectados. Equipado con sistemas de energía autónomos y climatización, el shelter alberga sensores y dispositivos de muestreo que monitorean parámetros atmosféricos críticos.

### A3. MATERIAL PARTICULADO DEPOSITADO EN FILTROS DE CUARZO RECOLECTADOS EN EL AÑO 2017



Fuente: <https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/ACS/article/view/1112>

Los filtros de cuarzo utilizados en 2017 contienen material particulado recolectado, sirviendo como registro histórico de la contaminación atmosférica.

#### **A4. CAPACITACIONES SOBRE EL USO DE HI-VOL EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA (2022)**



En 2022, se realizaron capacitaciones en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa sobre el uso del Hi-Vol. Estas sesiones formaron a investigadores y técnicos en la operación y mantenimiento del equipo, asegurando una correcta recolección y análisis de datos. La capacitación incluyó prácticas en campo y laboratorio, mejorando la capacidad técnica para monitorear y gestionar la calidad del aire de manera precisa y confiable.

## A5. MEDICIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN EL COLEGIO CLORINDA MATTO DE TURNER EN EL AÑO 2017



Las mediciones en el Colegio Clorinda Matto de Turner incluyeron la colocación del Hi-Vol cerca de la Avenida de la Cultura y el Callejón Retiro. **Figura A** muestra el equipo instalado cerca de la avenida principal, mientras que **Figura B** compara un filtro blanco con uno que ha recolectado material particulado durante un día. Esta comparación visual ilustra claramente la cantidad de contaminantes presentes en el aire.

**A6. MEDICIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN CERCANIA AL MULTIRED DE LA PUERTA 05 EN EL AÑO 2020 DURANTE PANDEMIA**



A



B



Durante la pandemia, se realizaron mediciones de material particulado cerca del Multired de la Puerta 05 con el Hi-Vol ubicado a aproximadamente 20 metros de la Avenida de la Cultura. **Figura A** muestra el equipo en funcionamiento, **Figuras B** y **C** presentan la recolección de material particulado en un filtro de cuarzo en un día. Las imágenes reflejan la disminución del tráfico vehicular debido a las restricciones pandémicas y su impacto en la calidad del aire.

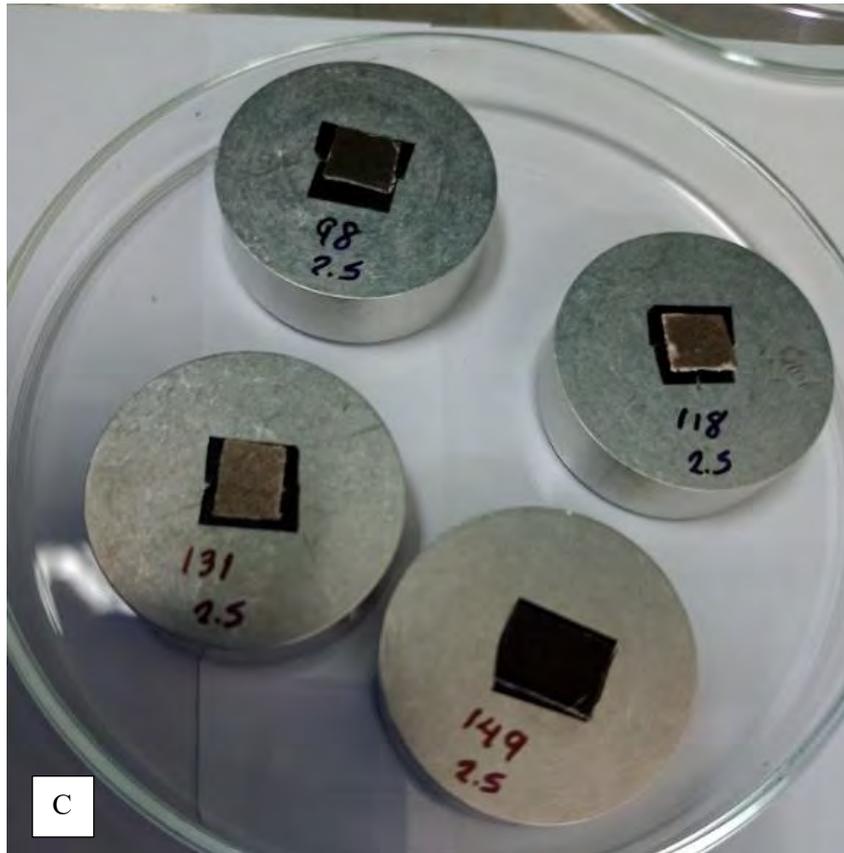
## A7. PROCESO GRAVIMÉTRICO DEL MATERIAL PARTICULADO EN EL AÑO 2020 DURANTE PANDEMIA



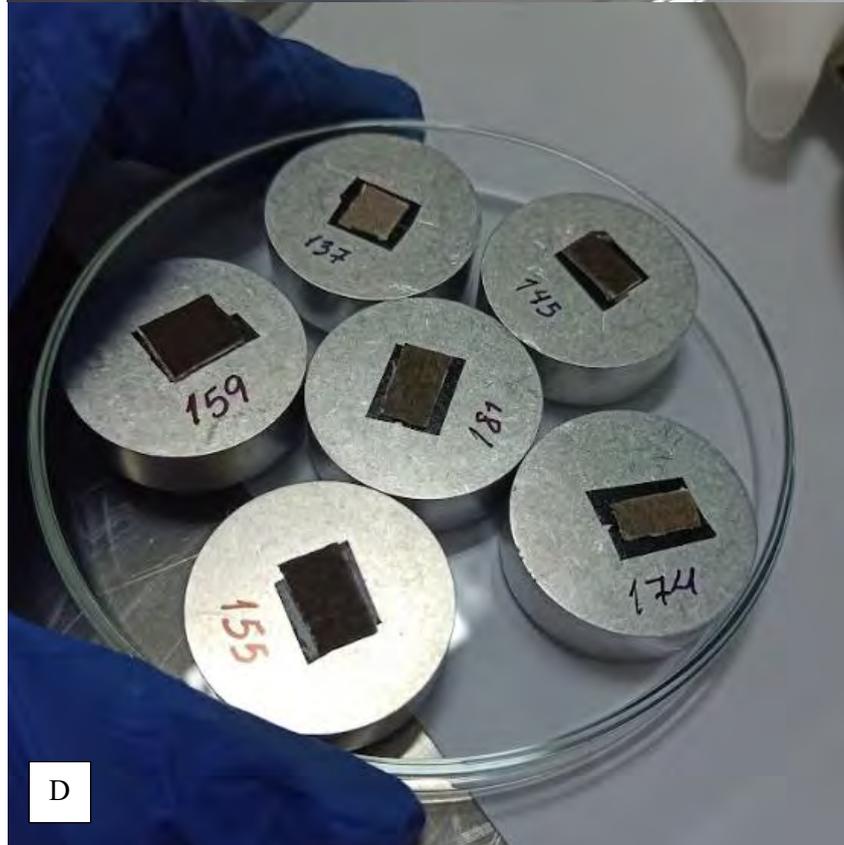
El proceso gravimétrico realizado durante la pandemia en el Centro de Investigación de Energía y Atmósfera siguió protocolos rigurosos para medir la masa del material particulado recolectado en los filtros. La figura muestra el equipo y las técnicas utilizadas para garantizar la precisión en la medición de la masa de partículas.

