



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MUESTREO Y ANÁLISIS ELEMENTAL DEL
AEROSOL ATMOSFÉRICO PRESENTE EN UN
AMBIENTE DE TRABAJO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Lic. En Ciencias De La Tierra

PRESENTA:

SALVADOR REYNOSO CRUCES

TUTOR

DR. JAVIER MIRANDA MARTÍN DEL CAMPO



Ciudad Universitaria, CD. MX. 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Datos del jurado

1.- Datos del alumno

Reynoso
Cruces
Salvador
56 42 22 49
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la tierra
313224285

2.- Datos del tutor

Dr.
Javier
Miranda
Martín del Campo

3.- Datos sinodal 1

Dr.
Harry
Alvarez
Ospina

4.- Datos sinodal 2

Dr.
Luis Antonio
Ladino
Moreno

5.- Datos sinodal 3

Dr.
Giovanni Alberto
Carabálí
Sandoval

6.- Datos sinodal 4

Dr.
Alberto Antonio
Espinosa
Guzmán

7.- Datos del trabajo escrito

MUESTREO Y ANÁLISIS ELEMENTAL DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO PRESENTE
EN UN AMBIENTE DE TRABAJO.

103 p
2020

Agradecimientos Profesionales

Al Dr. Javier Miranda por todo el apoyo brindado durante este proyecto y a lo largo de mi desarrollo académico, no tengo palabras suficientes para agradecerle.

Al M. en C. Enrique Hernández por todos sus consejos y conocimientos compartidos en la planeación y elaboración de este trabajo.

Al Fís. Juan Carlos Pineda Santamaría por su gran ayuda en la irradiación de las muestras y por todo el apoyo dentro del laboratorio de aerosoles.

Al M. en C. Manuel Aguilar Franco por su ayuda en el análisis de las muestras en el microscopio electrónico de barrido.

Al Fís. Arcadio Huerta Hernández por su ayuda en las actividades realizadas dentro del LEMA.

Al Técnico Laboratorista Sergio Martínez González por su colaboración dentro del LEMA y al Arq. Diego Quiterio Vargas por su colaboración en la preparación de las muestras para su análisis en el microscopio electrónico.

A mis sinodales: Harry Álvarez, Luis A. Ladino, Giovanni Carabalí y Alberto A. Guzmán por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y por todos sus consejos.

A los proyectos PAPIIT IN-102615, IN-101719 y IG-100619.

Al proyecto de infraestructura CONACyT 253051.

Al CONACyT por la beca de ayudante de investigador SNI III.

Agradecimientos Personales

A mi madre, Sofía Cruces Correa por todo el amor y el apoyo incondicional, por los consejos y palabras de ánimo en momentos difíciles, por siempre estar a mi lado. El esfuerzo y recompensa mutua.

A mi hermana Araceli Reynoso por todos sus consejos, apoyo y amor.

A mis abuelos por todos los consejos y palabras de aliento.

A mis amigas Paulette y Diana y mi amigo Manuel por siempre apoyarme dentro y fuera del salón de clases.

Índice general

Agradecimientos Profesionales	III
Agradecimientos Personales	IV
Índice general	V
RESUMEN	VIII
OBJETIVOS	IX
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	X
HIPÓTESIS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Conceptos Básicos	2
1.2.1. Clasificación y Origen	3
1.2.2. Tamaño de los aerosoles atmosféricos	3
1.3. Efectos de los aerosoles	5
1.3.1. Procesos de respiración de los seres humanos	5
1.3.2. Efectos de los aerosoles en la salud	7
1.4. Aerosoles atmosféricos en ambientes cerrados	8
1.5. Tipos de colectores de partículas	9
1.6. Composición elemental del aerosol atmosférico	11
2. Análisis elemental del aerosol atmosférico.	12
2.1. Fluorescencia de rayos X	13
2.1.1. Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X	14
2.2. Microscopía Electrónica de Barrido	14

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	16
3.1. Sitio de Muestreo	16
3.1.1. Ciclo de actividades diarias dentro del LEMA	18
3.2. Tiempos de muestreo	18
3.3. Equipo de Muestreo	19
3.3.1. MiniVol	19
3.3.2. ECOTECH Combo PM ₁₀ & PM _{2.5}	19
3.3.3. Comparación entre ambos muestreadores.	20
3.4. Diseño Experimental	21
3.4.1. Elección de filtros	21
3.4.2. Tratamiento y medición de la masa de los filtros	22
3.5. Preparación y análisis de las muestras por XRF	23
3.6. Cálculo de las concentraciones elementales	24
3.7. Preparación y análisis de las muestras por SEM	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. Concentración másica	29
4.2. Espectros obtenidos mediante XRF	30
4.3. Concentraciones elementales	32
4.4. Factor de Enriquecimiento (FE)	38
4.5. Análisis de Componentes Principales	43
4.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	47
4.6.1. Muestras PM _{2.5}	48
4.6.2. Muestras PM ₁₀	50
4.7. Búsqueda de Fugas de SF ₆	58
5. Conclusiones	60
5.1. Trabajos Futuros	61
6. Anexo I	62
7. Anexo II	65
8. Anexo III	67
9. Anexo IV	72
10. Anexo V	77

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
11. Anexo VI	81
11.1. PM _{2.5}	81
11.2. PM ₁₀	82
Referencias	86

RESUMEN

La presente tesis realiza el muestreo, el análisis elemental y estadístico del aerosol atmosférico presente en un ambiente cerrado de trabajo, el cual es el Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores, LEMA, del Instituto de Física de la UNAM, IFUNAM. Así mismo hace énfasis en la importancia del conocimiento de la calidad del aire en este tipo de ambientes.

En este trabajo se describe el proceso de colección de muestras, su preparación para los diferentes tipos de análisis realizados, la obtención de resultados y así como la interpretación de los mismos.

En el primer capítulo se muestra una breve introducción sobre los antecedentes y conceptos básicos de la contaminación atmosférica y el aerosol. Durante el segundo capítulo se da una breve introducción a la fluorescencia de rayos X, ya que con esta técnica se realiza el análisis elemental del aerosol atmosférico. también durante este capítulo se describe brevemente el método analítico de microscopia electrónica de barrido ya que, durante el presente trabajo, esta se utiliza para la observación de algunas partículas atmosféricas de interés.

El tercer capítulo consiste en el desarrollo experimental, en el cual se describe en extenso el proceso de colección de muestra del aerosol atmosférico, el tiempo de colección, el pesaje de filtros, también se describe el lugar de muestreo, los equipos de muestreo utilizados y la preparación de las muestras para la obtención de resultados. En el capítulo cuatro se muestran los resultados obtenidos junto con la discusión de los mismos, en este capítulo se presenta la concentración másica de los filtros, así como una comparación entre los espectros de XRF de los filtros obtenidos con los diferentes equipos de muestro, igualmente se listan las concentraciones elementales promedio calculadas, se describe un análisis por factor de enriquecimiento y un análisis de componentes principales, finalmente se presentan los resultados obtenidos de la microscopia electrónica de barrido y la detección de fugas de SF₆.

Por último, en el capítulo cinco se dan a conocer las conclusiones obtenidas del presente trabajo, así como los trabajos a futuro. Se responde a la hipótesis planteada, así como al cumplimiento de los objetivos generales y específicos.

OBJETIVOS

Determinar la composición elemental del aerosol atmosférico PM_{10} y $PM_{2.5}$ presentes en un ambiente de trabajo, (Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores, LEMA), utilizando dos diferentes equipos de muestreo y la técnica analítica de fluorescencia de rayos X.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración elemental del aerosol mediante la técnica analítica de fluorescencia de rayos X, o XRF por sus siglas en inglés.
- Complementar el análisis con la observación y análisis elemental de las partículas presentes con ayuda de la microscopía electrónica de barrido.
- Identificar las posibles fuentes de emisión del aerosol, así como advertir al equipo de trabajo del LEMA en caso de encontrar contaminantes de alto riesgo.

HIPÓTESIS

El aerosol atmosférico (PM_{10} y $PM_{2.5}$) presente en el ambiente de trabajo, LEMA, tiene una composición elemental poco favorable para el cuerpo humano.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En el último siglo el estudio de los contaminantes atmosféricos se volvió de gran importancia, debido al incremento en el número de personas y el gran desarrollo industrial (Berend, 2006). Los primeros episodios registrados de pérdidas humanas por contaminación atmosférica se dieron en Londres en los años de 1873 y 1880, donde se informa sobre la formación de una capa de niebla intensa que cobró la vida de múltiples personas (Berend, 2006; Manahan, 2006).

El mayor interés por el estudio de la calidad del aire se da en 1952, cuando por un periodo aproximado de cuatro días la contaminación atmosférica causó la muerte de más de 10 000 personas en Londres. En este periodo se registró una concentración máxima de SO_2 de $3\,510\ \mu\text{g m}^{-3}$, debido al crecimiento incontrolado de la quema de combustibles fósiles en la industria y en el transporte (Manahan, 2006). En la actualidad existen normas a nivel mundial y nacional sobre las concentraciones máximas permitidas de los contaminantes en la atmósfera (World Health Organization, 2006).

En México se cuenta con normas oficiales para el monitoreo de partículas suspendidas (NOM 025 SSA1-2014), la cual indica una concentración en 24 horas máxima promedio de $75\ \mu\text{g m}^{-3}$ para PM_{10} y de $40\ \mu\text{g m}^{-3}$ para $\text{PM}_{2.5}$. También existe una norma para la regulación de ozono (NOM-020-SSA1-2004), de dióxido de azufre (NOM-022-SSA1-2010), dióxido de nitrógeno (NOM-023-SSA1-1993), monóxido de carbono (NOM-021-SSA1-1993) y plomo (NOM-026-SSA1-1993) las cuales establecen un nivel máximo promedio según el tipo de contaminante y su tiempo de residencia en la atmósfera (Diario oficial de la federación, 2016).

Todo lo antes mencionado hace referencia solamente a contaminación atmosférica en exteriores. El interés por el aerosol atmosférico presente en lugares cerrados

como casas, talleres, laboratorios, negocios han venido incrementando con el tiempo. Sólo unos pocos estudios han medido la concentración del material particulado tanto en exteriores como en interiores, con el fin de tener una comparación entre la concentración de partículas presentes en el exterior y las presentes en el interior, en donde se supone que la calidad del aire es mejor (Sexton *et al.* 1984; Spengler *et al.* 1981).

También se han realizado estudios en el interior de casas habitación con el propósito de medir la concentración de partículas presentes en el ambiente. Esto inició con la finalidad de hacer una comparación entre la concentración de partículas menores que 2.5 micrómetros presentes en casas donde se consumen cigarrillos en el interior y casas en las que no se consume, encontrando una concentración mayor de partículas en aquellas que se permite fumar en el interior (Neas *et al.* 1994).

Más recientemente se realizaron estudios en los cuales se hicieron comparaciones entre las concentraciones de partículas menores que 10 micrómetros y las menores que 2.5 micrómetros presentes dentro de casas habitación. Se encontró que son las menores que 10 micrómetros las más abundantes dentro de estos ambientes (Haller *et al.* 1999; Jones *et al.* 2000). El tamaño de la partícula es de gran interés, ya que como se verá más adelante, se alojan en distintas partes del sistema respiratorio, siendo las partículas más pequeñas las que más penetran y por ende causan un gran daño al cuerpo.

1.2. Conceptos Básicos

Se otorga el término de aerosol atmosférico a las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un medio gaseoso, en este caso la atmósfera (Mészáros, 1999). Los términos aerosol, partícula o *Particulate Matter* (PM) muchas veces se utilizan de manera indistinta para referirse sólo a las partículas suspendidas (Seinfeld, 1998) pero el aerosol atmosférico tiene un tamaño característico, el cual va desde los 0.002 μm hasta 100 μm , lo cual le da las características necesarias para que se encuentre en suspensión en la atmósfera por un periodo de tiempo de al menos unos cuantos minutos (Hinds, 1999; Finlayson, 1999). Siendo entonces el tamaño de partícula el parámetro más importante para clasificar al aerosol. De manera común se habla de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ lo que hace referencia al aerosol menor que 10 micrómetros y 2.5 micrómetros, respectivamente (Hinds, 1999).

1.2.1. Clasificación y Origen

El aerosol atmosférico puede ser de origen primario o secundario, siendo el aerosol primario el emitido directamente a la atmósfera desde su fuente, y el aerosol secundario aquel que se forma a causa de una serie de reacciones químicas y procesos físico atmosféricos a partir de un precursor gaseoso (Jacobson, 2002). Tanto el aerosol primario como el secundario puede formarse debido a las actividades naturales o antropogénicas.

El aerosol de origen natural tiene diferentes fuentes de emisión, desde el vulcanismo el cual enriquece de gases y partículas a la atmósfera en cada erupción; el aerosol de origen marino, que son las partículas de sal que se forman por la interacción de los vientos y las olas; también las partículas emitidas por incendios forestales, polen, hongos, dispersión de materia en descomposición; o bien por procesos de erosión (Viana, 2003).

El aerosol de origen antropogénico tiene una gran cantidad de fuentes de emisión, como la quema de combustibles fósiles, la resuspensión de polvo por el movimiento de vehículos, la industria de la construcción, las imprentas, las incineradoras, y la industria metalúrgica, sólo por mencionar algunas (Rogge *et al.* 1991; Jacobson, 2002).

1.2.2. Tamaño de los aerosoles atmosféricos

El tamaño del aerosol atmosférico es una de las características más importantes, ya que antes de considerar su composición química, el tamaño de las partículas da una descripción de cómo puede ser su interacción con el cuerpo humano y con otros seres vivos. En el aerosol no todas las partículas son esféricas ni todas son iguales en cuanto a morfología, composición y tamaño (Kulkarni *et al.* 2011). Para poder medirlas y compararlas se les designa un diámetro equivalente (De) que corresponde al diámetro que tendría una partícula esférica con el mismo volumen que la partícula de interés, pero aún más importante es el diámetro aerodinámico equivalente (Da) (DeCarlo *et al.* 2004). Se define al Da como el diámetro equivalente al de una partícula esférica de densidad unitaria (1 g cm^{-3}), la cual tendría la misma velocidad de depósito que la partícula de interés (NOM 2005).

Para los fines de este estudio es indispensable conocer el tamaño de las partículas para así poder tener una clara idea de los efectos que éstas pueden tener.

En la actualidad se distinguen distintos modos de distribución de las partículas:

- Moda de nucleación ($<0.02 \mu\text{m}$). Son partículas atribuidas a los precursores como H_2SO_4 , NH_3 y vapor de agua. Estas partículas tienen una vida media del orden de horas en la atmósfera, ya que rápidamente interactúan con otras

partículas e incrementan su tamaño (National Center for Environmental Assessment, 1996).

- **Moda Aitken** ($0.02 \mu\text{m}$ - $0.1 \mu\text{m}$). Partículas con un posible origen primario, ya sea natural o antrópico, o secundario, a partir de partículas ultrafinas (National Center for Environmental Assessment, 1996).
- **Moda de acumulación** ($0.1 \mu\text{m}$ - $1 \mu\text{m}$). La mayor densidad de partículas se registran entre 150 nm y 250 nm , ya que en la atmósfera, las partículas de la moda Aitken crecen por medio de reacciones en fase líquida que tienen lugar en las gotas de agua formadoras de nubes, dichas partículas crecen hasta formar parte de la moda de acumulación (National Center for Environmental Assessment, 1996).
- **Moda gruesa** ($>1 \mu\text{m}$ y hasta conservar las características de aerosoles atmosféricos). Esta moda contiene a las partículas de diámetro mayor que $2.5 \mu\text{m}$, que en términos de calidad del aire resultan importantes. La mayoría de las partículas aquí contenidas son formadas por procesos mecánicos como la erosión de la superficie (National Center for Environmental Assessment, 1996).

En la figura 1.1 se muestra la distribución del aerosol según su tamaño y de acuerdo al número de partículas presentes; se muestra también la sección de partículas PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 .

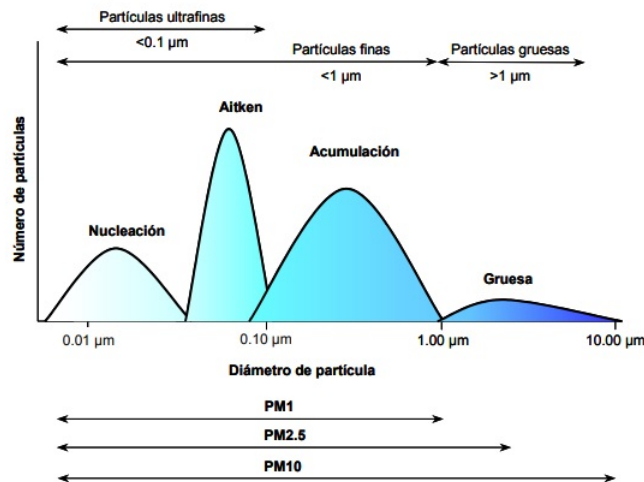


Figura 1.1: Distribución del aerosol atmosférico según su moda de colección y su abundancia (Tomada de Viana, 2003).

1.3. Efectos de los aerosoles

Sin importar el origen del aerosol atmosférico, ya sea primario o secundario, juega un papel muy importante en el ambiente local y global. A nivel global el aerosol contribuye a una disminución en la radiación total recibida por el planeta, ya que no permite la entrada de una parte de la radiación solar, disminuyendo así la temperatura superficial planetaria (Baldauf *et al.* 2001). Cerca del 80% del aerosol contenido en la atmósfera es producido de manera natural por los procesos antes mencionados (Hildemann *et al.* 1996).

En el aerosol atmosférico ocurren diferentes tipos de procesos como la transformación, el transporte y la bioacumulación, que se llevan a cabo en la atmósfera y afectan a los sistemas naturales, intemperizando las superficies o impidiendo la entrada de radiación solar (Hildemann *et al.* 1996). También los seres vivos se ven afectados por la presencia del aerosol, ya que al llevar a cabo todos sus procesos pueden producir y formar sustancias tóxicas para algunas especies (Harrison *et al.* 2000).

Otro efecto adverso producido por el aerosol es la reducción de la visibilidad, debido a que la presencia de partículas finas causa la formación de bruma y neblina, el cual es un fenómeno regional, reduciendo la claridad del aire (Environmental Protection Agency, 2012).

1.3.1. Procesos de respiración de los seres humanos

Antes de hablar sobre los efectos negativos que tiene el aerosol atmosférico sobre el cuerpo humano, es importante conocer al menos una parte del proceso respiratorio del ser humano, ya que es por la nariz y la boca por donde se introducen la mayor cantidad de partículas.

La respiración en el cuerpo humano es un proceso bastante complejo y necesario para la vida. Para los seres humanos el proceso respiratorio se puede ver en dos partes, la conductora y la de intercambio gaseoso (Phalen, 1999):

Parte conductora.

Se compone por todas aquellas partes del sistema respiratorio que se encargan de transportar aire hacia los pulmones, como la nariz, boca, faringe, laringe, tráquea, bronquios y bronquiolos. El aire pasa de la nariz y la boca a la faringe, en la nariz el aire se limpia por los vellos y el moco para impedir el paso de partículas de un tamaño mayor que $10\ \mu\text{m}$ al organismo. Posteriormente el aire va de la faringe a la laringe, protegida por la epiglotis (Phalen, 1999). Después, el aire pasa a la tráquea, llevando el aire a los bronquios y luego a los bronquiolos. Durante este

proceso el aire se calienta y se filtra para evitar el paso de partículas mayores. En la región nasofaríngea se pueden quedar retenidas partículas de tamaño mayor que $5 \mu\text{m}$ (Phalen, 1999).

Parte de intercambio gaseoso.

En esta etapa participan los alveolos pulmonares, en los cuales se da el intercambio gaseoso. Cada pulmón cuenta con cerca de 2.5 millones de alvéolos. En ellos el oxígeno pasa por difusión a la sangre, al mismo tiempo la sangre pasa dióxido de carbono hacia los alvéolos pulmonares, para después expulsarlo por las vías aéreas (Phalen, 1999).

En los humanos la respiración se da en dos fases, la inhalación y exhalación. En la inhalación se permite el paso de aire rico en oxígeno y en la exhalación se expulsa el dióxido de carbono producto de la respiración celular. La cantidad de aire que entra por la nariz y boca depende de la edad, sexo, estatura y peso de cada persona (Barrera, 2012). El patrón típico de respiración para un ser humano adulto varía de entre 7 a 30 respiraciones por minuto, dependiendo de la actividad física que se esté realizando. De esta manera y de acuerdo al área de la cavidad pulmonar, en promedio un humano adulto inhala 5.0 L min^{-1} de aire (Barrera, 2012; Phalen, 1999; International Commission on Radiological Protection, 1994).

Debido al volumen de aire que un humano inhala por minuto es importante monitorear la calidad del aire en el que se rodea, como las calles por la que transita y en su ambiente de trabajo, así como evaluar los límites permisibles de exposición a ciertos contaminantes.

Es importante que los estudios realizados puedan tener una comparación con el modelo de respiración humana. El objetivo de este estudio es ver cómo afecta el aerosol a las personas del LEMA y es por eso que en la **Sección 1.5** se habla acerca de las decisiones para la elección de los tipos de muestreadores.

En la tabla 1.1 se muestra el tamaño de partículas capaz de alojarse en cada una de las regiones del sistema respiratorio.

Tabla 1.1: Alcance del aerosol según su tamaño y su zona de alojamiento dentro del sistema respiratorio.

Tamaño	Zona de alojamiento dentro del sistema respiratorio
$>PM_{10}$	Laringe, Faringe y Cavidades nasales ($>10 \mu\text{m}$)
$PM_{10}-PM_{2.5}$	Tráquea ($10 \mu\text{m} - 6 \mu\text{m}$)
$PM_{2.5}$	Bronquios y Bronquiolos ($3 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$)

En la Figura 1.2 se muestran las diferentes regiones del sistema respiratorio y

los tamaños de partículas que podría contener cada una de estas regiones.

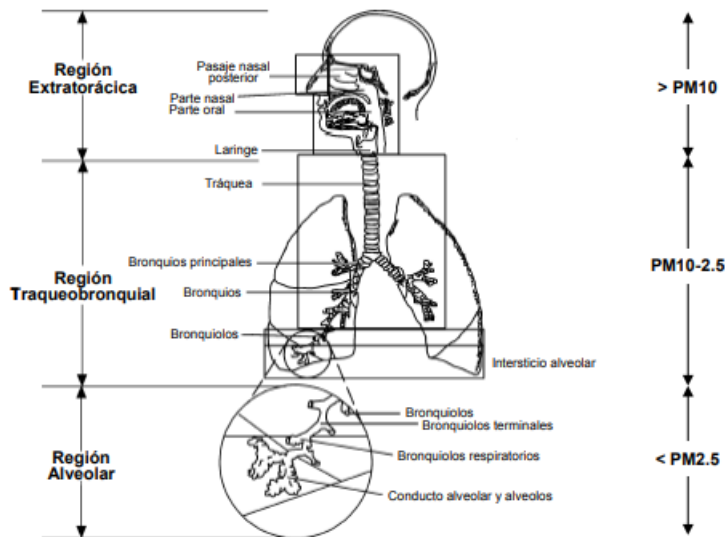


Figura 1.2: Regiones del sistema respiratorio (Tomada de Viana, 2003)

1.3.2. Efectos de los aerosoles en la salud

En términos de salud pública y calidad del aire se definen cuatro conceptos fundamentales en cuanto a tamaño de partículas se refiere. Hacen alusión al tamaño de corte de los sistemas de captación: TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 . El término TSP, por las siglas en inglés *Total Suspended Particles*, hace referencias a todas las partículas suspendidas en la atmósfera, el término PM_{10} se define como el material particulado con un diámetro aerodinámico igual o menor que $10 \mu m$. De igual manera para los diámetros de $2.5 \mu m$ y $1 \mu m$ a los cuales se les otorga el término de $PM_{2.5}$ y PM_1 , respectivamente (Harrison *et al.* 2000).

Debido a su impacto en la salud, los tamaños de partículas pueden clasificarse como:

- PM_{10} (fracción inhalable): Partículas con un Da de $10 \mu m$ y menores.
- $PM_{2.5}$ (fracción respirable): Partículas con un Da de $2.5 \mu m$ y menores, como las PM_1 .

Estudios a nivel mundial y nacional indican que: debido al incremento en la exposición al aerosol atmosférico han aumentado las enfermedades respiratorias

en los seres humanos (Goldish, 2004; Rosas, 2007). Existe evidencia que relaciona al material particulado con efectos negativos en la salud (Dockery *et al.* 1993).

Los problemas causados por la exposición al aerosol atmosférico son múltiples. Pueden ir desde un incremento en la sensación de irritabilidad en las vías respiratorias, tos, dificultad para respirar, hasta desarrollo de bronquitis crónica, aumento en los latidos del corazón e incluso infartos (Barrera, 2012; Environmental Protection Agency, 2011).

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2016, el 90 % de la población vivía en lugares donde no se respetaban las directrices de la OMS sobre la calidad del aire. Estimaciones del mismo año indican que la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4.2 millones de defunciones prematuras (OMS, 2018).

Además de la contaminación del exterior, el humo en interiores representa un grave riesgo sanitario para cerca de 700 millones de personas que cocinan y calientan sus hogares con combustibles de biomasa y carbón (OMS, 2018). La relación entre las concentraciones del material particulado en el interior y las concentraciones en el exterior han sido el foco de diversos estudios (Özkaynak *et al.* 1996; Clayton *et al.* 1993; Koutrakis *et al.* 1992).

Y es en este punto donde recae el interés de este trabajo por caracterizar química y físicamente el aerosol presente en el LEMA, ya que no se tienen estudios anteriores y en ese lugar diariamente múltiples personas pasan la mayor parte del día.

1.4. Aerosoles atmosféricos en ambientes cerrados

Las personas pasamos del 70% al 90% de nuestro tiempo en ambientes cerrados, que no se encuentran libres de la contaminación atmosférica, como casas, oficinas, laboratorios, hospitales, etc. En estos lugares la calidad del aire se ve influenciada por las condiciones exteriores, como vientos, posibles fuentes puntuales de emisión, y otras variables meteorológicas. Todos estos contaminantes externos se pueden introducir en los ambientes por medio de las ventanas u otras entradas de aire. También existe una producción de sustancias químicas propias del ambiente, las cuales se generan a partir de la quema de combustibles, humo de cigarrillo, etc. (Raunemaa *et al.* 1989).

Existen pocos estudios sobre la caracterización del aerosol presente en los distintos ambientes cerrados. En algunos casos los estudios se limitan en hacer una comparación entre la concentración de partículas presentes en el exterior y las presentes en el interior (Raunemaa *et al.* 1989). Más recientemente se comenzó con estudios que realizan una caracterización elemental del aerosol atmosférico (Chao

et al. 2002).

En Žitnik *et al.*, (2010) se presente un estudio en el cual se muestra la concentración elemental presente en dos tipos diferente de ambientes de trabajo. En este estudio se realiza un análisis elemental del aerosol colectado durante intervalos de tiempo de dos horas, un estudio muy completo, con el cual se tiene una mejor idea del comportamiento del aerosol en este tipo de ambientes.

Otros estudios publicados atienden diferentes problemáticas, como el tránsito de pasajeros en una estación de tren subterráneo (Salma *et al.* 2007; Kang *et al.* 2008; Raut *et al.* 2009), la emisión del aerosol por los diferentes métodos de cocción dentro de las cocinas (See & Balasubramanian, 2008), tasas de emisión de aerosol en hogares donde se realizan actividades cotidianas como la limpieza con aspiradora (Gehin *et al.* 2008), o estudio de la calidad del aire en casas que se encuentran ubicadas cerca de avenidas principales (Martuzevicius *et al.* 2008).

También el aerosol ha sido investigado en consultorios dentales (Sotiriou *et al.* 2008), en salones de clases en el interior de una escuela (Fromme *et al.* 2008). Algunos otros estudios se han centrado en el estudio específico de lugares de trabajo en donde se tiene bien identificada la fuente de emisión, por ejemplo, en lugares donde se fabrican materiales metálicos (Kuo *et al.* 2007; Nygren & Aspman 2004), pinturas en aerosol (Wilms *et al.* 2006) y la exposición a ácido sulfúrico en la producción de zinc (Bratveit *et al.* 2004).

El estudio de la calidad del aire presente en los diferentes ambientes de trabajo es de gran importancia, ya que se calcula que cerca del 25 % de la vida profesional se pasa en el lugar del trabajo. En muchos sitios de trabajo la concentración de sustancias químicas presentes en el aire son mucho mayores que aquéllas en otro tipo de entornos cerrados, como los ambientes domésticos. Además en la industria actual todo el tiempo se introducen diferentes sustancias químicas que mejoran el funcionamiento de los equipos, pero no se conocen con claridad los efectos que puedan tener al introducirse en el cuerpo humano en forma de partículas respirables (Malmqvist, 1984).

1.5. Tipos de colectores de partículas

El muestreo del aerosol presente en el aire por lo general no representa un alto grado de complejidad desde la perspectiva técnica, ya que en la actualidad existen diferentes tipos de muestreadores que se adaptan a las necesidades del usuario y a las diferentes condiciones de operación.

Existen diferentes tipos de dispositivos; pero de forma general es un instrumento que consta de los siguientes componentes: Sistema de captación, línea de transporte, y sistema de regulación de aire o acondicionamiento, además del co-

lector de partículas con su soporte, sistema de controladores de las funciones del muestreador y una bomba de aspiración (Viana, 2012).

Para tener un muestreo de partículas se utilizan diferentes fuerzas físicas, entre las cuales se encuentre la gravedad, el impacto, termoforesis y difusión. El tamaño de partícula determina el tipo de colector a utilizar. Dicho esto, los colectores del aerosol se pueden dividir en las siguientes categorías (Beverly, 1995).

- Cámaras de asentamiento
- Dispositivos centrífugos (ciclones, por ejemplo)
- Impactadores
- Filtros
- Precipitadores electrostáticos
- Precipitadores térmicos
- Baterías de difusión

Las cámaras de asentamiento usan la fuerza gravitacional para la colección de las partículas, ya que se sedimentan sobre un colector que permite su entrada, pero no así su salida. Los dispositivos centrífugos, como su nombre lo dice, aprovechan la fuerza centrífuga de las partículas según su tamaño. Es por esto que los ciclones pueden utilizarse para el muestreo selectivo de partículas (Beverly, 1995; Suárez, 2012).

Los impactadores utilizan las propiedades inerciales de las partículas para efectuar su colección; el principio consiste en que la partícula toma una velocidad en el rango de la boquilla de entre 60 m s^{-1} a 130 m s^{-1} (Baldauf, 2001, Beverly, 1995).

Los filtros se encuentran entre los mejores métodos de muestreo de partículas sólidas (Beverly, 1995). Existen muchos tipos de filtros. Entre ellos se encuentran los filtros de politetrafluoroetileno, de policarbonato, fibra de cuarzo y los de celulosa; su uso depende meramente de los fines del estudio (Beverly, 1995).

Los otros métodos de colección consisten en la atracción de las partículas debida a sus propiedades eléctricas, permitiendo que se analicen en tiempo real por acoplamiento del colector con un equipo de análisis como un microscopio electrónico.

Para el caso de este estudio se utilizan dos equipos de muestreo del tipo impactador. Debido a que se pretende conocer el efecto del aerosol sobre el cuerpo humano, se utiliza el muestreador conocido como MiniVol, el cual tiene un flujo de aire de 5 L min^{-1} , flujo similar a la respiración humana. También se utiliza el equipo conocido como ECOTECH Combo PM_{10} & $\text{PM}_{2.5}$, el cual realiza un muestreo simultáneo de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. Este equipo trabaja a un flujo de 38.3 L min^{-1} para PM_{10} y de 16.6 L min^{-1} para $\text{PM}_{2.5}$.

1.6. Composición elemental del aerosol atmosférico

El aerosol atmosférico tiene una composición característica según la fuente que lo emita, es decir la composición del aerosol atmosférico proveniente de partículas industriales cuenta con una composición diferente al aerosol atmosférico proveniente de la sal marina, sólo por mencionar algún ejemplo. A continuación, en la tabla 1.2 se muestra la composición elemental más común del aerosol atmosférico.

Tabla 1.2: Composición de las partículas de aerosol emitidas en mayor cantidad a la atmósfera. Construido con base en: Miranda *et al.* 1994.

Fuente	Composición típica
Fuentes naturales	
Sal Marina	Na, Cl, S
Polvo mineral	Si, Al, Fe, Ca
Ceniza volcánica	Si, Al, Fe
Suelo	Si, Fe, Ca, K, Na, Mn
Fuentes antropogénicas	
Quema de biomasa	C, S
Industria	Cr, Al, Se, S, Cu
Hollín	C

Lo mencionado en la tabla 1.2 se sabe gracias a estudios realizados mediante las técnicas de emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE, por sus siglas en inglés) y XRF, las cuales son técnicas de origen nuclear y brindan información acerca de la composición elemental del objeto de estudio. En la siguiente sección se describe en extenso el principio físico de estas técnicas analíticas.