**A8. PREPARACION DE LAS MUESTRAS DE FILTROS DE MATERIAL PARTICULADO PARA PASAR AL SEM-EDX**

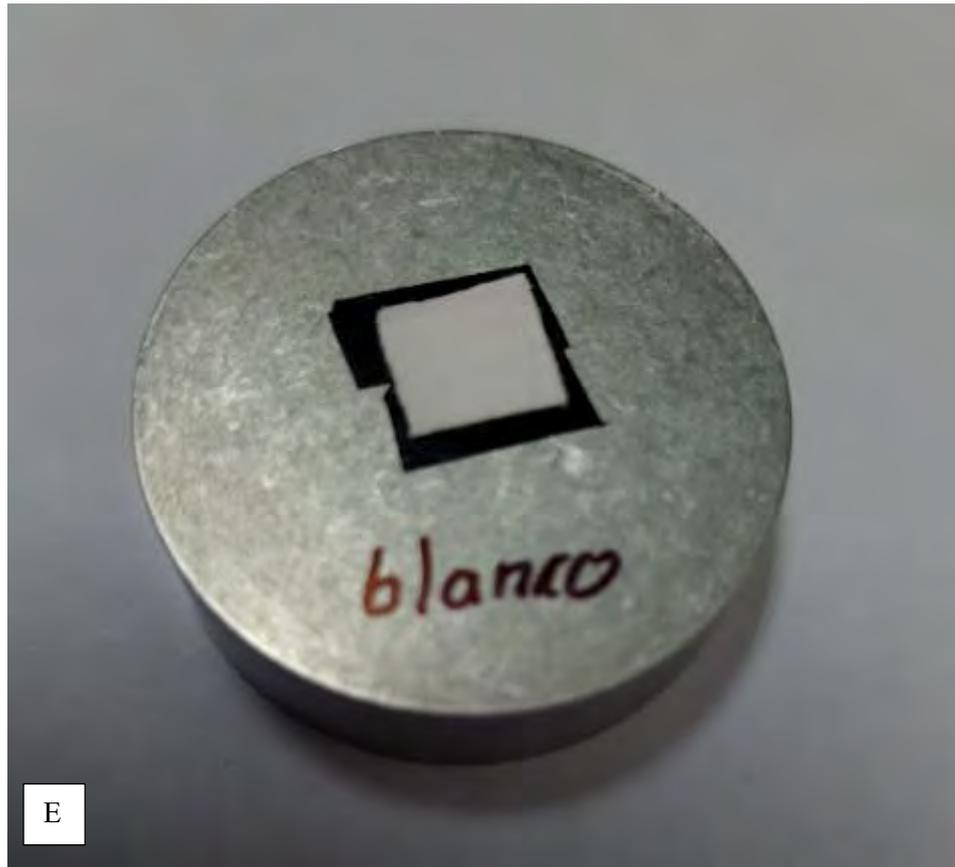




C



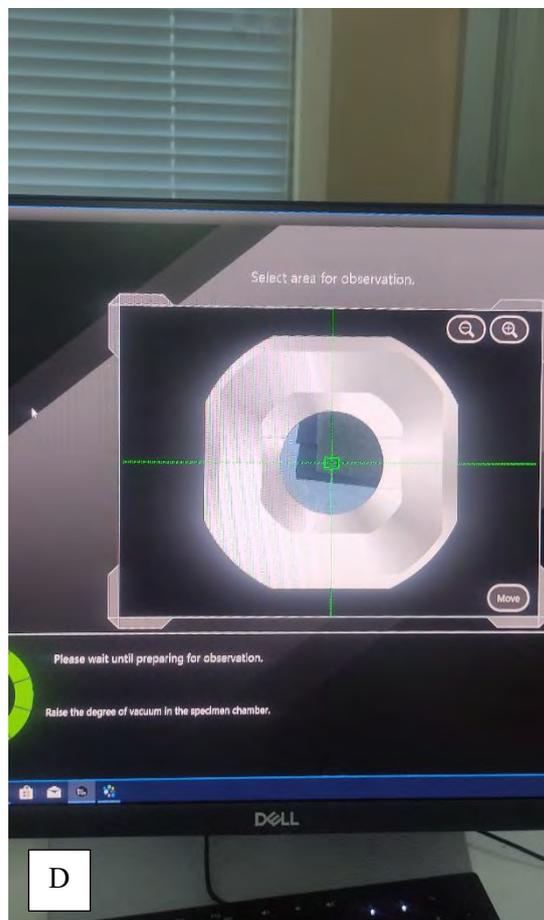
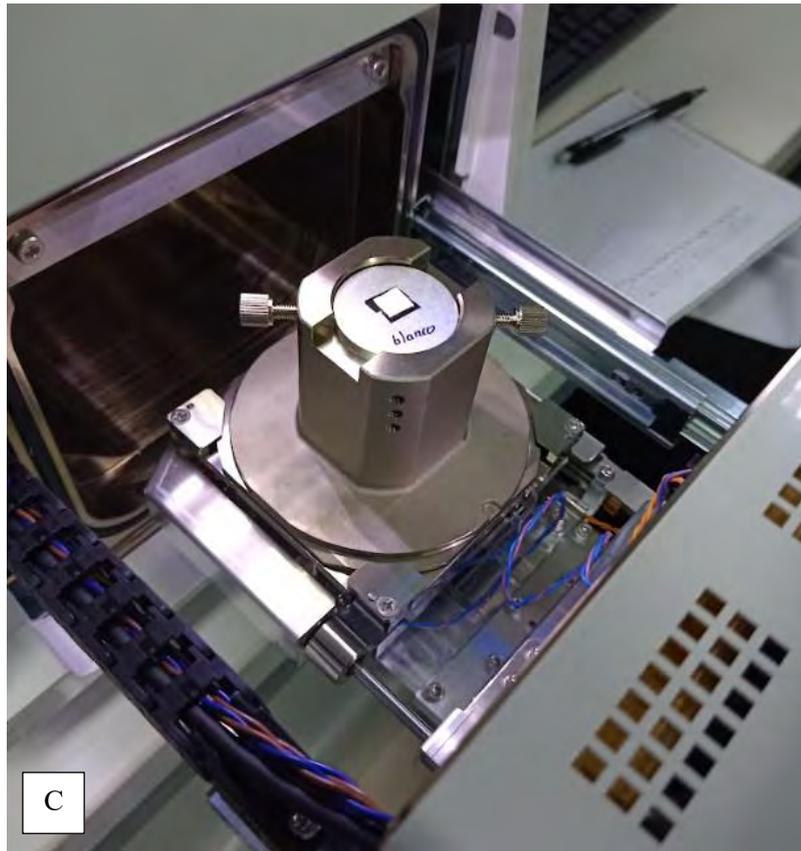
D



Las **Figuras A-E** ilustran las muestras y proceso de preparación de los filtros de cuarzo para su análisis en el SEM-EDX. Esto incluye cortar los filtros y colocarlos en cintas de carbón. Este procedimiento es crucial para asegurar una adecuada fijación de las muestras y obtener imágenes y análisis precisos del material particulado, facilitando la caracterización morfológica y composicional a nivel microscópico.

**A9. COLOCACIÓN DE LA MUESTRA DE FILTRO CON MATERIAL PARTICULADO AL SEM-EDX Y SELECCIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO**







E

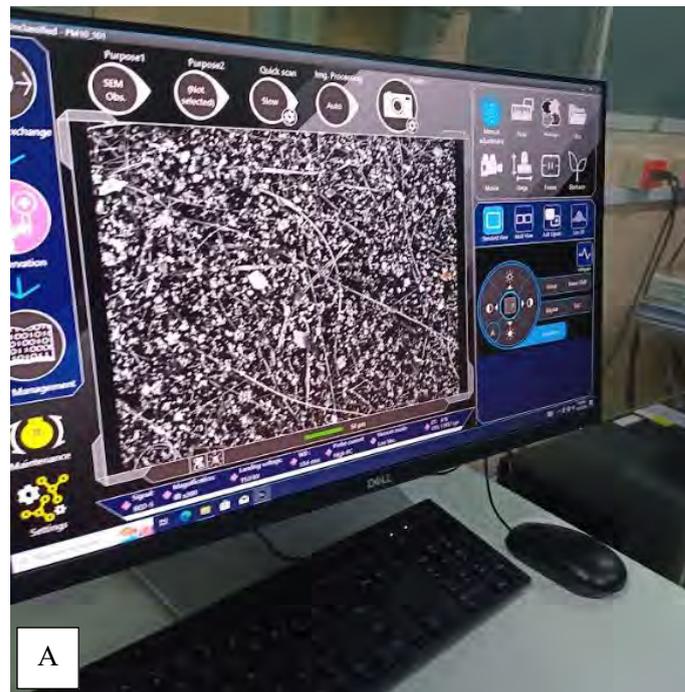


F

Las **Figuras A-C** muestran la colocación de los filtros con material particulado en el SEM-EDX, asegurando la distancia adecuada al sensor. Las **Figuras D-F** ilustran la selección del área de interés en las muestras para su análisis, tanto con material particulado como en filtros blancos. Este proceso garantiza que las áreas analizadas sean representativas y permite un estudio detallado de las características del material recolectado.

Las **Figuras A-C** muestran la colocación de los filtros con material particulado en el SEM-EDX, asegurando la distancia adecuada al sensor. Las **Figuras D-F** ilustran la selección del área de interés en los filtros para su análisis, tanto con material particulado como en filtros blancos. Este proceso garantiza que las áreas analizadas sean representativas y permite un estudio detallado de las características del material recolectado.

## A10. VISUALIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PRESENTE EN EL FILTRO OBSERVADO EN EL SOFTWARE PROPIO DEL SEM MARCA JEOL



La **Figura A** muestra un filtro de cuarzo con material particulado utilizando el software del SEM JEOL, mientras que la **Figura B** presenta un filtro sin contaminantes. Estas visualizaciones permiten una inspección detallada de la morfología y distribución de las partículas, proporcionando datos esenciales para el análisis de fuentes de contaminación.

## A11. CÓDIGO EN PYTHON PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL TOTAL DE DATOS DE MATERIAL PARTICULADO

Este código en Python utiliza la biblioteca pandas para realizar un análisis de los datos de material particulado PM2.5 y PM10. Inicialmente, se carga un archivo Excel que contiene los valores de las concentraciones de PM2.5 y PM10 de los diferentes puntos de monitoreo. Las columnas de fechas se convierten a tipo datetime y se añade una columna adicional para el año. El código agrupa los datos por punto de monitoreo y año, proporcionando estadísticas descriptivas como media, desviación estándar, y percentiles para cada grupo. Esta función se aplica a cada punto de monitoreo para ambos tipos de partículas, y los resultados se almacenan en nuevos DataFrames. Finalmente, las descripciones se guardan en un archivo Excel.

```
import pandas as pd

# Cargar el archivo Excel
archivo = r"C:\Users\Desktop\TESIS\TABLAS_tesis.xlsx"
datos_pm25 = pd.read_excel(archivo, sheet_name='PM2.5')
datos_PM10 = pd.read_excel(archivo, sheet_name='PM10')

# Convertir la columna 'Fecha' a tipo datetime y agregar la columna 'Año'
datos_pm25['Fecha'] = pd.to_datetime(datos_pm25['Fecha'], errors='coerce')
datos_pm25['Año'] = datos_pm25['Fecha'].dt.year
datos_PM10['Fecha'] = pd.to_datetime(datos_PM10['Fecha'], errors='coerce')
datos_PM10['Año'] = datos_PM10['Fecha'].dt.year

# Función para describir los datos por punto de monitoreo y año
def describir_datos_por_punto_y_año(datos, punto):
    datos_punto = datos[datos['Punto_Monitoreo'] == punto]
    descripcion_por_año = datos_punto.groupby('Año').describe()
    descripcion_por_año['Punto_Monitoreo'] = punto # Agregar el punto de
    monitoreo a cada fila
    return descripcion_por_año

# Crear un nuevo DataFrame para almacenar las descripciones
descripciones_pm25 = pd.DataFrame()
descripciones_PM10 = pd.DataFrame()

# Calcular la descripción de datos para cada punto de monitoreo en PM2.5
por año
for punto in datos_pm25['Punto_Monitoreo'].unique():
    descripcion_pm25 = describir_datos_por_punto_y_año(datos_pm25, punto)
    descripciones_pm25 = pd.concat([descripciones_pm25, descripcion_pm25])
```

```
# Calcular la descripción de datos para cada punto de monitoreo en PM10 por
año
for punto in datos_PM10['Punto_Monitoreo'].unique():
    descripcion_PM10 = describir_datos_por_punto_y_año(datos_PM10, punto)
    descripciones_PM10 = pd.concat([descripciones_PM10, descripcion_PM10])

# Guardar los resultados en un archivo Excel
descripciones_pm25.to_excel(r'C:\Users\Desktop\TESIS\descripciones_pm25.xls
x', sheet_name='PM2.5')
descripciones_PM10.to_excel(r'C:\Users\Desktop\TESIS\descripciones_pm25.xls
x', sheet_name='PM10')
```

## A12. CÓDIGO EN PYTHON PARA GENERAR GRÁFICAS DE LA VARIACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN FUNCIÓN A CADA SITIO DE MONITOREO

Este código en Python utiliza pandas, matplotlib y seaborn para visualizar la variación de las concentraciones de material particulado (PM2.5 y PM10) en función de diferentes puntos de monitoreo a lo largo de varios años. Primero, se cargan los datos de PM2.5 y PM10 desde un archivo Excel. Luego, se obtienen colores únicos para cada punto de monitoreo para diferenciarlos en los gráficos. Se crean figuras utilizando subplots para representar los datos de tres años (2017, 2018 y 2020). Para cada año, se generan diagramas de caja (boxplots) que muestran la distribución de las concentraciones de PM en cada punto de monitoreo. Líneas horizontales indican los valores guía de calidad del aire (AQG) establecidos en 2005 y 2021 para PM2.5 y PM10, facilitando la comparación con los niveles observados.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Ruta del archivo Excel
file_path = r'C:\Users\Desktop\TESIS\TABLAS_tesis.xlsx'

# Leer datos de PM2.5 y PM10
pm25_data = pd.read_excel(file_path, sheet_name='PM2.5')
pm10_data = pd.read_excel(file_path, sheet_name='PM10')