La información de la tabla 1.2 servirá para identificar las posibles fuentes de emisión del aerosol presente en el LEMA y con esto tener un análisis más profundo de los posibles efectos de estas partículas.

Capítulo 2

Análisis elemental del aerosol atmosférico.

En la actualidad existe una amplia diversidad de técnicas analíticas que se emplean en el estudio del aerosol atmosférico. Gracias a la aplicación de las diferentes tecnologías se pueden realizar análisis para determinar la composición química de las partículas o bien para caracterizar su morfología.

Cada técnica tiene un propósito diferente, ya que se puede conocer y en algunos casos cuantificar su composición elemental, los compuestos orgánicos e inorgánicos, el carbón elemental presente en el aerosol, etc. Las técnicas pueden ser cromatografía de líquidos, cromatografía de iones, XRF, PIXE, entre otras; pero el presente trabajo se enfocará en el análisis elemental del aerosol.

Se define como análisis elemental al estudio de los elementos químicos presentes en el aerosol atmosférico, los cuales contribuyen a su masa total.

Existen diferentes técnicas analíticas de origen nuclear que permiten el estudio de la composición elemental de las partículas. Entre las más utilizadas se encuentra la técnica conocida como PIXE y XRF, Así como la técnica ICP-MS, sólo por mencionar algunas. En la **Sección 2.1** se describen más a fondo los principios físicos de XRF, ya que es la técnica analítica utilizada en este trabajo.

La microscopia electronica de barrido es una técnica que, si bien su principal función es describir las características físicas de las partículas, también es de gran ayuda en la identificación elemental. Más adelante también se describen en extenso los principios físicos de esta técnica, **Sección 2.2**.

2.1. Fluorescencia de rayos X

Se define a los rayos X como la radiación ionizante que tiene una longitud de onda en el intervalo que va de 0.01 nm a 10 nm con un valor energético correspondiente de entre 0.125 keV y 125 keV, respectivamente (Cullity, 1956).

Tras la producción de rayos X pueden existir diferentes efectos, uno de ellos es la fluorescencia de rayos X, la cual consiste en un proceso físico en el cual se libera un fotón como resultado de la interacción entre la radiación y la materia.

Los rayos X son emitidos por una fuente, la cual puede ser de diferentes materiales refractarios, por ejemplo, rodio o tungsteno. Los rayos X de alta energía emitidos por la fuente excitan a la muestra de interés, lo que conlleva al desprendimiento de electrones en las capas orbitales más internas de los átomos; dicha configuración inestable hace que los electrones de capas orbitales más externas ocupen los huecos dejados por el desprendimiento de electrones previo; durante este proceso se genera energía a través de la emisión de un fotón (Miranda & Pegueros, 1993).

La energía del fotón emitido es característica de cada elemento y está relacionada con las capas entre las que sucede el intercambio de electrones. Es decir, se pueden tener diferentes transiciones para un sólo elemento, llamadas K, L, M, etc., de acuerdo con las capas electrónicas en las que sucede dicho intercambio, las cuales son captadas por los detectores del equipo (Miranda & Pegueros, 1993).

A continuación, en la figura 2.1 se muestra de manera ilustrativa el modelo atómico para el método de análisis de fluorescencia de rayos X.

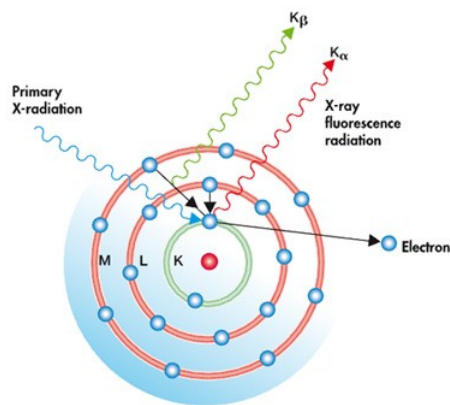


Figura 2.1: Modelo atómico del análisis por fluorescencia de rayos X. Tomada de: Aparicio, 2019.

2.1.1. Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X

Un espectrómetro se define como un instrumento que produce un espectro en el cual la energía, la intensidad, la longitud de onda, etc., se pueden medir. Un espectrómetro se compone básicamente por una fuente de radiación, una muestra y un sistema de detección (Sheppard *et al.* 1987).

Los espectrómetros que miden la fluorescencia de rayos X se clasifican en dos grupos:

- Fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda (WDRXF por sus siglas en inglés).
- Fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (EDXRF por sus siglas en inglés).

La diferencia básica entre estas dos técnicas es el objeto de detección: la longitud de onda o la energía (Brouwer, 2010).

En este estudio se utiliza un espectrómetro de rayos X por dispersión de energía, la cual se utiliza para el análisis elemental de la muestra de interés. La muestra es irradiada de manera puntual, es decir, se excitan todos los elementos presentes en la muestra al mismo tiempo en un mismo punto. Los fotones emitidos inciden en el detector, el cual, combinado con la electrónica correspondiente recolecta la radiación incidente de la muestra y la separa en sus distintas energías, las cuales son características para cada elemento.

2.2. Microscopía Electrónica de Barrido

La microscopía electrónica de barrido, o SEM por las siglas en inglés de *Scanning Electron Microscope*, tiene como característica principal la sustitución del haz de luz convencional, utilizado en el microscopio óptico, por un haz de electrones. El microscopio electrónico de barrido tiene como objetivo la obtención de imágenes de alta resolución de objetos muy pequeños, del orden de nanómetros. (Goldstein, 2017)

En el presente estudio se utiliza esta técnica ya que se pretende observar la morfología de algunas de las partículas y de manera simultánea obtener un análisis elemental cualitativo, para así tener una idea de su origen.

El microscopio electrónico de barrido está compuesto principalmente por un emisor de electrones, una columna por la cual serán transportados los electrones, y las diferentes lentes electromagnéticas (Reimer, 2013). El emisor tiene la función de generar el haz de electrones, los cuales viajan a través de la columna que se encuentra en vacío. Una vez aquí, el haz de electrones pasa por las diferentes

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS ELEMENTAL DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO. 15

lentes electromagnéticas, la decisión de usar una u otra lente depende del tamaño de objeto a observar así como de las capacidades propias del equipo, y un sistema de deflexión que permite manipular el haz de electrones y así poder llevar a cabo el barrido sobre toda la superficie de la muestra (Reimer, 2013).

La interacción electrón-materia genera diferentes efectos o señales, las cuales son captadas por los diferentes detectores para el análisis de la muestra. Entre los principales se encuentran (Goldstein, 2017):

- **Electrones secundarios:** Brindan información para conocer la morfología superficial de la muestra.
- **Rayos X:** De una manera cualitativa, se obtienen los rayos X característicos de la muestra, lo cual da información sobre la composición elemental de la muestra.
- **Electrones retro-dispersados:** Da información de la composición química de la muestra; la información obtenida se encuentra en función de la brillantez de la muestra.

Capítulo 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Sitio de Muestreo

Se seleccionó como sitio de muestreo del aerosol atmosférico, el espacio designado para el separador isotópico 4110, el cual se encuentra dentro del Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA), dentro del Instituto de Física de la UNAM, IFUNAM. Se elige esta área ya que es ahí donde se encuentra la mayor interacción de las personas que trabajan dentro de este laboratorio.

El sitio de muestreo tiene dimensiones de 10.9 m de ancho por 12.3 m de largo y altura de 5.0 m. El laboratorio cuenta con ventanas, pero estas sólo tienen una función de iluminación y para uso en posibles emergencias, ya que se cuenta con un sistema de aire acondicionado, porque el interior debe permanecer a 21 °C. El espacio de trabajo cuenta también con dos puertas de acceso: una que es la puerta principal, la cual comunica con un pasillo cerrado, y la otra es una puerta de servicio, que no se abre con frecuencia, sólo en caso de emergencia o para acceso de objetos de dimensiones mayores a las que admite la puerta de acceso principal.

Para designar la posición de los equipos de muestreo se considera un lugar en donde no se obstruya el paso del personal o se interrumpieran las actividades. También se considera que no haya demasiada interacción entre las personas que ahí trabajan y los muestreadores, con el fin de disminuir las variables experimentales. Con las consideraciones anteriormente mencionadas, se designa un lugar para que se colocaran los dispositivos, el cual se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1: Ubicación de los muestreadores.

En la figura 3.1 se muestra la ubicación de los muestreadores, así como la distribución general del espacio.

3.1.1. Ciclo de actividades diarias dentro del LEMA

Con el fin de dar una posible interpretación a los resultados obtenidos en este trabajo, a continuación se describen los horarios de labores y las actividades que habitualmente se realizan en una semana de trabajo común:

Nota: Es importante mencionar que el acelerador de iones se encuentra en funcionamiento continuo, es decir no se apaga por completo; sólo en caso de alguna emergencia o una situación extraordinaria.

- De lunes a viernes el personal de limpieza accede al laboratorio alrededor de las 7:00 hrs, saca la basura, limpia el piso y algunos muebles como escritorios y mesas.
- El encargado de operar el acelerador comienza sus actividades aproximadamente a las 9:00 hrs, hace pruebas para verificar su correcto funcionamiento.
- Alrededor de las 11:00 hrs se comienza con el análisis de muestras, el cual no requiere la presencia de ninguna persona para que se lleve a cabo; sin embargo, el personal entra y sale del laboratorio para cambiar muestras, verificar el correcto funcionamiento o simplemente esperando a que termine el análisis.
- El personal del laboratorio termina sus actividades aproximadamente a las 19:00 hrs dejando todo preparado para el día siguiente de trabajo.

3.2. Tiempos de muestreo

Cada muestra del aerosol presente en el área de estudio se colectó por un periodo de 24 horas, con el fin de obtener la mayor cantidad de partículas posibles. Generalmente el muestreo daba inicio a las 9:00 hrs y concluía a las 8:50 hrs del día siguiente; con el fin de tener unos minutos para la recolección y cambio de filtros. El periodo de colecta de las muestras abarcó del 21 de septiembre de 2018 al 16 de enero de 2019, tomando una muestra por día, aproximadamente.

En el **Anexo I** se muestra parte de la bitácora de trabajo, en la cual se pueden observar aspectos generales de las muestras, tales como la fecha de colecta y la etiqueta de reconocimiento.

Condiciones de muestreo

Para este estudio no se toma en cuenta la influencia de las condiciones meteorológicas, ya que el muestreo se realiza en un ambiente cerrado; pero sí es importante mencionar la presencia de un sistema de aire acondicionado, dado que en

este sitio se encuentran equipos de cómputo y demás maquinaria y electrónica; la temperatura debe permanecer constante a 21 °C.

3.3. Equipo de Muestreo

A continuación, se describen las características de los muestreadores utilizados para la colecta del aerosol en el proyecto actual.

3.3.1. MiniVol

El equipo de muestreo conocido como MiniVol, es un muestreador activo que se puede configurar para coleccionar muestras PM_{2.5} o PM₁₀.

Este muestreador cuenta con una bomba de aire que opera a un flujo de 5 L min⁻¹, pasando por un selector de partículas, el cual se conoce como impactador; posteriormente las partículas se depositan en un filtro de 47 mm de diámetro. La selección de partículas de 10 μm o de 2.5 μm se logra por medio de los impactadores, los cuales son capaces de separarlas según su tamaño (Air Metrics, 2002).

El dispositivo puede trabajar con corriente alterna o corriente directa (una batería recargable), es de fácil uso y es capaz de realizar un muestreo automatizado, mediante la programación del equipo para una hora de encendido y apagado específica (Air Metrics, 2002).

Estos equipos son muy usados en el estudio del aerosol atmosférico debido a que son portátiles y capaces de mantener el flujo de aire por largos periodos de tiempo. También son tan exitosos en el estudio de contaminantes atmosféricos porque pueden tener un flujo de aire similar al de la respiración humana.

3.3.2. ECOTECH Combo PM₁₀ & PM_{2.5}

El equipo de muestreo ECOTECH Combo PM₁₀ & PM_{2.5} es un muestreador activo, capaz de muestrear PM₁₀ y PM_{2.5} de manera simultánea.

Cuenta con un impactador de una etapa, que coincide con los diseños de la Unión Europea, el cual se ha instalado en este muestreador para la medición de PM₁₀. Este impactador impide el paso de partículas mayores que 10 μm presentes en el aire. El flujo se mantiene constante a 2.3 m³ h⁻¹. Para el muestreo de PM₁₀ el flujo se mantiene constante a 38.33 L min⁻¹ (Ecotech Instruments, (s.f)).

Para el muestreo de partículas de 2.5 μm, los impactadores de dos etapas están basados en los diseños estándar de la US EPA (*United States Environmental Protection Agency*). Estos impactadores impiden el paso de partículas de tamaño mayor que 2.5 μm (primero en impactador PM₁₀ y segundo en impactador WINS, por las siglas en inglés de *well impactor ninety-six*, instalado en serie). El aire se aspira

a través de él a una velocidad de flujo constante de $1.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Para el muestreo de $\text{PM}_{2.5}$ el flujo se mantiene constante a 16.67 L min^{-1} (Ecotech Instruments, (s.f)).

3.3.3. Comparación entre ambos muestreadores.

A continuación, en la tabla 3.1 se muestra una comparación entre los dos muestreadores utilizados en este estudio, con las ventajas y desventajas de ambos equipos, las cuales van desde la portabilidad hasta el costo de cada uno de ellos.

Tabla 3.1: Descripción de los muestreadores utilizados.

Muestreador	Características	Descripción
MiniVol	Ventajas	Equipo portátil, de bajo peso, con un flujo similar a la respiración humana promedio, programable para muestreo automático, pequeño, común en el área de estudio del aerosol atmosférico.
	Desventajas	Sólo muestrea un tamaño de partícula a la vez.
ECOTECH Combo PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$	Ventajas	Equipo de alto flujo que permite una mayor colección de partículas, muestreo simultáneo de dos tamaños de partícula, económico con respecto a otros muestreadores con las mismas características, programable para muestreo automático.
	Desventajas	Equipo no portátil, debe de estar conectado a la corriente eléctrica ya que no cuenta con batería, poco utilizado para el estudio del aerosol atmosférico.

Se implementa el uso de este equipo debido a su alto flujo de aire, lo cual permite la colecta de una mayor cantidad de partículas. Esto es importante ya que al tener una mayor cantidad de partículas se puede mejorar el límite de detección y/o cuantificación de los elementos presentes en el aerosol atmosférico. Esto es una ventaja ya que es posible registrar elementos presentes en el aerosol que no podrían ser detectados si sólo se realizara el muestreo con el MiniVol. Si bien estos elementos estarían presentes en una menor concentración como para no ser detectados a bajo flujo, no quiere decir que no existan dentro de la composición química del aerosol atmosférico presente en este lugar. Tal es el caso del potasio, que se encuentra presente en la atmósfera, pero no en altas concentraciones como para ser detectado con una colecta a bajo flujo. En la sección de resultados se profundizará más en éste y en otros elementos.

3.4. Diseño Experimental

Para tener una buena colecta del material particulado y por ende un buen análisis del mismo, es necesario considerar aquellos factores que afectan a esta, tales como la velocidad del viento, la temperatura, la humedad y la zona de muestreo, sólo por mencionar algunos.

Para este estudio las especificaciones fundamentales del monitoreo fueron delimitar el flujo de operación a 5 L min^{-1} para el caso del equipo MiniVol con PM_{10} y un flujo de 38.3 L min^{-1} para el equipo Ecotech PM_{10} y de 16.6 L min^{-1} para el caso del Ecotech $\text{PM}_{2.5}$.

Cada filtro utilizado recibió un tratamiento antes y después del muestreo, descrito en extenso en la **Sección 3.4.1**; el tratamiento dado a los filtros se hace con el fin de mejorar las condiciones de colecta y análisis del material particulado.

Durante el monitoreo se le asignó a cada filtro una clave, la cual consta del nombre del equipo en el cual se utiliza dicho filtro, tamaño de partícula contenido y número de muestra. De esta forma se tiene un registro de cada filtro expuesto, así como las características del muestro, las cuales se encuentran descritas en una bitácora de trabajo, con el tiempo de muestreo, el flujo inicial, flujo final, la masa de los filtros antes y después de la colecta de partículas y observaciones generales de cada día de muestreo. Parte de esta bitacora de trabajo se muestra en el **Anexo I**.