# Obtener colores únicos para cada punto de monitoreo
puntos_monitoreo = pd.concat([pm25_data['Punto_Monitoreo'],
                              pm10_data['Punto_Monitoreo']]).unique()
colors = sns.color_palette("husl", len(puntos_monitoreo))
color_dict = dict(zip(puntos_monitoreo, colors))

# Crear figuras para PM2.5 y PM10
fig, axs = plt.subplots(3, 2, figsize=(15, 10)) # 2 filas, 3 columnas

# Títulos de las figuras
fig.suptitle('Variación de Concentraciones de Material Particulado')

# Función para añadir líneas horizontales de AQG
def add_aqg_lines(ax, pm_type):
    if pm_type == 'PM2.5':
        ax.axhline(y=25, color='r', linestyle='--', linewidth=2,
                  label='AQGs 2005 PM2.5 = 25 µg/m3')
        ax.axhline(y=15, color='g', linestyle='--', linewidth=2,
                  label='AQGs 2021 PM2.5 = 15 µg/m3')
    else:
        ax.axhline(y=150, color='r', linestyle='--', linewidth=2,
                  label='AQGs 2005 PM10 = 150 µg/m3')
        ax.axhline(y=50, color='g', linestyle='--', linewidth=2,
                  label='AQGs 2021 PM10 = 50 µg/m3')
    return ax
```

```

elif pm_type == 'PM10':
    ax.axhline(y=50, color='b', linestyle='--', linewidth=2,
label='AQGs 2005 PM$_{10}$ = 50 µg/m³')
    ax.axhline(y=45, color='coral', linestyle='--', linewidth=2,
label='AQGs 2021 PM$_{10}$ = 45 µg/m³')

# Recorrer los años y graficar para PM2.5 y PM10
for i, year in enumerate([2017, 2018, 2020]):
    # Filtrar datos por año
    pm25_year_data = pm25_data[pm25_data['Fecha'].dt.year == year]
    PM10_year_data = PM10_data[PM10_data['Fecha'].dt.year == year]

    # Graficar cajas para PM2.5
    sns.boxplot(data=pm25_year_data, x='Punto_Monitoreo', y='PM2.5',
ax=axes[0, i], palette=color_dict)
    axes[0, i].set_title(f'{year}')
    axes[0, i].set_xlabel('Punto de Monitoreo')
    axes[0, i].set_ylabel('Concentración de PM$_{2.5}$ (µg/m³)')
    axes[0, i].set_ylim(0, 180) # Establecer los límites del eje Y
    add_agg_lines(axes[0, i], 'PM2.5')

    # Graficar cajas para PM10
    sns.boxplot(data=PM10_year_data, x='Punto_Monitoreo', y='PM10',
ax=axes[1, i], palette=color_dict)
    axes[1, i].set_title(f'{year}')
    axes[1, i].set_xlabel('Punto de Monitoreo')
    axes[1, i].set_ylabel('Concentración de PM$_{10}$ (µg/m³)')
    axes[1, i].set_ylim(0, 180) # Establecer los límites del eje Y
    add_agg_lines(axes[1, i], 'PM10')

# Añadir leyenda solo una vez
handles_pm25, labels_pm25 = axes[0, 0].get_legend_handles_labels()
handles_PM10, labels_PM10 = axes[1, 0].get_legend_handles_labels()
handles = handles_pm25 + handles_PM10
labels = labels_pm25 + labels_PM10

fig.legend(handles, labels, loc='upper right')

# Ajustar diseño y mostrar las figuras
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.95, 0.95])
plt.show()

```

### A13. CÓDIGO EN PYTHON PARA UNIR EN UN SOLO DOCUMENTO EXCEL LOS DATOS METEOROLÓGICOS DE NOAA CON LOS DATOS DE PM2.5 Y PM10

Este código en Python utiliza la biblioteca pandas para combinar datos de concentraciones de material particulado (PM2.5 y PM10) con datos meteorológicos de NOAA. Primero, se leen los datos de un archivo Excel que contiene hojas separadas para PM2.5, PM10 y datos meteorológicos. Las columnas de fechas se convierten a tipo datetime para asegurar una correcta coincidencia entre las tablas. Luego, se realiza un merge entre los datos de PM2.5 y los datos meteorológicos, y de igual manera entre los datos de PM10 y los datos meteorológicos, basándose en la columna de fechas. Esto permite combinar las variables meteorológicas como precipitación, presión atmosférica y temperatura con las concentraciones de material particulado en cada punto de monitoreo. Los DataFrames resultantes se filtran para mantener solo las columnas de interés y se guardan en nuevos archivos Excel.

```
import pandas as pd

# Rutas de archivos
input_file = r"C:\Users\Desktop\TESIS\TABLAS_tesis.xlsx"
output_folder = r"C:\Users\Desktop\TESIS"

# Leer las hojas de cálculo necesarias
pm25_data = pd.read_excel(input_file, sheet_name='PM2.5')
PM10_data = pd.read_excel(input_file, sheet_name='PM10')
noaa_data = pd.read_excel(input_file, sheet_name='datos_noaa')

# Convertir la columna DATE a formato de fecha para asegurar coincidencia
correcta
noaa_data['DATE'] = pd.to_datetime(noaa_data['DATE'])

# Unir los datos de PM2.5 con los datos de NOAA según la columna Fecha
pm25_data['Fecha'] = pd.to_datetime(pm25_data['Fecha'])
merged_pm25 = pd.merge(pm25_data, noaa_data, left_on='Fecha',
right_on='DATE', how='inner')

# Unir los datos de PM10 con los datos de NOAA según la columna Fecha
PM10_data['Fecha'] = pd.to_datetime(PM10_data['Fecha'])
merged_PM10 = pd.merge(PM10_data, noaa_data, left_on='Fecha',
right_on='DATE', how='inner')

# Seleccionar las columnas deseadas
columns_to_keep_pm25 = ['Punto_Monitoreo', 'Fecha', 'Distrito', 'Lugar',
'PM2.5', 'DATE', 'PRCP', 'STP', 'TEMP (Fahrenheit)', 'TEMP (CELSIUS)']
```

```
columns_to_keep_PM10 = ['Punto_Monitoreo', 'Fecha', 'Distrito', 'Lugar',
                        'PM10', 'DATE', 'PRCP', 'STP', 'TEMP (Fahrenheit)', 'TEMP (CELSIUS)']

# Crear los nuevos dataframes con las columnas seleccionadas
final_pm25 = merged_pm25[columns_to_keep_pm25]
final_PM10 = merged_PM10[columns_to_keep_PM10]

# Guardar los dataframes en nuevos archivos Excel
output_file_pm25 = rf"{output_folder}\NOAA_PM2.5.xlsx"
output_file_PM10 = rf"{output_folder}\NOAA_PM10.xlsx"

final_pm25.to_excel(output_file_pm25, index=False)
final_PM10.to_excel(output_file_PM10, index=False)

print(f"Archivos guardados en {output_folder}")
```

#### A14. CÓDIGO EN PYTHON PARA LIMPIEZA DE DATOS DE LOS NUEVOS DOCUMENTOS EXCEL CREADOS

Este código en Python se enfoca en la limpieza de datos meteorológicos y de material particulado previamente combinados. Utilizando pandas, el código carga los archivos Excel que contienen los datos fusionados de PM2.5 y PM10 con los datos de NOAA. Se define una función, `interpolate_stp`, para interpolar valores de presión atmosférica (STP) dentro de un rango específico, asegurando la validez de los datos. Los valores anómalos, como 999.9 para STP y 99.99 para precipitación (PRCP), se corrigen reemplazándolos con valores interpolados o ceros, respectivamente. Este proceso asegura que los datos sean consistentes y precisos, eliminando posibles sesgos introducidos por valores atípicos o errores de medición. Los DataFrames limpios se guardan en nuevos archivos Excel.