La realización de este trabajo consistió principalmente en dos aspectos fundamentales: el primero, la colección del aerosol atmosférico presente en un ambiente de trabajo, y segundo, el uso de la técnica XRF para el análisis del material particulado y posteriormente el uso de un software especializado, para la interpretación de los espectros obtenidos y así poder obtener las concentraciones elementales del aerosol.

3.4.1. Elección de filtros

Los equipos de muestreo requieren de flujos de operación específicos, para mantener en la mayor medida posible el punto de corte de cada equipo. Se define como punto de corte al diámetro aerodinámico que permite la penetración al tamaño de poro del filtro de cerca del 50% del total de partículas. Siendo así el 100% de partículas colectadas aquellas que tienen un diámetro aerodinámico mayor que el punto de corte (Chow, 1995).

Debido a esto se requiere que los equipos de muestreo cuenten con filtros de tales características que permitan un buen funcionamiento, el cual se define a partir de un flujo constante y una certeza de coleccionar partículas con el tamaño deseado; estos filtros se componen de materiales de un tipo fibroso o de membranas plásti-

cas. Las partículas colectadas son retenidas en el filtro por medio de la incrustación y el depósito.

Para realizar una correcta selección del tipo de filtro a utilizar se debe considerar la eficiencia de colecta de las partículas, la estabilidad química, estabilidad térmica, costo y disponibilidad (Chow, 1995). Tomando en cuenta todo lo antes mencionado, en este trabajo se utilizaron los filtros que se describen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Características de los filtros.

Muestreador	Marca	Material del filtro	Tamaño de poro	Tamaño de partícula colectada
MiniVol	SPI-Pore	Policarbonato	0.4 μm	PM ₁₀
	Pall Corp	Teflon ®	3.0 μm	PM ₁₀
Ecotech	SPI-Pore	Policarbonato	0.4 μm	PM ₁₀
	Pall Corp	Teflon ®	3.0 μm	PM ₁₀
	SPI-Pore	Policarbonato	0.4 μm	PM _{2.5}
	Pall Corp	Teflon textregistered	3.0 μm	PM _{2.5}

Nota: Todos los filtros utilizados en este trabajo tienen un diámetro de 47 mm.

Se utilizan filtros de diferentes materiales para verificar que no exista alguna interferencia química o térmica, así como para un posible análisis posterior con alguna otra técnica analítica.

3.4.2. Tratamiento y medición de la masa de los filtros

Cada filtro utilizado en la colecta del aerosol se sometió a un tratamiento antes y después de ella. Antes de la colecta del material particulado cada filtro a utilizar es colocado en una caja de Petri; posteriormente, cada caja se introduce a un desecador de gel de sílice; las cajas de Petri con los filtros dentro permanecen en el desecador alrededor de 24 horas previas al muestreo. Minutos antes del muestreo se procede a medir la masa del filtro.

Para este proceso se emplea una electrobalanza Ohaus, modelo GA 200D, con un intervalo de pesaje de 40 g y 200 g, resolución de 10 μg e incertidumbre de 20 μg . Se introduce el filtro a la electrobalanza, se espera un tiempo a que se establezca la lectura y se registra la lectura final. Este proceso se realiza por triplicado para cada filtro.

Posteriormente se procede a la colecta del aerosol. Una vez concluido el tiempo programado se colocan los filtros nuevamente en las cajas de Petri, se introducen al desecador por aproximadamente 24 horas para así eliminar la humedad obtenida durante el muestreo. Una vez concluido este lapso de tiempo en el desecador, se

introduce nuevamente el filtro a la electrobalanza, se espera un tiempo a que se estabilice la lectura y se toma registro de la lectura final. De igual manera este proceso se realiza por triplicado para cada filtro.

3.5. Preparación y análisis de las muestras por XRF

Para analizar las muestras en el equipo de XRF, primero se montan sin necesidad de cortarlas en marcos de 5 cm por lado para luego introducirlas al soporte posicionador del espectrómetro de rayos X, tal y como se muestra en la figura 3.2. Se debe de tener cuidado de no tener contacto en ningún momento con la superficie del filtro, ya que se podrían alterar las mediciones.

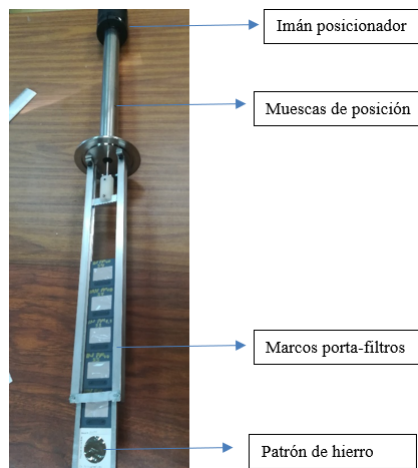


Figura 3.2: Soporte posicionador.

El soporte admite un máximo de seis muestras por corrida de irradiación, aunque uno de estos lugares habitualmente es ocupado por un patrón de hierro cuya concentración es de $42 \mu\text{g cm}^{-2}$, con una incertidumbre del 5%, el cual se introduce para verificar que el equipo funcione adecuadamente antes de cada corrida.

Una vez montadas las muestras en el soporte posicionador se puede comenzar el proceso de irradiación.

Las muestras colocadas dentro del equipo son bombardeadas con rayos X que se generan a partir de tubos con ánodos de rodio o tungsteno, según la región espectral de los elementos que se necesite estudiar. Para este estudio se utilizó un tubo con ánodo de rodio.

Para lograr la emisión de rayos X los tubos operan en todo momento con una diferencia de potencial de 50 kV y una corriente eléctrica de $500 \mu\text{A}$.

El detector utilizado es del tipo *Silicon Drift Detector (SDD)*, de la marca Amptek, modelo X-123, que puede insertarse en la cámara de vacío. Se hacen calibraciones del sistema de detección para irradiaciones del tubo de rayos X, usando un conjunto de patrones elementales en forma de película delgada. Los patrones utilizados para la calibración se listan en el **Anexo II**.

Se realizó la irradiación de cada filtro, por un periodo de 15 minutos para cada muestra. También se analizó un material de referencia certificado, SRM 2783 del National Institute of Standards and Technology, para verificar la exactitud de los resultados.

La preparación y el análisis de las muestras se realizó en el laboratorio de aerosoles del IFUNAM. En la figura 3.3 se muestra el espectrómetro de fluorescencia de rayos X con el cual cuenta el laboratorio de aerosoles del IFUNAM.



Figura 3.3: Espectrometro de XRF del Laboratorio de Aerosoles, del IFUNAM.

3.6. Cálculo de las concentraciones elementales

Los espectros de rayos X por dispersión de energía consisten en picos de una forma casi Gaussiana, correspondientes a las líneas de emisión características de cada átomo, del objeto de estudio (Barrera, 2012).

En la figura 3.4 se muestra un ejemplo en el cual se puede observar la información obtenida de un espectro, así como la interpretación que se da de los diferentes picos. En la figura 3.4 se observan los espectros obtenidos con dos tubos distintos de rayos X, con el fin de identificar la mejor respuesta para una muestra dada.

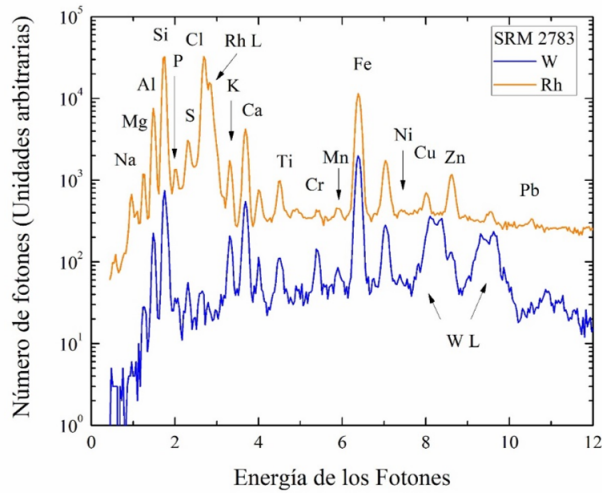


Figura 3.4: Espectro obtenido del material de referencia SRM2783. Tomada de: Mejía *et al.* (2018)

El equipo de XRF posee una conexión a un software que almacena la información del número de cuentas por canal de energía registradas. Por cada muestra se genera un archivo con extensión .mca dentro del cual se encuentran contenidos los metadatos de las irradiaciones (temperatura del tubo, tiempo total de irradiación, etc.). Es necesaria la traducción de estos archivos a espectros, para lo cual es necesario remover las primeras 12 y las últimas 71 líneas de cada archivo (donde estaban contenidos los metadatos) y cambiar la extensión de cada archivo a .asc. Esto se puede realizar de manera manual, o en la actualidad existe un software que es capaz de traducir cada espectro de forma más rápida.

Los archivos .asc finalmente pueden traducirse a espectros de 1024 canales con el empleo del programa AXIL desarrollado por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Con él se obtiene el área de cada pico de rayos X, esto mediante el método de mínimos cuadrados no lineales (Vekemans *et al.* 1994)

El área bajo la curva de cada uno de los picos de rayos X es convertida a contenido elemental. Para esto es necesario tomar en cuenta, además del área bajo la curva, el volumen de aire que pasó a través del filtro durante el periodo de muestro, para así obtener el contenido elemental por cada metro cúbico de aire, también se considera el área total de depósito en el filtro, entre otras variables (Espinosa *et al.* 2010).

Se emplea la ecuación 3.1 para el cálculo de las concentraciones elementales de cada muestra (Espinosa *et al.* 2010).

$$C_i = \frac{N_{X,i} \cdot A_d}{k_i \cdot T \cdot V} \quad (3.1)$$

Donde:

C_i Es la concentración del elemento i .

$N_{X,i}$ Es el número de fotones en el pico de rayos X del elemento i .

A_d Es el área de depósito en el filtro del material particulado.

k_i Es la respuesta del detector para ese elemento.

T Es el tiempo total de irradiación.

V es el volumen de aire bombeado, $V = F_R t$, en que F_R es el flujo real de aire y t es el tiempo de muestreo.

La ecuación 3.2 se utiliza para el cálculo de la incertidumbre asociada a cada concentración elemental (Espinosa *et al.* 2010).

$$u(C_i) = C_i \left[\frac{u^2(N_{X,i})}{N_{X,i}^2} + \frac{4u^2(D)}{D^2} + \frac{u^2(k_i)}{k_i^2} + \frac{u^2(T)}{T^2} + \frac{u^2(F_R)}{F_R} + \frac{u^2(t)}{t^2} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Donde:

D es el diámetro de depósito en el filtro.

El flujo real (F_R) se obtiene a partir de la corrección por presión y temperatura del lugar de muestreo, de acuerdo con los certificados de cada muestreador se tiene que: (Espinosa *et al.* 2010).

$$F_R = (m_v F_{Ind} + B_v) \sqrt{\frac{P_{std}}{P_r} \cdot \frac{T_R}{T_{std}}} \quad (3.3)$$

En la ecuación 3.3 se tiene que m_v y b_v son la pendiente y la ordenada al origen de la calibración, F_{Ind} es el flujo reportado en el rotámetro, P_{std} y T_{std} son la presión y la temperatura a nivel del mar y finalmente, P_r y T_r son la presión y temperatura promedio de sitio de muestreo.

3.7. Preparación y análisis de las muestras por SEM

Las muestras seleccionadas para el análisis por esta técnica deben de ser cortadas, por lo que para este análisis solamente se usan algunas de las muestras colectadas sobre filtros de policarbonato.

Se corta un cuadro de la muestra de aproximadamente 0.5 cm x 0.5 cm; el corte se hace lo más al centro posible, ya que se quiere tener la certeza de que se puedan observar la mayor cantidad de componentes posibles. En la figura 3.5 se muestra el corte que se le realizó a una muestra.

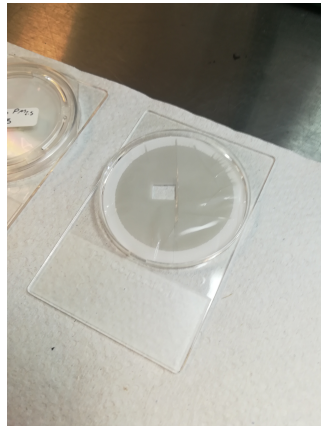


Figura 3.5: Corte de la muestra 08 para su análisis en el microscopio electrónico de barrido.

Una vez que se realizó el corte del cuadro, es colocado sobre un cilindro de metal, al cual se le adhiere cinta doble cara de carbón, ya que es conductora y es importante en esta técnica.

En la figura 3.6(a) se muestra, uno de los cilindros de aluminio utilizados, el cual ya tiene la cinta de carbón. Una vez colocada la muestra sobre el cilindro de aluminio se aplica pintura de carbón sobre el contorno, con el fin de asegurar la conductividad eléctrica. En la figura 3.6(b), se observa la muestra ya colocada sobre el cilindro y con pintura de carbón, la superficie se ve de color negro, pero esto se debe a que la muestra se pegó a la cinta de carbón y al hacer vacío predominó el color de la cinta.

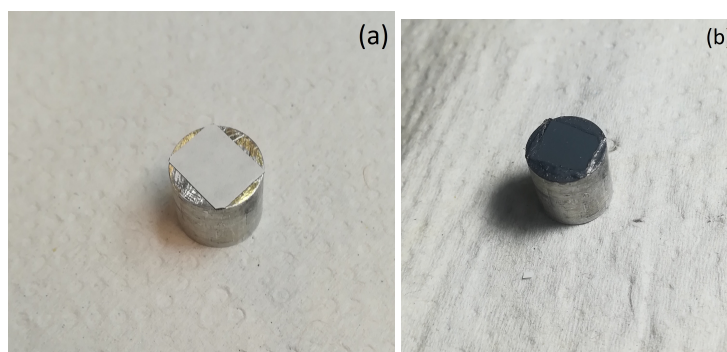


Figura 3.6: Muestra lista para aplicar recubrimiento de oro.

Finalmente se aplica un recubrimiento de oro en forma de película delgada

(del orden de 20 nm) sobre la muestra, con el fin de tener la mejor conductividad posible. No es posible apreciar a simple vista el recubrimiento.

La preparación y el análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio Central de Microscopía (LCM) del IFUNAM. En la figura 3.7 se muestra el microscopio electrónico de barrido 7800 F utilizado.

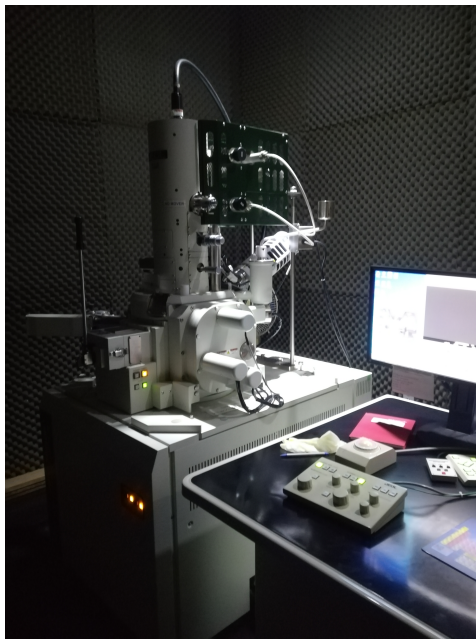


Figura 3.7: Microscopio electrónico de barrido del LCM del IFUNAM.

Para realizar este análisis fue necesario fijar las muestras ya preparadas en un porta-muestras; se colocan las muestras en el interior del microscopio y se le hace vacío al equipo de aproximadamente 9.6×10^{-6} torr. Las muestras se colocan a una distancia de 10 mm de la salida del haz de electrones. El microscopio electrónico 780 F con el que se trabajó tiene acoplado un detector Si(Li) de la marca *Oxford X maxⁿ 50*. Este detector cuenta con una ventana de berilio (Be) y es capaz de hacer un análisis elemental, basado en el principio básico de la espectroscopía de rayos X, con la particularidad de que la radiación primaria que excita a los átomos son electrones.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Sección 3.2** se menciona que el periodo de muestreo abarcó del 21 de septiembre de 2018 al 16 de enero de 2019; se colectaron un total de 105 muestras.

Es decir, se obtuvieron 35 muestras para el equipo MiniVol PM₁₀, 35 para el ECOTECH PM₁₀ y 35 para el ECOTECH PM_{2.5}. Aunque el periodo de muestreo fue de más de 3 meses, algunos días no se realizó recolección de muestras, debido a problemas con la programación de los muestreadores, fines de semana o días inhábiles.

4.1. Concentración másica

A continuación, se muestra la concentración másica obtenida de las muestras colectadas. En la figura 4.1 se observa la concentración másica tanto de las muestras colectas en el interior y en el exterior.

En la figura 4.1 se puede observar como en promedio la masa para la sección PM₁₀ es más menos similar para ambos muestreadores, esto se debe a que se encuentra en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la adecuada forma de colección de ambos muestreadores.

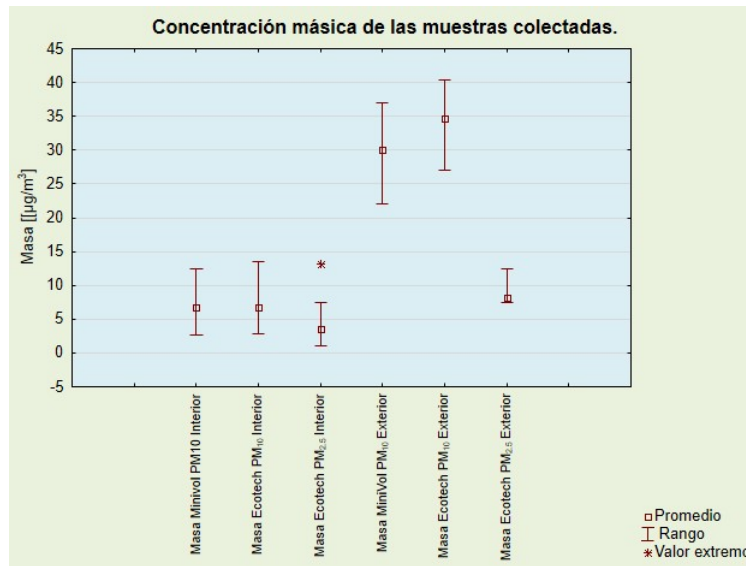


Figura 4.1: Concentración másica de las muestras colectadas para el presente estudio.

También se observa que la masa de la fracción PM_{2.5} es menor que la PM₁₀ algo que es de esperarse ya que las PM₁₀ a su vez ya contienen a las PM_{2.5}.

Por último, se observa que la concentración másica de las muestras colectadas en el exterior es mayor que la de las muestras colectadas en el interior, de igual manera esto es de suponerse ya que en el exterior se tienen diversas fuentes de emisión del aerosol y en general se espera una mayor cantidad de partículas que en los ambientes cerrados.

Esto concuerda con lo encontrado por Chao *et al.* (2002), en donde realiza un estudio comparando la concentración másica de partículas en diferentes casas y la concentración másica de partículas en las calles cercanas a dichas casas y concluye que en promedio la concentración másica es mayor en el exterior que en el interior de las casas.

4.2. Espectros obtenidos mediante XRF

A continuación, se muestran algunos de los espectros obtenidos a partir del análisis con XRF de las muestras del aerosol atmosférico presente en el LEMA. Es importante mencionar que el espectro no se encuentra completo ya que solamente es de carácter ilustrativo.

En la figura 4.2 se puede observar una comparación de dos espectros. Se trata

de un par de muestras de partículas PM_{10} colectadas simultáneamente por el equipo MiniVol y por el equipo ECOTECH, a partir del día 28 de septiembre del 2018 a las 9:00 hrs a las 8:50 hrs del 29 de septiembre de 2018, sobre filtros de policarbonato.

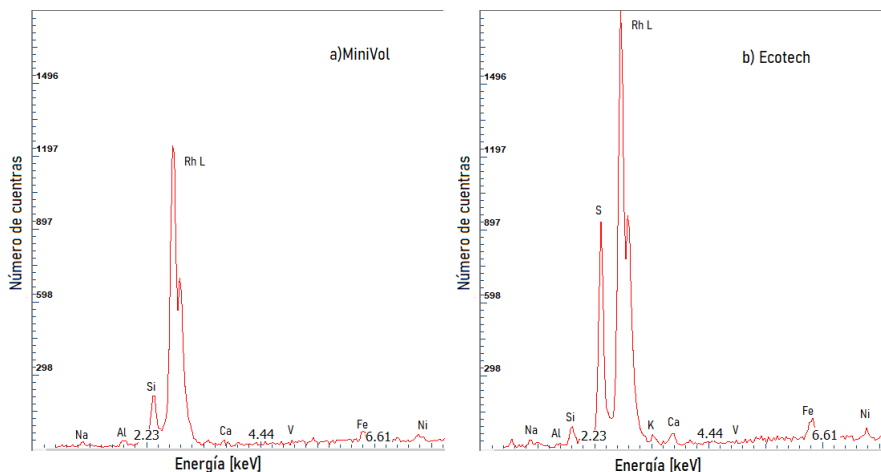


Figura 4.2: Espectros de XRF obtenidos de las muestras de PM_{10} colectadas del 28 al 29 de septiembre. a) Muestra colectada con MiniVol. b) Muestra colectada con Ecotech.

En el espectro (a), el cual corresponde a la muestra colectada con el MiniVol, se observa que la intensidad de las líneas es menor comparado con la intensidad de las líneas obtenidas de la muestra colectada con el equipo ECOTECH, espectro (b), lo cual resulta predecible, debido a la diferencia en el flujo de aire que pasó por el filtro y por lo tanto a la cantidad de material particulado colectado. Algo importante a destacar de estos espectros es que en el de MiniVol no es posible distinguir de manera confiable el pico correspondiente al potasio (K), ya que si bien se puede observar, su intensidad es tan baja que no se puede tener la certeza de que se trate del elemento mencionado o se trate solamente de ruido del detector (es decir, está cerca o por debajo del límite de detección). En contraste, en la muestra colectada con el equipo ECOTECH sí se distingue bien el pico correspondiente a la presencia de potasio.

Ahora en la figura 4.3 se muestra la comparación entre los espectros de dos muestras de partículas PM_{10} colectadas de manera simultánea, en este caso las partículas fueron colectadas sobre filtros de Teflon[®], a partir del día 23 de octubre de 2018 a las 9:00 hrs a las 8:50 hrs del 24 de octubre de 2018.

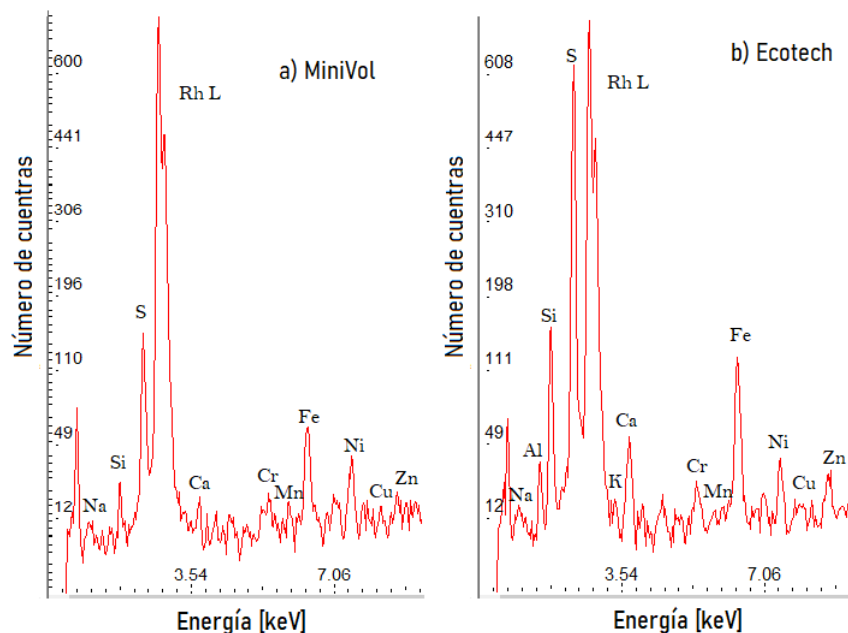


Figura 4.3: Espectros de XRF obtenido de la muestra de PM_{10} colectada del 23 al 24 de octubre. a) Muestra colectada con MiniVol. b) Muestra colectada con Ecotech.

En estos espectros nuevamente se observa la diferencia en la intensidad, pero de igual manera se observa cómo no es perceptible el pico de potasio (K) en la muestra obtenida con el MiniVol, espectro (a), mientras que la obtenida con el equipo ECOTECH, espectro (b), sí lo presenta. Ocurre algo semejante en el caso del aluminio (Al).

Con esto se comprueba que lo planteado en la **Sección 1.5** es cierto, ya que el equipo Ecotech brinda más información que el equipo MiniVol, ya que en los espectros de las figuras 4.2 y 4.3 se observa como los picos correspondientes al aluminio y al potasio no son distinguibles, lo cual no indica que este elemento sólo este presente en la muestra colectada con el equipo ECOTECH, sino que en la muestra colectada por el MiniVol la concentración es tan baja que no supera el límite de detección.

4.3. Concentraciones elementales

Una vez que todas las muestras son analizadas con el equipo de XRF se procede al cálculo de las concentraciones elementales, procedimiento que se explica de

mejor manera en la **Sección 3.6**

A continuación, se muestra una tabla con las concentraciones elementales promedio con sus respectivas incertidumbres obtenidas mediante las ecuaciones 3.1 y 3.2, para el muestreo que se realizó dentro del LEMA:

La información completa sobre la concentración elemental de cada uno de los filtros se encuentra en el **Anexo III**

Tabla 4.1: Concentraciones elementales promedio de las muestras de PM₁₀ coleccionadas con el muestreador MiniVol en el interior del LEMA.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Máximo	Mínimo	Número de apariciones
Na	0.27 (0.15)	0.70 (0.39)	0.008 (0.078)	15
Mg	0.094 (0.022)	0.265 (0.48)	0.014 (0.010)	11
Al	0.053 (0.014)	0.211 (0.050)	0.003 (0.003)	27
Si	0.141 (0.027)	0.478 (0.072)	0.011 (0.008)	35
P	0.033 (0.011)	0.197 (0.039)	0.001 (0.003)	23
S	0.62 (0.13)	2.92 (0.51)	0.056 (0.049)	35
K	0.078 (0.043)	0.34 (0.12)	0.004 (0.027)	12
Ca	0.157 (0.034)	0.480 (0.082)	0.009 (0.014)	35
V	0.038 (0.016)	0.107 (0.039)	0.004 (0.007)	6
Mn	0.300 (0.049)	0.596 (0.075)	0.003 (0.023)	2
Fe	0.240 (0.067)	0.79 (0.18)	0.055 (0.039)	34
Ni	0.251 (0.040)	0.93 (0.12)	0.119 (0.023)	35
Cu	0.045 (0.019)	0.314 (0.056)	0.001 (0.009)	16
Zn	0.159 (0.028)	0.610 (0.084)	0.036 (0.012)	35
Sr	0.037 (0.012)	0.079 (0.018)	0.004 (0.006)	5
Pb	0.093 (0.067)	0.39 (0.33)	0.012 (0.013)	5

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Tabla 4.2: Concentraciones elementales promedio de las muestras de PM₁₀ coleccionadas con el muestreador ECOTECH en el interior del LEMA.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Máximo	Mínimo	Número de apariciones
Na	0.08 (0.14)	0.38 (0.25)	0.004 (0.101)	22
Mg	0.024 (0.010)	0.128 (0.030)	0.002 (0.002)	17
Al	0.107 (0.049)	1.61 (0.18)	0.009 (0.008)	35
Si	0.17 (0.13)	0.48 (0.44)	0.037 (0.050)	35
P	0.046 (0.022)	0.752 (0.061)	0.004 (0.007)	31
S	1.03 (0.54)	3.74 (0.51)	0.19 (0.18)	35
K	0.112 (0.092)	1.53 (0.21)	0.002 (0.041)	29
Ca	0.27 (0.13)	3.77 (0.33)	0.029 (0.037)	35
V	0.063 (0.019)	0.653 (0.058)	0.002 (0.005)	13
Mn	0.012 (0.018)	0.022 (0.015)	0.004 (0.010)	7
Fe	0.23 (0.19)	2.53 (0.33)	0.079 (0.039)	35
Ni	0.119 (0.063)	1.76 (0.11)	0.029 (0.039)	35
Cu	0.016 (0.022)	0.059 (0.040)	0.002 (0.001)	23
Zn	0.142 (0.063)	2.24 (0.13)	0.022 (0.029)	35
Sr	0.095 (0.023)	0.185 (0.040)	0.004 (0.005)	2
Pb	0.105 (0.095)	0.45 (0.37)	0.010 (0.015)	5

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Tabla 4.3: Concentraciones elementales promedio de las muestras de PM_{2.5} colectadas con el muestreador ECOTECH en el interior del LEMA.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Máximo	Mínimo	Número de apariciones
Na	0.08 (0.14)	0.53 (0.30)	0.005 (0.087)	20
Mg	0.017 (0.016)	0.048 (0.033)	0.004 (0.004)	16
Al	0.024 (0.020)	0.27 (0.23)	0.002 (0.002)	27
Si	0.060 (0.054)	0.74 (0.65)	0.006 (0.011)	35
P	0.015 (0.014)	0.102 (0.034)	0.001 (0.002)	32
S	0.38 (0.31)	1.553 (1.046)	0.034 (0.069)	35
K	0.032 (0.067)	0.16 (0.13)	0.002 (0.041)	22
Ca	0.090 (0.084)	1.64 (1.41)	0.006 (0.016)	35
V	0.007 (0.010)	0.025 (0.026)	0.001 (0.005)	13
Mn	< LD	< LD	< LD	0
Fe	0.08 (0.09)	0.26 (0.23)	0.006 (0.010)	35
Ni	0.069 (0.062)	0.246 (0.085)	0.035 (0.044)	35
Cu	0.017 (0.021)	0.102 (0.068)	0.001 (0.001)	21
Zn	0.044 (0.038)	0.144 (0.068)	0.004 (0.010)	35
Sr	0.006 (0.006)	0.009 (0.007)	0.004 (0.005)	3
Pb	< LD	< LD	< LD	0

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección).

Con el fin de tener una comparación de las concentraciones elementales obtenidas dentro del LEMA se realizó un muestreo de tres días en la azotea del edificio de Colisiones del IFUNAM, con la intención de medir las concentraciones elementales dentro y fuera de las instalaciones.

El muestreo se llevo acabo del 23 al 25 de enero, colectando una muestra por día (24 horas) para cada uno de los muestreadores, la hora de muestreo fue de las 9:00 hrs a las 9:00 hrs del día siguiente.

A continuación, se muestran las concentraciones promedio obtenidas para cada uno de los muestreadores.

Tabla 4.4: Concentraciones elementales promedio de las muestras de PM₁₀ coleccionadas con el muestreador MiniVol en la azotea del IFUNAM.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g m}^{-3}$]
Na	0.27 (0.19)
Mg	0.187 (0.052)
Al	0.622 (0.067)
Si	1.77 (0.17)
P	0.140 (0.026)
S	1.23 (0.22)
K	0.582 (0.091)
Ca	1.21 (0.10)
V	0.017 (0.015)
Mn	< LD
Fe	1.03 (0.14)
Ni	0.473 (0.062)
Cu	0.101 (0.027)
Zn	0.253 (0.039)
Sr	< LD
Pb	0.14 (0.11)

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección).

Tabla 4.5: Concentraciones elementales promedio de las muestras de PM₁₀ coleccionadas con el muestreador ECOTECH en la azotea del IFUNAM.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g m}^{-3}$]
Na	0.28 (0.22)
Mg	0.154 (0.091)
Al	1.40 (0.63)
Si	2.33 (1.00)
P	0.082 (0.038)
S	1.00 (0.47)
K	0.65 (0.33)
Ca	2.17 (0.98)
V	0.018 (0.012)
Mn	0.026 (0.047)
Fe	1.54 (0.76)
Ni	0.12 (0.09)
Cu	0.046 (0.029)
Zn	0.12 (0.10)
Sr	< LD
Pb	0.15 (0.12)

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección).

Tabla 4.6: Concentraciones elementales promedio de las muestras de PM_{2.5} colectadas con el muestreador ECOTECH en la azotea del IFUNAM.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g m}^{-3}$]
Na	0.036 (0.095)
Mg	0.027 (0.016)
Al	0.034 (0.020)
Si	0.139 (0.054)
P	0.052 (0.014)
S	0.57 (0.30)
K	0.203 (0.067)
Ca	0.134 (0.084)
V	< LD
Mn	0.007 (0.010)
Fe	0.13 (0.11)
Ni	0.118 (0.062)
Cu	0.023 (0.026)
Zn	0.058 (0.038)
Sr	< LD
Pb	0.098 (0.095)

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección).

En las figuras 4.4 y 4.5 se observa una comparación entre las concentraciones elementales promedio obtenidas de las muestras tomadas en el interior del LEMA así como de las muestras colectadas en la azoteas del IFUNAM. Estas muestras corresponden a la fracción PM₁₀.