```
import pandas as pd

# Función para interpolar valores en un rango específico
def interpolate_stp(data):
    valid_values = data[(data >= 685) y (data <= 690)]
    return valid_values.mean() if not valid_values.empty else None

# Leer los archivos originales
input_file_pm25 = r"C:\Users\Desktop\TESIS\NOAA_PM2.5.xlsx"
input_file_pm10 = r"C:\Users\Desktop\TESIS\NOAA_PM10.xlsx"

pm25_data = pd.read_excel(input_file_pm25)
PM10_data = pd.read_excel(input_file_pm10)

# Limpiar datos de PM2.5
pm25_data['STP'] = pm25_data['STP'].apply(lambda x:
interpolate_stp(pm25_data['STP']) if x == 999.9 else x)
pm25_data['PRCP'] = pm25_data['PRCP'].apply(lambda x: 0 if x == 99.99 else
x)

# Limpiar datos de PM10
PM10_data['STP'] = PM10_data['STP'].apply(lambda x:
interpolate_stp(PM10_data['STP']) if x == 999.9 else x)
PM10_data['PRCP'] = PM10_data['PRCP'].apply(lambda x: 0 if x == 99.99 else
x)

# Guardar los dataframes limpios en nuevos archivos Excel
output_file_pm25_clean = r"C:\Users\Desktop\TESIS\NOAA_PM2.5 (Limpio).xlsx"
output_file_pm10_clean = r"C:\Users\Desktop\TESIS\NOAA_PM10 (Limpio).xlsx"
```

```
pm25_data.to_excel(output_file_pm25_clean, index=False)
PM10_data.to_excel(output_file_PM10_clean, index=False)

print(f"Archivos limpios guardados en {output_file_pm25_clean} y
{output_file_PM10_clean}")
```

## A15. CÓDIGO EN PYTHON PARA REALIZAR LA CORRELACIÓN PEARSON ENTRE VARIABLES METEOROLÓGICAS Y MATERIAL PARTICULADO

Este código en Python calcula la correlación de Pearson entre las concentraciones de material particulado (PM2.5 y PM10) y variables meteorológicas utilizando pandas, seaborn y scipy. Primero, se definen funciones para calcular tanto la matriz de correlación como los valores p para determinar la significancia estadística de las correlaciones. Se cargan los archivos Excel limpios que contienen datos de PM2.5 y PM10 junto con las variables meteorológicas. Las matrices de correlación y p-values se calculan para las columnas de interés, que incluyen concentraciones de PM, precipitación, presión atmosférica y temperatura. Para visualizar estos resultados, se utilizan heatmaps con seaborn, anotados con los valores de correlación y p-values, indicando la significancia de las relaciones.

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import pearsonr
import numpy as np

# Función para calcular el p-value junto con la correlación
def calculate_correlation_and_pvalue(df, columns):
    corr_matrix = df[columns].corr(method='pearson')
    pvalue_matrix = pd.DataFrame(np.zeros_like(corr_matrix),
                                columns=corr_matrix.columns, index=corr_matrix.index)

    for row in columns:
        for col in columns:
            if row != col:
                _, p_value = pearsonr(df[row], df[col])
                pvalue_matrix.at[row, col] = p_value
            else:
                pvalue_matrix.at[row, col] = np.nan # No tiene sentido
                calcular el p-value de la misma columna

    return corr_matrix, pvalue_matrix

# Leer los archivos limpios
file_pm25 = r"C:\Users\Desktop\TESIS\NOAA_PM2.5 (Limpio).xlsx"
file_pm10 = r"C:\Users\Desktop\TESIS\NOAA_PM2\NOAA_PM10 (Limpio).xlsx"

pm25_data = pd.read_excel(file_pm25)
PM10_data = pd.read_excel(file_pm10)
```

```

# Columnas de interés
columns_pm25 = ['PM2.5', 'PRCP', 'STP', 'TEMP (CELSIUS)']
columns_PM10 = ['PM10', 'PRCP', 'STP', 'TEMP (CELSIUS)']

# Calcular correlaciones y p-values para PM2.5
corr_pm25, pvalue_pm25 = calculate_correlation_and_pvalue(pm25_data,
columns_pm25)

# Calcular correlaciones y p-values para PM10
corr_PM10, pvalue_PM10 = calculate_correlation_and_pvalue(PM10_data,
columns_PM10)

# Función para anotar el heatmap con correlación y p-value de forma más
legible
def annotate_heatmap(corr, pvalues, ax):
    for i in range(corr.shape[0]):
        for j in range(corr.shape[1]):
            if i != j:
                p_value = pvalues.iloc[i, j]
                if p_value > 0.05:
                    text = f"{corr.iloc[i, j]:.2f}\np-value > 0.05"
                else:
                    text = f"{corr.iloc[i, j]:.2f}\np-value < 0.05"
                ax.text(j+0.5, i+0.5, text, ha='center', va='center',
color='black')

# Visualizar correlación de PM2.5 con etiquetas modificadas
plt.figure(figsize=(10, 8))
ax1 = sns.heatmap(corr_pm25, annot=False, cmap='YlOrRd', cbar=True,
xticklabels=['PM$_{2.5}$ (µg/m³)', 'Prec (mm)', 'STP
(Pa)', 'Temp (°C)'],
yticklabels=['PM$_{2.5}$ (µg/m³)', 'Prec (mm)', 'STP
(Pa)', 'Temp (°C)'])
annotate_heatmap(corr_pm25, pvalue_pm25, ax1)
plt.title("Correlación de Pearson para PM$_{2.5}$")
plt.show()

# Visualizar correlación de PM10 con etiquetas modificadas
plt.figure(figsize=(10, 8))
ax2 = sns.heatmap(corr_PM10, annot=False, cmap='YlOrRd', cbar=True,
xticklabels=['PM$_{10}$ (µg/m³)', 'Prec (mm)', 'STP (Pa)',
'Temp (°C)'],
yticklabels=['PM$_{10}$ (µg/m³)', 'Prec (mm)', 'STP (Pa)',
'Temp (°C)'])
annotate_heatmap(corr_PM10, pvalue_PM10, ax2)
plt.title("Correlación de Pearson para PM$_{10}$")
plt.show()

```

## A16. CÓDIGO EN PYTHON PARA EL ANÁLISIS DE ESPECTROS Y GUARDADO AUTOMÁTICO DE GRÁFICOS Y TABLAS (PM2.5)

El código en Python realiza el análisis y la visualización de los espectros de los elementos en el PM2.5. Primero, lee los datos de múltiples archivos CSV que contienen espectros de energía de rayos X. Para cada archivo, carga los datos y consulta una tabla de energías de elementos para identificar picos específicos de energía correspondientes a diversos elementos químicos.

El script elimina ciertos elementos no deseados de los datos y calcula las áreas bajo los picos de energía para elementos específicos. Genera gráficos de espectros con áreas sombreadas para cada elemento identificado y añade etiquetas a los picos. También crea gráficos de pastel que muestran la proporción de cada elemento en relación con el total.