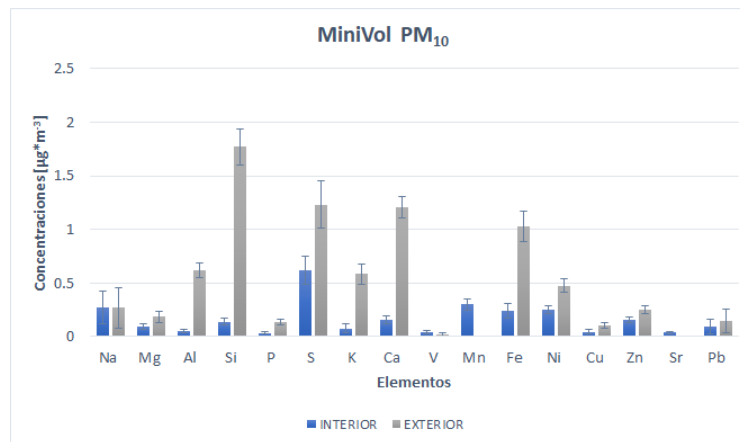


Figura 4.4: Comparación de concentraciones elementales promedio en PM₁₀, colectadas con el equipo MiniVol dentro y fuera del LEMA.

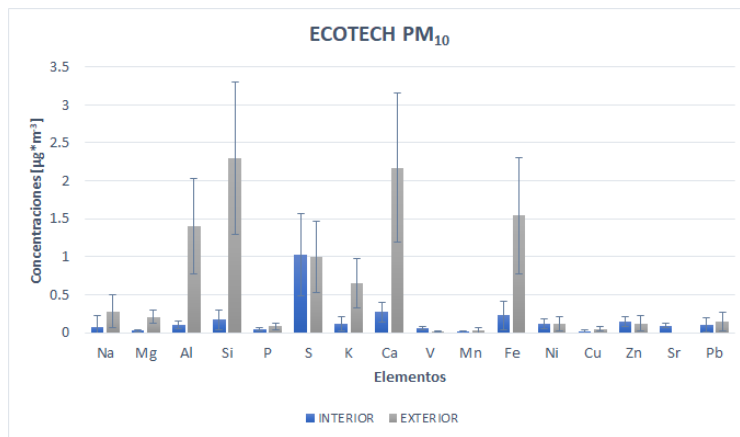


Figura 4.5: Comparación de concentraciones elementales promedio en PM₁₀, colectadas con el equipo ECOTECH dentro y fuera del LEMA.

En la figura 4.6 se observa una comparación entre las concentraciones elementales promedio obtenidas de las muestras tomadas en el interior del LEMA así como de las muestras colectadas en la azoteas del IFUNAM. Estas muestras corresponden a la fracción PM_{2.5}.

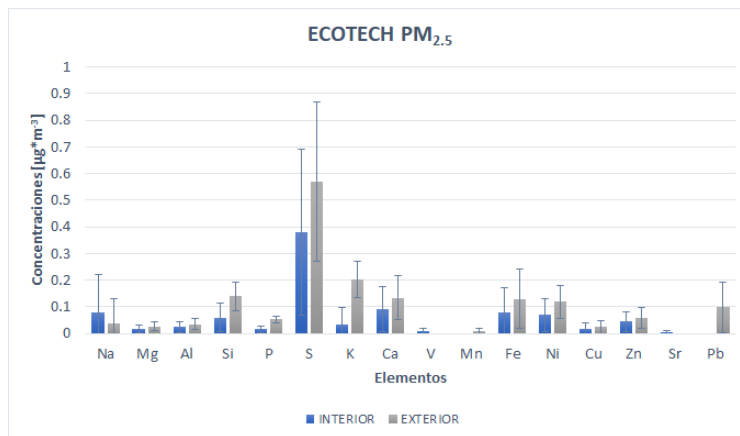


Figura 4.6: Comparación de concentraciones elementales en PM_{2.5}, colectadas con el equipo ECOTECH dentro y fuera del LEMA.

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran las concentraciones elementales promedio obtenidas así como el valor máximo y el mínimo para cada elemento y finalmente también se muestra el número de apariciones de ese elemento en las

muestras colectadas. El número de apariciones varía entre las diferentes muestras, ya que si bien en algunas el elemento no superaba el límite de detección debido a su baja concentración, en algunos otros casos el elemento era detectado, pero no superaba el límite de cuantificación del equipo.

Las concentraciones elementales muestran, en general, una tendencia esperada, una concentración elemental promedio similar entre ambos muestreadores, concentraciones elementales promedio relativamente bajas, en su mayoría. Casos como el del Na y Mg son excepciones, ya que las concentraciones de estos elementos no son tan confiables por la eficiencia que tiene el equipo para la detección y cuantificación de elementos tan ligeros.

En general las concentraciones elementales no son alarmantes ya que son en su mayoría menores que las obtenidas en el exterior del laboratorio. Algo similar a lo encontrado por Chao *et al.* (2002); en su estudio, las concentraciones de algunos elementos son mayores en el interior, pero en la mayoría de los elementos es mayor la concentración obtenida en el exterior. Algo que llama la atención es la concentración de azufre (S), la cual es alta y para el caso del muestreador ECO-TECH PM₁₀ incluso es mayor la medida dentro del laboratorio que la determinada para las muestras colectadas en la azotea del IFUNAM, lo cual puede deberse a la presencia de una fuente de emisión puntual del aerosol compuesto por azufre en el área de muestreo.

Con las concentraciones elementales promedio aquí listadas en la siguiente sección se muestran los factores de enriquecimiento calculados, mismos que serán de utilidad para una posible deducción de la o las fuentes de emisión del aerosol atmosférico presente en el LEMA.

4.4. Factor de Enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento (*FE*) es utilizado en diversos estudios ecotoxicológicos y de química ambiental como referencia para conocer la fuente emisora de algunos de los elementos presentes en la muestra analizada.

El *FE* de una muestra con respecto a la corteza terrestre se calcula de una manera muy simple, se toman en cuenta los elementos con mayor abundancia en la corteza terrestre, como es el caso del Al, Si y/o Fe (Lawson & Winchester, 1979). En este estudio se considera al Si como el elemento respecto al cual se calculará el factor de enriquecimiento, ya que es uno de los elementos que se puede cuantificar de una mejor manera con la técnica de XRF.

$$FE = (X/Si)_{muestra} / (X/Si)_{cortezaterrestre} \quad (4.1)$$

Siendo X el elemento del cual se quiere conocer el factor de enriquecimiento.

Para el cálculo de la incertidumbre asociada al factor de enriquecimiento se utiliza la ecuación 4.2:

$$u(FE) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial FE^2}{\partial X_i} \right) \cdot u^2(X_i)} \quad (4.2)$$

Simplificando la ecuación 4.2 se tiene que:

$$u(FE) = FE \cdot \sqrt{\frac{u^2(C_{E,m})}{C_{E,m}^2} + \frac{u^2(C_{Si,m})}{C_{Si,m}^2}} \quad (4.3)$$

Donde:

FE es el factor de enriquecimiento del elemento.

$C_{E,m}$ es la concentración del elemento en la muestra.

$C_{Si,m}$ es la concentración de silicio en a muestra.

$u(C_{E,m})$ es la incertidumbre asociada a la concentración del elemento en la muestra.

$u(C_{Si,m})$ es la incertidumbre asociada a la concentración de silicio en la muestra.

Un FE cercano a 1 indica que el elemento no se encuentra enriquecido por fuentes externas sino que es de un origen natural, un FE que varía entre 1 y 10 es un elemento que tiene aportaciones de fuentes antropogénicas y naturales, un FE entre 10 y 100 indica que el elemento tiene una gran aportación de fuentes antropogénicas, un $FE > 100$ indica que se tiene un elemento altamente enriquecido por fuentes antropogénicas, las cuales han contribuido fuertemente en la concentración del elemento (Lawson & Winchester, 1979).

En la tabla 9.1 del **Anexo IV** se muestra el cociente entre la concentración elemental de algunos de los elementos presentes en la corteza terrestre y la concentración elemental del silicio presente en la corteza terrestre. Este cociente es necesario para el cálculo del FE de los elementos presentes en las muestras colectadas.

En las tablas 9.2, 9.3 y 9.4, del **Anexo IV**, se muestran los factores de enriquecimiento promedio obtenidos para algunos de los elementos en las muestras colectadas, tanto las colectadas en el interior como las colectadas en el exterior.

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra una comparación entre los factores de enriquecimiento promedio calculados para algunos elementos en las muestras obtenidas en el interior del LEMA y las obtenidas en la azotea del IFUNAM. En estas figuras solamente se muestran los elementos con mayor número de repeticiones en las muestras.

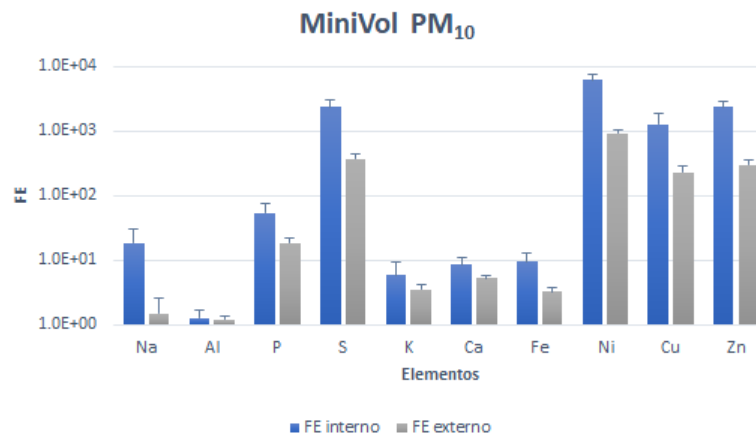


Figura 4.7: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras colectadas con el muestreador MiniVol PM₁₀.

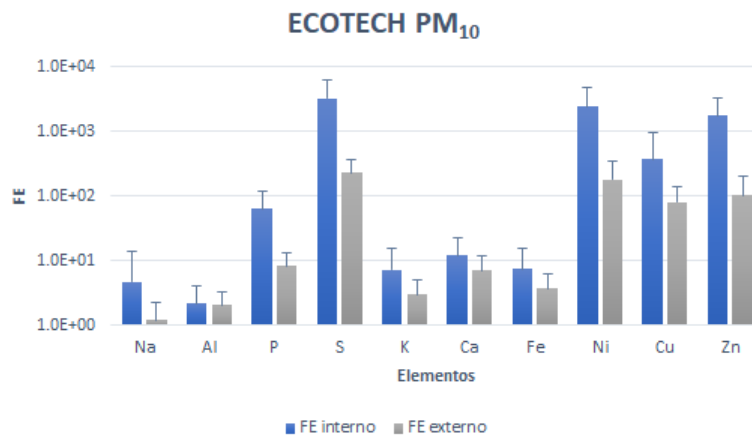


Figura 4.8: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras colectadas con el muestreador ECOTECH PM₁₀.

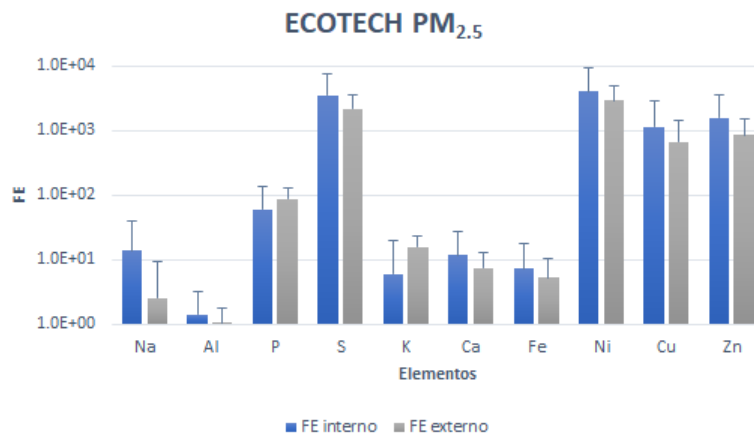


Figura 4.9: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras colectadas con el muestreador ECOTECH PM_{2.5}.

Ahora en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 nuevamente se muestra la comparación entre el factor de enriquecimiento calculado para las muestras obtenidas en el interior del LEMA y las obtenidas en la azotea del edificio de colisiones del IFUNAM, pero en este caso solamente se muestran los elementos con un menor número de repeticiones en las muestras, con el fin de ser más claros en la interpretación de los resultados.

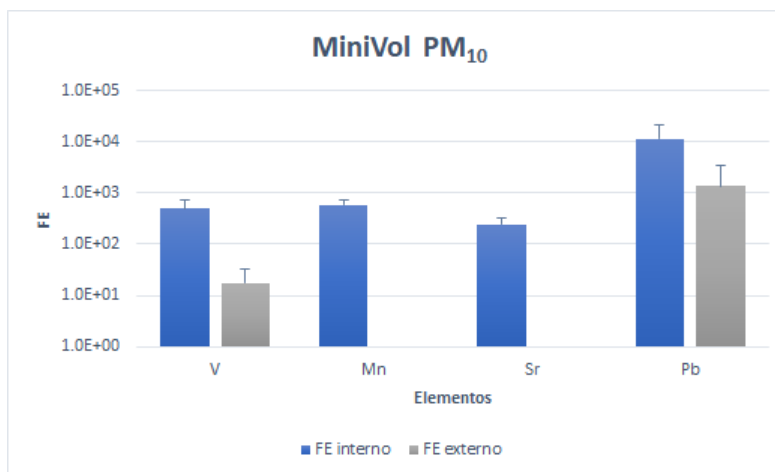


Figura 4.10: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras colectadas con el muestreador MiniVol PM₁₀.

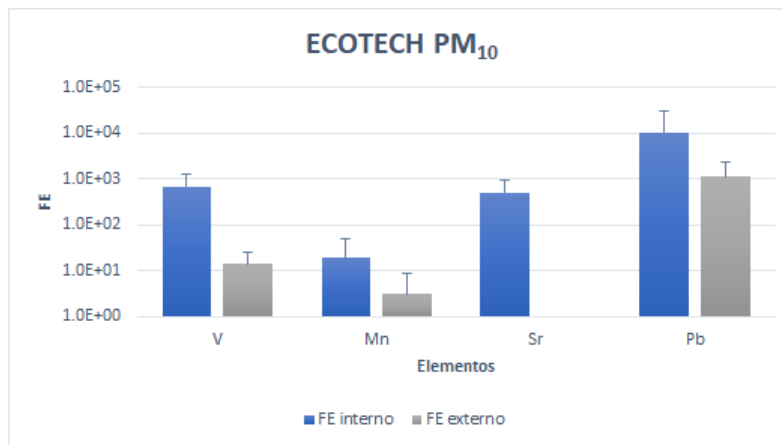


Figura 4.11: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras colectadas con el muestreador ECOTECH PM₁₀.

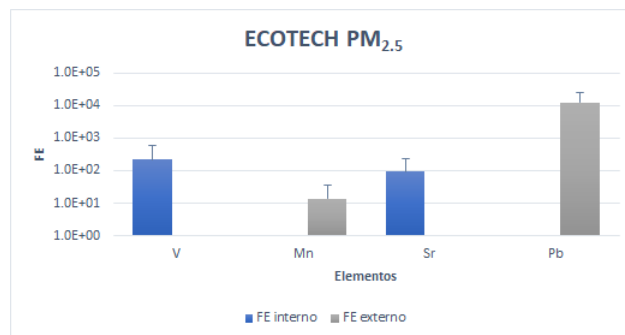


Figura 4.12: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras colectadas con el muestreador ECOTECH PM_{2.5}.

Después de realizar los cálculos correspondientes para obtener el FE promedio para algunos de los elementos en las muestras se tiene que en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se puede observar el siguiente comportamiento; lo primero es que en general los elementos presentes en el interior del LEMA se encuentran más enriquecidos por fuentes externas que los presentes en la azotea del IFUNAM. Esto resulta lógico ya que en el interior del LEMA las partículas no tienen una circulación por los movimientos del viento. Más bien se encuentran en constante recirculación dentro del laboratorio debido a que, como se mencionó en la **Sección 2.1**, las ventanas presentes en el laboratorio no se abren de manera habitual, una de las puertas de acceso comunica con un pasillo cerrado y la puerta que comunica con el exterior

no se abre de manera constante.

Las partículas también se encuentran en constante recirculación debido a la presencia del sistema de aire acondicionado. Por este motivo es que resulta lógico que las partículas del interior se encuentren mayormente enriquecidas por fuentes externas que las colectadas en la azotea del IFUNAM. De acuerdo con Zhao *et al.* (2004), el depósito y concentración de las partículas se ve influenciada por las condiciones de ventilación dentro de los ambientes cerrados.