El script guarda automáticamente los gráficos generados como imágenes PNG en una carpeta especificada y exporta tablas con los datos de los elementos identificados y sus áreas en archivos Excel, también en una carpeta específica. Utiliza librerías como pandas, matplotlib, y numpy para la manipulación de datos y la generación de gráficos.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os

# Ruta de la carpeta para guardar las imágenes de los espectros
ruta_imagenes_espectros =
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\IMAGENES_ESPECTROS\PM2.5"

# Ruta de la carpeta para guardar las tablas de elementos
ruta_tablas_elementos = r"
C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\TABLAS_ELEMENTOS\PM2.5"

# Lista de rutas de archivos CSV
```

```

rutas_csv = [
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDOQUILLA\PM2.5\22\Map_002_WholeSpectrum.csv",r"C:\Users\Desktop\TESIS\
QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE BARRIDO
QUILLA\PM2.5\42\42_PM2.5_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\54\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\87\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\90\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\98\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\118\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\131\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\149\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\151\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\163\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\168\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\189\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\194\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\214\Map_001_WholeSpectrum.csv",
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\PM2.5\237\Map_001_WholeSpectrum.csv"]

```

*# Diccionario para asignar colores a cada elemento*

```

colores_elementos = {
    "P": "#FFBF80",
    "S": "#FF8000",
    "As": "#FF80FF",
    "Pb": "#FFF300",
    "C": "#FF0000",
    "Na": "#A6EDFF",
    "Mg": "#1AB2FF",
    "K": "#63C600",
    "Al": "#9999FF",
    "Cl": "#664CFF",
    "Fe": "#F100F1",
    "Ca": "#33FF00",
    "Zn": "#DB6D00",
    "Mn": "#F100F1",
    "Cu": "#B09C85",
    "Ba": "#CCA852"
}

```

*# Código para cada archivo CSV*  
**for** ruta\_prueba **in** rutas\_csv:

```

nombre_carpeta = os.path.basename(os.path.dirname(ruta_prueba))
nombre_carpeta_previa =
os.path.basename(os.path.dirname(os.path.dirname(ruta_prueba)))

ruta_excel = r"C:\Users\Desktop\TESIS\TABLAS_tesis.xlsx"

datos = pd.read_csv(ruta_prueba)
tabla_energias = pd.read_excel(ruta_excel,
sheet_name="EDS_TABLA_ENERGIAS")

elementos = ["P", "S", "As", "Pb", "C", "Na", "Mg", "K", "Al", "Cl",
"Fe", "Ca", "Zn", "Mn", "Cu", "Ba"]
elementos_etiquetados = ["C", "Al", "Ca", "K", "Fe", "P", "Cl", "Mg",
"Pb", "Na"]

rango_energia = 0.01
elementos_a_eliminar = ["Si", "O"]
rango_energia_eliminar = 0.15

for elemento_eliminar in elementos_a_eliminar:
    elemento_data = tabla_energias[tabla_energias["Simbolo"] ==
elemento_eliminar]
    if not elemento_data.empty:
        for linea in ["Linea Kalfa", "Linea Lalfa", "Linea Malfa"]:
            energia_linea = elemento_data[linea].values[0]
            if pd.notnull(energia_linea) and str(energia_linea).strip()
!= '':
                energia_linea = float(energia_linea)
                if 0 <= energia_linea <= 20:
                    limite_inferior = energia_linea -
rango_energia_eliminar
                    limite_superior = energia_linea +
rango_energia_eliminar
                    mask = (datos["Energy (keV)"] >= limite_inferior) y
(datos["Energy (keV)"] <= limite_superior)
                    datos.loc[mask, " Intensity"] = 300

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(25, 15))
    espectro, = ax.plot(datos["Energy (keV)"], datos[" Intensity"],
label="Espectro", color="darkgray", linewidth=3)

    areas_elementos = {}
    color_index = 1
    handles = []
    labels = []

    for elemento in elementos:
        elemento_data = tabla_energias[tabla_energias["Simbolo"] ==
elemento]
        if not elemento_data.empty:
            areas_lineas = {}
            for linea in ["Linea Kalfa", "Linea Lalfa", "Linea Malfa"]:
                energia_linea = elemento_data[linea].values[0]
                if pd.notnull(energia_linea) and str(energia_linea).strip()
!= '':
                    energia_linea = float(energia_linea)
                    if 0 <= energia_linea <= 20:

```

```

        limite_inferior = energia_linea - rango_energia
        limite_superior = energia_linea + rango_energia
        mask = (datos["Energy (keV)"] >= limite_inferior) y
(datos["Energy (keV)"] <= limite_superior) y (datos[" Intensity"] > 300)

        x = datos[mask]["Energy (keV)"]
        y = datos[mask][" Intensity"]
        area_linea = np.trapz(y, x)
        areas_lineas[linea] = area_linea
        color_elemento = colores_elementos[elemento]
        if not datos[mask].empty:
            area_sombreada = ax.fill_between(x, y,
color=color_elemento, alpha=0.5)
            color_index += 1

            max_intensity = y.max()
            x_val = energia_linea

            if elemento == "Ba" and linea == "Linea Lalfa":
                ax.text(x_val, max_intensity * 1.02,
f'{elemento}-{linea.replace("Linea ", "").replace("alfa", "α")}',
                    rotation=0,
verticalalignment='bottom', horizontalalignment='center', fontsize=15,
fontweight='bold')

                elif elemento in elementos_etiquetados:
                    ax.text(x_val, max_intensity * 1.02,
f'{elemento}-{linea.replace("Linea ", "").replace("alfa", "α")}',
                        rotation=0,
verticalalignment='bottom', horizontalalignment='center', fontsize=15,
fontweight='bold')

                else:
                    handles.append(area_sombreada)
                    labels.append(f'{elemento}-
{linea.replace("Linea ", "").replace("alfa", "α")}')

            if areas_lineas:
                areas_elementos[elemento] = areas_lineas

        ax.set_xlabel("Energía (keV)", fontsize=16)
        ax.set_ylabel("Intensidad (cuentas)", fontsize=16)
        ax.set_title(f"Espectro de {nombre_carpeta_previa} del filtro
{nombre_carpeta}", fontsize=16)
        ax.set_xlim(left=0, right=8)
        ax.set_ylim(bottom=0, top=12000)

        legend = ax.legend(handles=handles, labels=labels, loc="upper right",
fontsize=20)
        fig.tight_layout()

        elementos_encontrados = pd.DataFrame(columns=["Elemento", "Línea de
Energía", "Área"])

        for elemento, lineas in areas_elementos.items():
            for linea, area in lineas.items():
                elementos_encontrados =
elementos_encontrados.append({"Elemento": elemento, "Línea de Energía":

```

```

linea.replace('Linea ', '').replace('alfa', 'α'), "Área": area},
ignore_index=True)

total_area = elementos_encontrados["Área"].sum()
elementos_encontrados["Porcentaje del Total"] =
elementos_encontrados["Área"] / total_area * 100