Algo más que se puede observar en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 es que los elementos como Na, Al, K, Ca y Fe cuentan con un factor menor que 10, $FE < 10$, y dado que algunos de estos elementos se relacionan con fuentes como polvo o suelo se puede deducir, con apoyo de otras pruebas, que esos elementos, Ca y Fe, tienen su origen en la resuspensión de polvo o suelo natural presente en el LEMA.

Casos como el del S, Ni, Cu y Zn, en donde se tiene un $FE > 100$, se dice que son elementos que deben su concentración en su mayoría por aportaciones de fuentes antropogénicas. Nuevamente se observa que el S tiene una alta importancia en el análisis, ya que al tener un factor de enriquecimiento tan alto en los tres casos se confirma nuevamente que tiene una o más fuentes de emisión dentro del laboratorio.

En las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se presentan a los elementos con un menor número de apariciones dentro del muestreo; tienen un alto factor de enriquecimiento; pero debido a que no tienen una aparición constante dentro del muestreo no se pueden hacer muchas deducciones sobre su posible origen.

De acuerdo con el personal que labora en el LEMA se sabe que el acelerador de iones requiere de hexafluoruro de azufre, SF_6 , para mantener el aislamiento en el acelerador. Con esto se puede llegar a energías altas, necesarias para realizar algunos experimentos. Esto resulta de gran importancia ya que en los análisis antes hechos destaca la relevancia que toma el azufre en el presente estudio, y el hexafluoruro de azufre aquí utilizado podría ser una fuente de emisión.

4.5. Análisis de Componentes Principales

Con el fin de conocer las posibles fuentes de emisión del aerosol atmosférico presente en el LEMA se realiza un análisis por componentes principales o PCA por sus siglas en inglés (*Principal Component Analysis*). El PCA tiene como objetivo reducir el número original de variables, X , (X_1, X_2, \dots, X_n) a uno menor de nuevas variables denominadas componentes principales, CP , (CP_1, CP_2, \dots, CP_n). Los componentes principales son combinaciones lineales de las variables originales que agrupan la mayor parte de la información contenida en los datos iniciales (Henry *et al.* 1984).

El primer paso para la aplicación de PCA es conocer el número mínimo de muestras requerido para este tipo de análisis.

Si se miden V variables en N muestras, se dice que el número de grados de libertad es el producto NV , pero en el análisis por componentes principales factores como la media, las correlaciones y la desviación normal, reducen el número de grados de libertad, de tal manera que el número de grados de libertad (D) es: (Henry *et al.* 1984; Miranda, 1994)

$$D = NV - V - \frac{V(V+1)}{2} \quad (4.4)$$

Como se mencionó anteriormente NV se conoce como el número de grados de libertad, V es el número total de las medias calculadas y finalmente $V(V+1)/2$ es el número total de las desviaciones normales y las correlaciones calculadas. De tal manera que al dividir todo entre el número de variables V se tiene: (Miranda, 1994)

$$\frac{D}{V} = N - \frac{V+3}{2} \quad (4.5)$$

De acuerdo con Henry *et al.* (1984) si D/V es mayor que 30 el PCA se puede realizar de manera apropiada. De tal manera que la ecuación 4.5 se puede reescribir como:

$$N > 30 + \frac{V+3}{2} \quad (4.6)$$

En el caso del presente estudio se establece que el número de variables, o elementos, serán 12 ya que son estos los que se repiten con mayor frecuencia en las muestras, resolviendo la ecuación 4.6 se tiene que $N=37.5$, en este estudio sólo se cuentan con 35 muestras y la recomendación es que $N > 37.5$, pero dado que la diferencia es de 2.5 muestras se decide realizar el análisis por PCA ya que se piensa que no existe una gran diferencia entre el número de muestras colectadas y el recomendado para realizar el análisis.

Posteriormente se procede al cálculo de los componentes principales, el cual consiste en la transformación del espacio vectorial para realizar la combinación lineal de las variables originales, este procedimiento se realizó con ayuda del software *STATISTICA* (Statistica/W, 2015).

En el **Anexo V** se muestran las correlaciones obtenidas para cada uno de los muestreadores y las fracciones del aerosol utilizados. La correlación sólo se hace entre los elementos con mayor número de repeticiones; en este caso se decide que el número de apariciones mínima que debe tener el elemento para ser considerado en la correlación sea de 10, ya que, si bien esto representa menos del 50% de las

muestras, al tomar un número mayor de apariciones el análisis estadístico no sería bueno por tan bajo número de elementos a considerar. Algo importante a mencionar es que el número de apariciones no depende precisamente a la presencia o ausencia del elemento en la muestra, sino a la no superación de límites de cuantificación, esto pasa en especial con el equipo de muestreo MiniVol, ya que al coleccionar tan poco material no es posible su cuantificación en todos los casos.

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra lo obtenido en el PCA. Se presentan dos componentes principales que explican más del 80% de la varianza de los datos, así como el valor de los componentes calculados para las variables (elementos) más importantes.

Tabla 4.7: Análisis de componentes principales para las muestras obtenidas en el interior del LEMA con el equipo MiniVol PM₁₀

Variable	Componente 1	Componente 2
Al	0.567	1.595
Si	0.923	0.026
S	0.750	-0.530
Ca	0.742	0.101
Fe	0.938	-0.090
Ni	0.883	-0.004
Zn	0.873	0.196
Los dos primeros componentes principales explican el 81.7% de la varianza.		
Componentes	S ²	
1	0.679	
2	0.138	

Tabla 4.8: Análisis de componentes principales para las muestras obtenidas en el interior del LEMA con el equipo ECOTECH PM₁₀

Variable	Componente 1	Componente 2
Al	0.980	-0.158
Si	0.636	0.680
P	0.939	-0.082
S	0.694	0.593
K	0.908	-0.071
Ca	0.989	-0.129
Fe	0.985	-0.137
Ni	0.985	-0.140
Zn	0.981	-0.160
Los dos primeros componentes principales explican el 95.8 % de la varianza.		
Componentes	S ²	
1	0.851	
2	0.107	

Tabla 4.9: Análisis de componentes principales para las muestras obtenidas en el interior del LEMA con el equipo ECOTECH PM_{2.5}

Variable	Componente 1	Componente 2
Si	0.774	-0.621
P	1.159	0.059
S	0.605	0.472
Ca	0.647	-0.747
Fe	0.886	-0.107
Ni	0.677	0.577
Zn	0.732	0.485
Los dos primeros componentes principales explican el 83.3 % de la varianza.		
Componentes	S ²	
1	0.580	
2	0.253	

Se realiza el PCA y se pretenden conocer las fuentes de emisión del aerosol, debido a que los elementos más importantes en el análisis con un componente más alto son aquéllos que tienen una alta relación entre sus diferentes concentraciones elementales y por lo tanto se puede suponer que fueron emitidos por la misma fuente.

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se observa cómo entre los elementos de mayor importancia y con el primer componente principal alto son el Si, Ca, Fe y Zn. Recordando lo mencionado en la tabla 1.2 se puede suponer que en las muestras obtenidas en el interior del LEMA se tiene una alta presencia de suelo y polvo

mineral, lo cual se puede interpretar como la resuspensión del polvo por el constante movimiento que existe dentro del laboratorio. En una deducción un poco más arriesgada también se podría pensar que se debe a polvo emitido a través del aire acondicionado, aunque no se cuentan con los elementos suficientes para afirmar dicha suposición.

Lo antes mencionado coincide de igual manera con lo encontrado por Chao *et al.* (2002), en su estudio se realiza una comparación entre la composición del aerosol atmosférico presente en diferentes casas y la composición del aerosol presente en las avenidas cercanas a las casas. Aunque los ambientes de estudios son distintos se encuentra que una parte importante de las partículas son provenientes del suelo y/o polvo, y otra parte también importante puede ser producto del funcionamiento de los diversos equipos existentes en las áreas de muestreo.

Sigue llamando la atención la gran importancia que tiene el S, ya que como se mencionó anteriormente, tiene concentraciones elevadas y en el PCA se observa que incluso en el segundo componente principal el azufre tiene un factor alto, superior a 0.5. Esto indica que aparte de su posible origen industrial, dada su relación con el aluminio, puede tener otra fuente de emisión. Esta hipótesis debe ser complementada con otro análisis.

4.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se realizó el análisis de tres de las muestras colectadas en el interior del LEMA, las cuales fueron: ECOTECH PM₁₀ 13, ECOTECH PM₁₀ 08 y ECOTECH PM_{2.5} 08, se eligen sólo estas tres muestras debido a la disponibilidad de tiempo en el microscopio y también porque al ser colectadas con el muestreador de alto flujo se asegura la presencia de una mayor cantidad de partículas. Otro factor importante es que, como se mencionó en la **Sección 3.7**, estas muestras se colectaron sobre filtros de policarbonato y eso facilita su preparación para el análisis.

El análisis elemental de las muestras mediante la técnica de SEM es solamente cualitativo, ya que no se cuenta con todas las características necesarias para hacer un cálculo adecuado de la concentración elemental. Los resultados cuantitativos fueron los obtenidos mediante XRF.

Del análisis de las muestras se obtuvieron distintas imágenes. A continuación, se muestran algunas de las fotografías obtenidas, que son las más representativas de las muestras.

4.6.1. Muestras PM_{2.5}

En la figura 4.13 se observan algunas de las zonas representativas de la muestra ECOTECH PM_{2.5} 08; se aprecian partículas de diversos tamaños y formas. Se decidió hacer un análisis elemental de los conjuntos de partículas observados en las muestras.

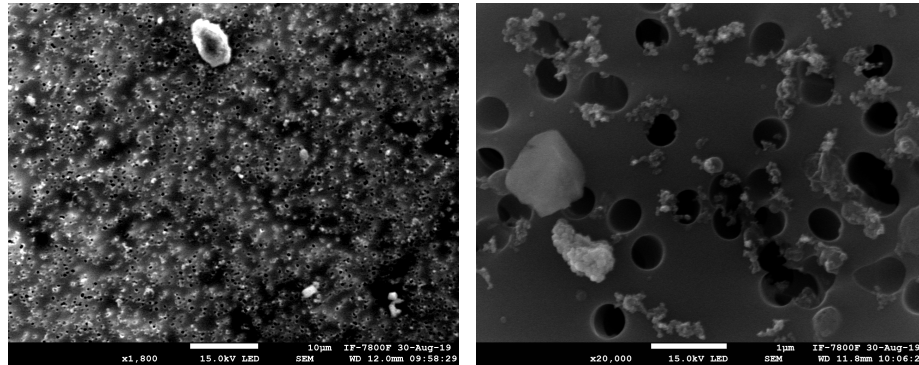


Figura 4.13: Regiones de la muestra ECOTECH PM_{2.5} 08.

En la figura 4.14 se muestra la región en la que se realizó el análisis elemental así como el espectro obtenido de dicha zona; en el espectro se puede observar la presencia de los siguientes elementos: C, Ca, O, Na, Mg, Si, Cl, K y Au.

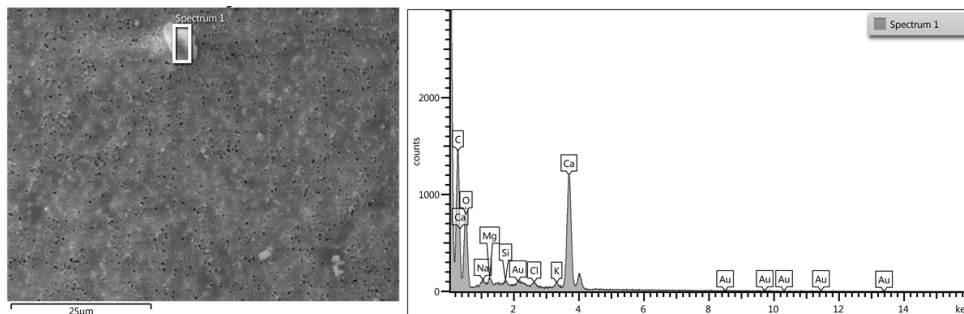


Figura 4.14: Regiones de la muestra ECOTECH PM_{2.5} 08.

En el espectro se observa la presencia de elementos como Na, Mg, Si, Ca y K, los cuales son típicos de la composición del suelo natural y el polvo, según la tabla 1.2. Esto concuerda con el análisis de PCA en la **Sección 4.5**.

En el espectro domina la presencia de carbón (C) y oxígeno (O), que como ya se mencionó anteriormente se debe en su mayoría a la composición del filtro sobre

el cual fueron colectadas las partículas; también los picos correspondientes al oro (Au), debido al recubrimiento aplicado a la muestra para su análisis.

Para tener una mejor apreciación de los picos de rayos X correspondientes a las partícula colectadas y no al filtro o al recubrimiento, se grafican los archivos ASCII resultantes del análisis. El espectro observado en la figura 4.14 queda como ejemplo de la información obtenida directamente por el software del detector.

Los espectros originales correspondientes a cada uno de los análisis se muestran en el **Anexo VI**

Los elementos identificados en una región definida en la figura 4.14, su concentración aparente y el % atómico de los mismos se encuentran en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.14.

Elemento	Concentración aparente	% atómico
C*	11.41	67.75
O*	4.56	25.56
Na	0.18	0.33
Mg	0.14	0.29
Si	0.09	0.13
Cl	0.13	0.16
K	0.20	0.21
Ca	5.08	5.53
Au ⁺	0.15	0.04

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

En la tabla 4.10 se muestra la concentración aparente de los elementos encontrados en el análisis. Esta información se obtiene directamente del programa de análisis del microscopio electrónico; pero como no se conoce la calibración del equipo ni se tiene certeza del correcto cálculo de las concentraciones, no se tomará en cuenta como un método cuantitativo.

En la figura 4.15 se muestra otra región a la que se le realizó un análisis elemental, junto con el espectro obtenido, se observa la presencia de elementos como C, Ca, O, Fe, Mn, Cu, Si y Au, elementos como el Fe y Si tienen un posible origen en el suelo natural y el polvo.

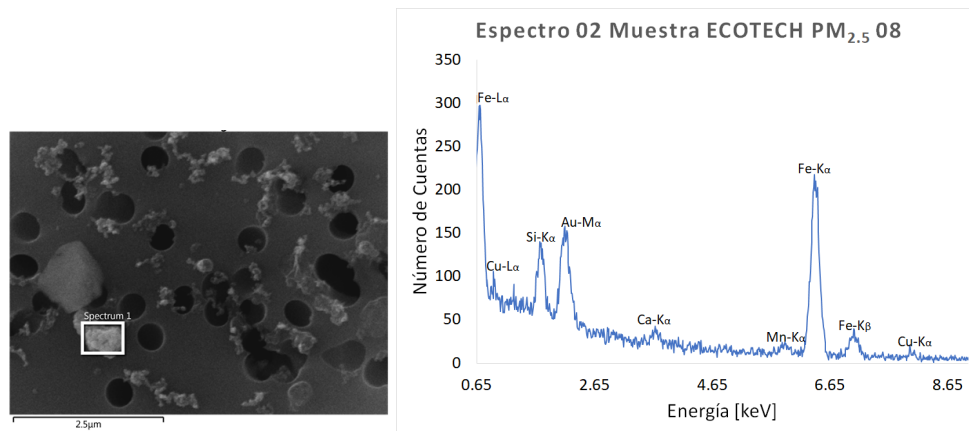


Figura 4.15: Regiones de la muestra ECOTECH PM_{2.5} 08.

La lista de elementos encontrados en la muestra, así como sus concentraciones atómicas propuestas se encuentra en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.15.

Elemento	% atómico
C*	79.34
O*	17.46
Si	0.26
Ca	0.07
Mn	0.10
Fe	2.46
Cu	0.15
Au ⁺	0.15

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

4.6.2. Muestras PM₁₀

Ahora en la figura 4.16 se muestra una de las regiones de mayor interés de la muestra ECOTECH PM₁₀ 08. En la figura se observan partículas de distintos tamaños y distintas formas, por lo que se decidió hacer un análisis de algunas de las partículas observadas en esta región.

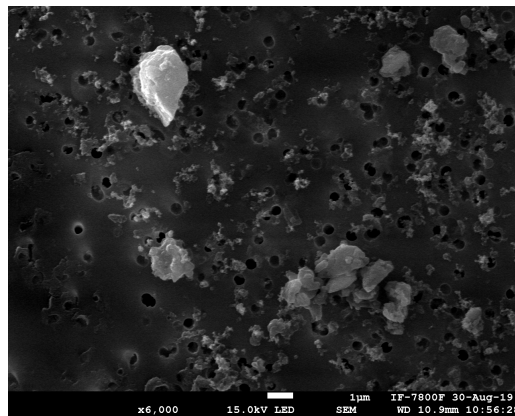


Figura 4.16: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 08.