# Filtrar elementos con área mayor a 0
elementos_encontrados =
elementos_encontrados[elementos_encontrados['Área'] > 0]

# Crear etiquetas para el pie chart
elementos_encontrados['Etiqueta'] = elementos_encontrados['Elemento'] +
'-' + elementos_encontrados['Línea de Energía']

labels = elementos_encontrados['Etiqueta']
sizes = elementos_encontrados['Área']
percentages = elementos_encontrados['Porcentaje del Total']
colors = [colores_elementos[elemento] for elemento in
elementos_encontrados['Elemento']]

max_index = elementos_encontrados['Área'].idxmax()
explode = [0.1 if i == max_index else 0 for i in
elementos_encontrados.index]

start_angle = 225 - (360 * sum(sizes[:max_index]) / sum(sizes))

pie_ax = fig.add_axes([0.4, 0.3, 0.5, 0.5])
pie_wedges, pie_texts, autopcts = pie_ax.pie(sizes, explode=explode,
labels=labels, colors=colors, autopct='', shadow=True,
startangle=start_angle, textprops={'fontweight': 'bold', 'fontsize': 16})

#-

# Ajustar los porcentajes menores al 3%
for wedge, label, pct in zip(pie_wedges, labels, percentages):
    if pct < 3:
        value = round(pct, 2)
        label_text = f"{label} ({value}%)"
        index = list(labels).index(label)
        pie_texts[index].set_text(label_text)
    else:
        autopct = '{:.1f}%'.format(pct)
        index = list(labels).index(label)
        autopcts[index].set_text(autopct)

pie_ax.axis('equal')
pie_ax.set_title('Porcentaje Elemental', y=1.08, fontsize=16)

rect = plt.Rectangle((0.75, 0.6), 0.2, 0.2, facecolor='white',
edgecolor='none', alpha=0.5, zorder=-1)
pie_ax.add_patch(rect)

fig.tight_layout()

ruta_imagen = os.path.join(ruta_imagenes_espectros,
f"{nombre_carpeta}.png")

```

```

fig.savefig(ruta_imagen, bbox_inches='tight')

ruta_excel_tabla = os.path.join(ruta_tablas_elementos,
f"{nombre_carpeta}.xlsx")
elementos_encontrados.to_excel(ruta_excel_tabla, index=False)
#-----

# Guardar la imagen con el tamaño ajustado
ruta_imagen = os.path.join(ruta_imagenes_espectros,
f"{nombre_carpeta}.png")
fig.savefig(ruta_imagen, bbox_inches='tight')

# Crear un DataFrame para almacenar los elementos encontrados y sus
áreas
elementos_encontrados = pd.DataFrame(columns=["Elemento", "Línea de
Energía", "Área"])

# Llenar el DataFrame con los elementos y áreas encontrados
for elemento, lineas in areas_elementos.items():
    for linea, area in lineas.items():
        elementos_encontrados =
elementos_encontrados.append({"Elemento": elemento, "Línea de Energía":
linea.replace('Linea ', '').replace('alfa', 'α'), "Área": area},
ignore_index=True)

# Calcular el porcentaje que representa cada área en el total de áreas
evaluadas
total_area = elementos_encontrados["Área"].sum()
elementos_encontrados["Porcentaje del Total"] =
elementos_encontrados["Área"] / total_area * 100

# Guardar la tabla en un archivo Excel
ruta_excel_tabla = os.path.join(ruta_tablas_elementos,
f"{nombre_carpeta}.xlsx")
elementos_encontrados.to_excel(ruta_excel_tabla, index=False)

```

## A17. CÓDIGO EN PYTHON PARA EL ANÁLISIS DE ESPECTROS Y GUARDADO AUTOMÁTICO DE GRÁFICOS Y TABLAS (PM10)

El código en Python presentado está diseñado para automatizar el análisis y la visualización de los espectros de los elementos en el PM10, utilizando archivos CSV que contienen información sobre la energía y la intensidad. Inicialmente, el código establece rutas específicas para guardar imágenes y tablas generadas durante el análisis. Luego, procesa múltiples archivos CSV, lee datos espectroscópicos y ajusta las intensidades basadas en líneas de energía específicas para elementos determinados, utilizando una tabla de energías almacenada en un archivo Excel. Los datos ajustados se representan en gráficos, destacando las áreas correspondientes a cada elemento mediante colores específicos. Se generan gráficos de líneas para visualizar los espectros y gráficos de pastel para mostrar la distribución porcentual de los elementos detectados, proporcionando una representación clara de la concentración elemental. Finalmente, los resultados se exportan como imágenes PNG y tablas en formato Excel, facilitando la revisión y el análisis posterior.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os

# Ruta de la carpeta para guardar las imágenes de los espectros
ruta_imagenes_espectros =
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\IMAGENES_ESPECTROS\PM10"

# Ruta de la carpeta para guardar las tablas de elementos
ruta_tablas_elementos =
r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO DE
BARRIDO QUILLA\TABLAS_ELEMENTOS\PM10"

# Lista de rutas de archivos CSV
rutas_csv = [
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\31\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\37\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\46\Map_001_WholeSpectrum.csv",
```

```

    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\57\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\83\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\94\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\101\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\110\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\137\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\145\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\155\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\159\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\174\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\181\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\202\Map_001_WholeSpectrum.csv",
    r"C:\Users\Desktop\TESIS\QUILLABAMBA_ANALISIS\FINAL-4-16-24-MICROSCOPIO
DE BARRIDO QUILLA\PM10\268\Map_001_WholeSpectrum.csv"
]

```

*# Diccionario para asignar colores a cada elemento*

```

colores_elementos = {
    "P": "#FFBF80",
    "S": "#FF8000",
    "As": "#FF80FF",
    "Pb": "#FFF300",
    "C": "#FF0000",
    "Na": "#A6EDFF",
    "Mg": "#1AB2FF",
    "K": "#63C600",
    "Al": "#9999FF",
    "Cl": "#664CFF",
    "Fe": "#F100F1",
    "Ca": "#33FF00",
    "Zn": "#DB6D00",
    "Mn": "#F100F1",
    "Cu": "#B09C85",
    "Ba": "#CCA852"
}

```

*# Código para cada archivo CSV*

```

for ruta_prueba in rutas_csv:
    nombre_carpeta = os.path.basename(os.path.dirname(ruta_prueba))
    nombre_carpeta_previa =
os.path.basename(os.path.dirname(os.path.dirname(ruta_prueba)))

    ruta_excel = r"C:\Users\Desktop\TESIS\TABLAS_tesis.xlsx"

```

```

datos = pd.read_csv(ruta_prueba)
tabla_energias = pd.read_excel(ruta_excel,
sheet_name="EDS_TABLA_ENERGIAS")

elementos = ["P", "S", "As", "Pb", "C", "Na", "Mg", "K", "Al", "Cl",
"Fe", "Ca", "Zn", "Mn", "Cu", "Ba"]
elementos_etiquetados = ["C", "Al", "Ca", "K", "Fe", "P", "Cl", "Mg",
"Pb", "Na"]

rango_energia = 0.01
elementos_a_eliminar = ["Si", "O"]
rango_energia_eliminar = 0.15

for elemento_eliminar in elementos_a_eliminar:
    elemento_data = tabla_energias[tabla_energias["Simbolo"] ==
elemento_eliminar]
    if not elemento_data.empty:
        for linea in ["Linea Kalfa", "Linea Lalfa", "Linea Malfa"]:
            energia_linea = elemento_data[linea].values[0]
            if pd.notnull(energia_linea) and str(energia_linea).strip()
!= '':
                energia_linea = float(energia_linea)
                if 0 <= energia_linea <= 20:
                    limite_inferior = energia_linea -
rango_energia_eliminar
                    limite_superior = energia_linea +
rango_energia_eliminar
                    mask = (datos["Energy (keV)"] >= limite_inferior) y
(datos["Energy (keV)"] <= limite_superior)
                    datos.loc[mask, " Intensity"] = 300

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(25, 15))
    espectro, = ax.plot(datos["Energy (keV)"], datos[" Intensity"],
label="Espectro", color="darkgray", linewidth=3)

    areas_elementos = {}
    color_index = 1
    handles = []
    labels = []

    for elemento in elementos:
        elemento_data = tabla_energias[tabla_energias["Simbolo"] ==
elemento]
        if not elemento_data.empty:
            areas_lineas = {}
            for linea in ["Linea Kalfa", "Linea Lalfa", "Linea Malfa"]:
                energia_linea = elemento_data[linea].values[0]
                if pd.notnull(energia_linea) and str(energia_linea).strip()
!= '':
                    energia_linea = float(energia_linea)
                    if 0 <= energia_linea <= 20:
                        limite_inferior = energia_linea - rango_energia
                        limite_superior = energia_linea + rango_energia
                        mask = (datos["Energy (keV)"] >= limite_inferior) y
(datos["Energy (keV)"] <= limite_superior) y (datos[" Intensity"] > 300)

```

```

        x = datos[mask]["Energy (keV)"]
        y = datos[mask][" Intensity"]
        area_linea = np.trapz(y, x)
        areas_lineas[linea] = area_linea
        color_elemento = colores_elementos[elemento]
        if not datos[mask].empty:
            area_sombreada = ax.fill_between(x, y,
color=color_elemento, alpha=0.5)
            color_index += 1

            max_intensity = y.max()
            x_val = energia_linea

            if elemento == "Ba" and linea == "Linea Lalfa":
                ax.text(x_val, max_intensity * 1.02,
f'{elemento}-{linea.replace("Linea ", "").replace("alfa", "α")}',
                    rotation=0,
verticalalignment='bottom', horizontalalignment='center', fontsize=15,
fontWeight='bold')

                elif elemento in elementos_etiquetados:
                    ax.text(x_val, max_intensity * 1.02,
f'{elemento}-{linea.replace("Linea ", "").replace("alfa", "α")}',
                        rotation=0,
verticalalignment='bottom', horizontalalignment='center', fontsize=15,
fontWeight='bold')

                else:
                    handles.append(area_sombreada)
                    labels.append(f'{elemento}-
{linea.replace("Linea ", "").replace("alfa", "α")}')

            if areas_lineas:
                areas_elementos[elemento] = areas_lineas

        ax.set_xlabel("Energía (keV)", fontsize=16)
        ax.set_ylabel("Intensidad (cuentas)", fontsize=16)
        ax.set_title(f"Espectro de {nombre_carpeta_previa} del filtro
{nombre_carpeta}", fontsize=16)
        ax.set_xlim(left=0, right=8)
        ax.set_ylim(bottom=0, top=12000)

        legend = ax.legend(handles=handles, labels=labels, loc="upper right",
fontSize=20)
        fig.tight_layout()

        elementos_encontrados = pd.DataFrame(columns=["Elemento", "Línea de
Energía", "Área"])

        for elemento, lineas in areas_elementos.items():
            for linea, area in lineas.items():
                elementos_encontrados =
elementos_encontrados.append({"Elemento": elemento, "Línea de Energía":
linea.replace('Linea ', '').replace('alfa', 'α'), "Área": area},
ignore_index=True)

        total_area = elementos_encontrados["Área"].sum()
        elementos_encontrados["Porcentaje del Total"] =
elementos_encontrados["Área"] / total_area * 100

```

```

# Filtrar elementos con área mayor a 0
elementos_encontrados =
elementos_encontrados[elementos_encontrados['Área'] > 0]

# Crear etiquetas para el pie chart
elementos_encontrados['Etiqueta'] = elementos_encontrados['Elemento'] +
'-' + elementos_encontrados['Línea de Energía']

labels = elementos_encontrados['Etiqueta']
sizes = elementos_encontrados['Área']
percentages = elementos_encontrados['Porcentaje del Total']
colors = [colores_elementos[elemento] for elemento in
elementos_encontrados['Elemento']]

max_index = elementos_encontrados['Área'].idxmax()
explode = [0.1 if i == max_index else 0 for i in
elementos_encontrados.index]

start_angle = 225 - (360 * sum(sizes[:max_index]) / sum(sizes))

pie_ax = fig.add_axes([0.4, 0.3, 0.5, 0.5])
pie_wedges, pie_texts, autopcts = pie_ax.pie(sizes, explode=explode,
labels=labels, colors=colors, autopct='', shadow=True,
startangle=start_angle, textprops={'fontweight': 'bold', 'fontsize': 16})

#-

# Ajustar los porcentajes menores al 3%
for wedge, label, pct in zip(pie_wedges, labels, percentages):
    if pct < 3:
        value = round(pct, 2)
        label_text = f"{label} ({value}%)"
        index = list(labels).index(label)
        pie_texts[index].set_text(label_text)
    else:
        autopct = '{:.1f}%'.format(pct)
        index = list(labels).index(label)
        autopcts[index].set_text(autopct)

pie_ax.axis('equal')
pie_ax.set_title('Porcentaje Elemental', y=1.08, fontsize=16)

rect = plt.Rectangle((0.75, 0.6), 0.2, 0.2, facecolor='white',
edgecolor='none', alpha=0.5, zorder=-1)
pie_ax.add_patch(rect)

fig.tight_layout()

ruta_imagen = os.path.join(ruta_imagenes_espectros,
f"{nombre_carpeta}.png")
fig.savefig(ruta_imagen, bbox_inches='tight')

ruta_excel_tabla = os.path.join(ruta_tablas_elementos,
f"{nombre_carpeta}.xlsx")
elementos_encontrados.to_excel(ruta_excel_tabla, index=False)
#-----

```

```

# Guardar la imagen con el tamaño ajustado
ruta_imagen = os.path.join(ruta_imagenes_espectros,
f"{nombre_carpeta}.png")
fig.savefig(ruta_imagen, bbox_inches='tight')

# Crear un DataFrame para almacenar los elementos encontrados y sus
áreas
elementos_encontrados = pd.DataFrame(columns=["Elemento", "Línea de
Energía", "Área"])

# Llenar el DataFrame con los elementos y áreas encontrados
for elemento, lineas in areas_elementos.items():
    for linea, area in lineas.items():
        elementos_encontrados =
elementos_encontrados.append({"Elemento": elemento, "Línea de Energía":
linea.replace('Linea ', '').replace('alfa', 'α'), "Área": area},
ignore_index=True)

# Calcular el porcentaje que representa cada área en el total de áreas
evaluadas
total_area = elementos_encontrados["Área"].sum()
elementos_encontrados["Porcentaje del Total"] =
elementos_encontrados["Área"] / total_area * 100

# Guardar la tabla en un archivo Excel
ruta_excel_tabla = os.path.join(ruta_tablas_elementos,
f"{nombre_carpeta}.xlsx")
elementos_encontrados.to_excel(ruta_excel_tabla, index=False)

```