En la figura 4.17 se muestra la región de análisis, así como el espectro obtenido; se observa la presencia de elementos tales como Na, Al, Si, K y Ca. De acuerdo con la tabla 1.2 algunos de estos elementos casi seguramente provienen del suelo natural y del polvo.

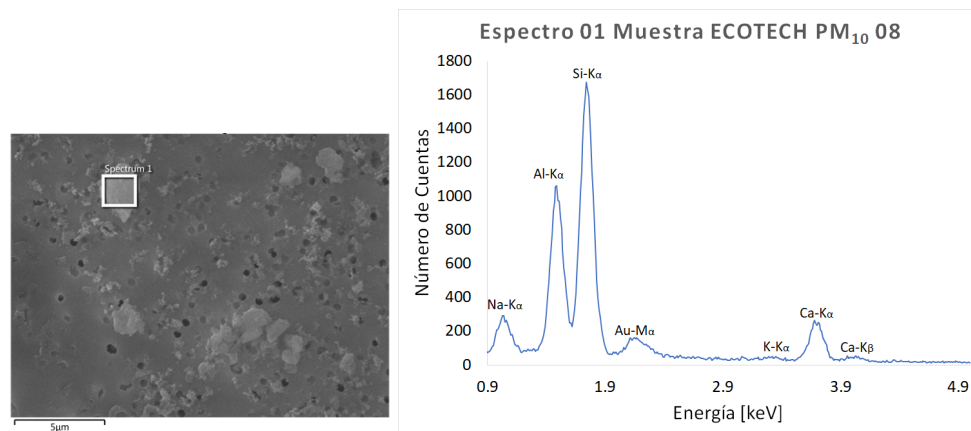


Figura 4.17: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 08.

A continuación, en la tabla 4.12 se muestran los elementos presentes en la región de estudio.

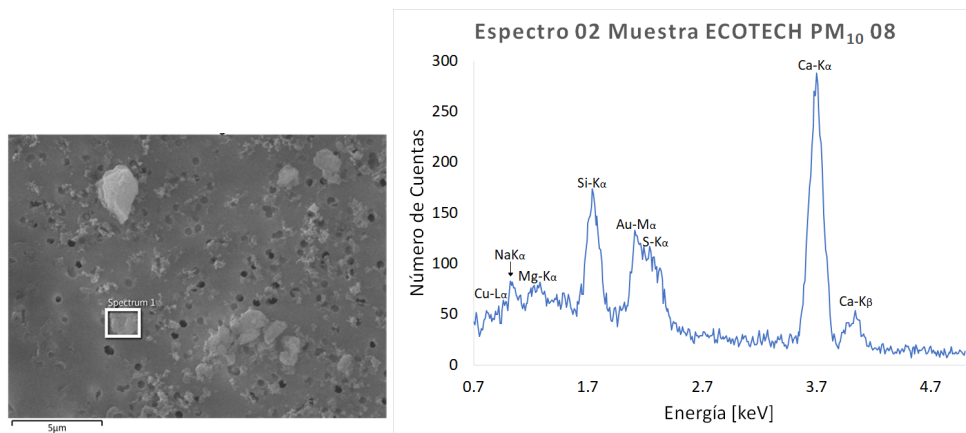
Tabla 4.12: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.17.

Elemento	% atómico
C*	72.08
O*	21.76
Na	0.62
Al	1.84
Si	2.94
K	0.04
Ca	0.65
Au ⁺	0.08

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

Siguiendo con la misma área de estudio ahora se realiza el análisis elemental sobre otro conjunto de partículas, el cual junto con el espectro resultado de este análisis se muestra en la figura 4.18.

Figura 4.18: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 08.

En el espectro se puede observar como es que este conjunto de partículas contiene elementos como Na, Mg, Si, S, Ca y Cu, lo cual es muy importante ya que además de contener elementos típicos del suelo natural y el polvo también se observa la presencia de azufre (S), que es un elemento de gran interés en este estudio; dado que el análisis elemental se realiza sobre todo un conjunto de partículas, no se puede saber si el azufre se encuentra de manera aislada o se pega a las demás partículas.

En la tabla 4.13 se muestran los elementos presentes en el análisis.

Tabla 4.13: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.18.

Elemento	% atómico
C*	74.18
O*	22.65
Na	0.17
Mg	0.11
Si	0.52
S	0.27
Ca	1.72
Cu	0.20
Au ⁺	0.17

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

Ya que con las imágenes anteriores se demuestra la presencia de partículas con un posible origen en el suelo natural y el polvo presente en el LEMA, los siguientes análisis se enfocan solamente en el análisis de partículas que contengan azufre. A continuación, en la figura 4.19 se presenta una de las regiones de la muestra ECOTECH PM₁₀ 13, con algunas de las partículas colectadas.

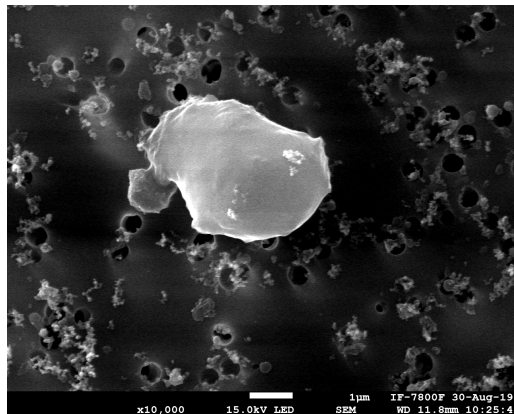


Figura 4.19: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 13.

Se realiza un análisis elemental al conjunto de partículas presentes en esta región. En la figura 4.20 se muestra la zona de análisis, así como el espectro obtenido.

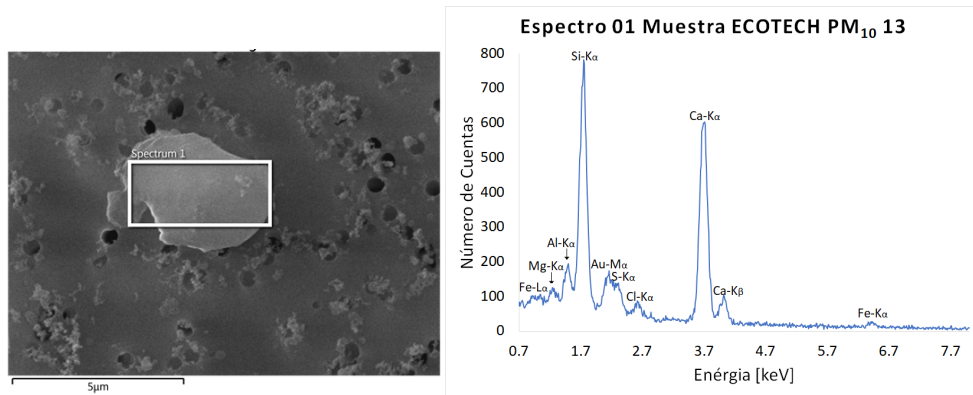


Figura 4.20: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 13.

En la tabla 4.14 se presentan los elementos encontrados en el análisis elemental.

Tabla 4.14: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.20.

Elemento	% atómico
C*	57.47
O*	36.74
Mg	0.16
Al	0.32
Si	2.02
S	0.26
Cl	0.13
Ca	2.62
Fe	0.13
Au ⁺	0.15

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

Se observa la presencia de elementos tales como C, O, Mg, Al, Si, S, Cl, Ca, Fe y Au, de nuevo elementos característicos del suelo natural y el polvo; también se aprecia la presencia de S, y dado que aquí se hizo un análisis del conjunto de partículas se decidió estudiar zonas más pequeñas para así encontrar las partículas que aportan azufre.

En la figura 4.21 se observa la zona en donde se encontró azufre; también se muestra el espectro asociado al análisis de dicha región.

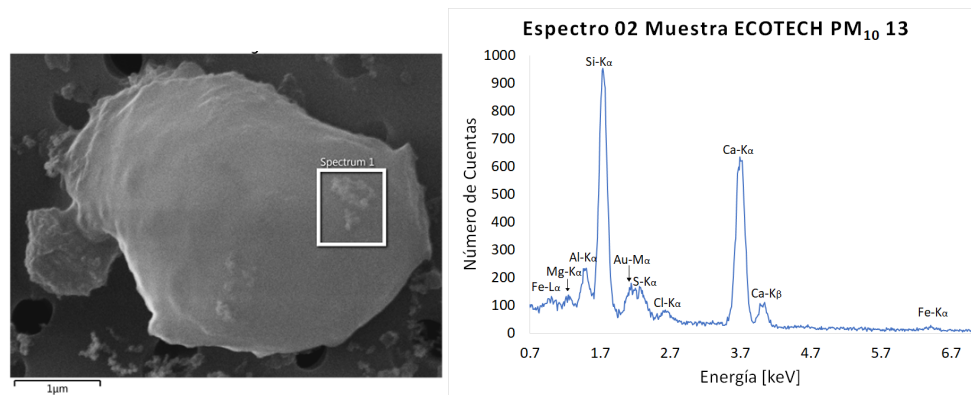


Figura 4.21: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 13.

En la tabla 4.15 se listan los elementos encontrados en el análisis. Se observa que se tienen los mismos elementos que en el análisis anterior, pero con una abundancia distinta.

Tabla 4.15: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.21.

Elemento	% atómico
C*	55.04
O*	38.62
Mg	0.14
Al	0.44
Si	2.49
S	0.25
Cl	0.11
Ca	2.65
Fe	0.10
Au ⁺	0.14

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

Se realiza la observación de algunas otras regiones del filtro buscando la presencia de azufre, en la figura 4.22 se muestra una de las áreas analizadas, así como el espectro resultante.

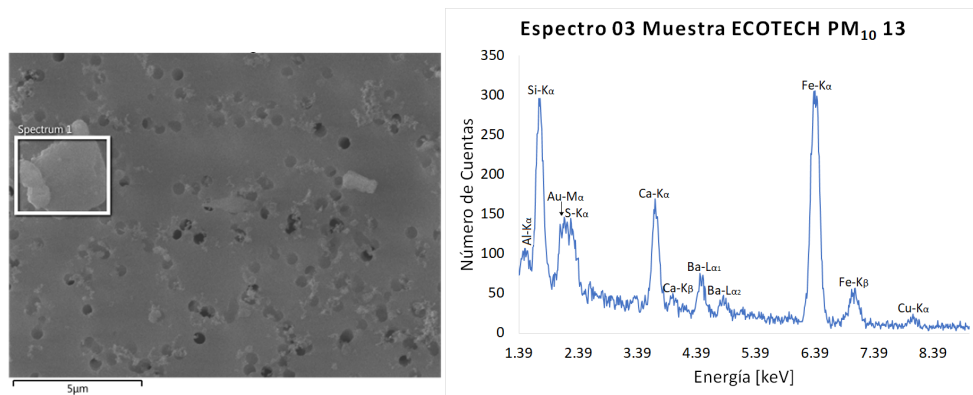


Figura 4.22: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 13.

En la tabla 4.16 se muestra la lista de elementos encontrados en el análisis.

Tabla 4.16: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.22.

Elemento	% atómico
C*	66.98
O*	26.53
Al	0.13
Si	0.82
S	0.28
Ca	0.65
Fe	3.92
Cu	0.28
Ba	0.27
Au ⁺	0.14

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

Se observa la presencia de algunos elementos ya antes encontrados y de nuevo azufre. Por ese motivo se optó por reducir la zona de análisis.

En la figura 4.23 se muestra la nueva zona estudiada, así como el espectro asociado.

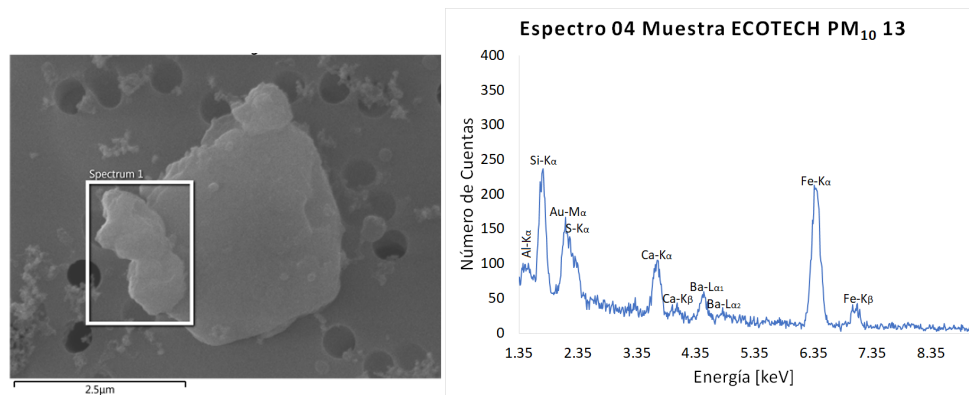


Figura 4.23: Región de la muestra ECOTECH PM₁₀ 13.

En la tabla 4.17 se enlistan los elementos encontrados en el análisis elemental.

Tabla 4.17: Composición elemental de la región delimitada en la figura 4.23.

Elemento	% atómico
C*	70.48
O*	25.15
Al	0.11
Si	0.60
S	0.21
Ca	0.40
Fe	2.70
Ba	0.17
Au ⁺	0.17

Nota: *Elementos formadores del filtro.

Nota: +Elementos del recubrimiento aplicado a la muestra.

Nuevamente se encuentra azufre, pero no se puede hacer ningún tipo de afirmación acerca de su origen.

Con las imágenes y los espectros anteriores se comprueba la presencia de los elementos encontrados mediante XRF; también se cuenta con más elementos para realizar la deducción de algunas de las posibles fuentes de emisión del aerosol.

4.7. Búsqueda de Fugas de SF₆

Con el fin de tener un análisis completo del área de trabajo, se procede a buscar fugas de SF₆ en el acelerador de iones, utilizando un detector de SF₆ de la marca *DILO*, modelo SF₆ Leak Detector 3-033-R002, el cual cuenta con 7 niveles de sensibilidad, siendo el nivel mínimo de sensibilidad de 3 g año⁻¹ y el máximo de 14 g año⁻¹ (Dilo Company, Inc.).

El uso de este detector de fugas es muy fácil, solamente se prende y se elige el nivel de sensibilidad con el cual se quiere trabajar; el nivel de sensibilidad depende del usuario y en este caso se decide trabajar en el nivel 4 de 7 posibles. La punta del detector se coloca en las zonas en donde se cree que podrían existir fugas, tal y como se muestra en la figura 4.24.



Figura 4.24: Uso del detector de SF₆ DILO 3-033-R002.

Se realiza la búsqueda de fugas en todo el acelerador y finalmente se encuentra una fuga en uno de los atravesadores con los que cuenta el acelerador. En la figura 4.25 se muestra la detección la fuga. En ella se puede apreciar como es que el indicador tiene todos los focos prendidos y en color rojo, lo cual significa que se ha encontrado una fuga, la cual posiblemente sea igual o mayor al límite máximo de sensibilidad, es decir 14 g año⁻¹ (Dilo Company, Inc.).



Figura 4.25: Detección de fuga en un atravesador del acelerador.

Por último, en la figura 4.26 se observa la zona en donde se detecta la fuga.



Figura 4.26: Zona de detección de fuga.

Con la aplicación de estadística multivariada y con el cálculo del factor de enriquecimiento se suponía que el azufre era emitido por más de una fuente, en este caso el polvo y/o suelo natural y una emisión puntual, que podría provenir de una fuga en el acelerador o bien por emisión de los equipos eléctricos presentes en el laboratorio. Con la detección de la fuga se demuestra la presencia de una fuga en el acelerador.

Capítulo 5

Conclusiones

Con los resultados antes obtenidos y los análisis realizados se concluye que el aerosol atmosférico presente en el LEMA está compuesto por una diversidad de elementos, de los cuales al menos 18 fueron identificados con la técnica de origen nuclear XRF. Gracias a la aplicación de esta técnica fue posible el cálculo de las concentraciones de los distintos elementos presentes, las concentraciones medidas no son altas como para poner en riesgo en el futuro inmediato a las personas que ahí laboran.

Se observa que las concentraciones de azufre, si bien no son altas como para poner en peligro al personal ahí presente, sí se pueden considerar elevada para un ambiente cerrado. Con el fin de conocer el origen del aerosol atmosférico se aplican técnicas estadísticas multivariadas, de las cuales se obtiene que el aerosol atmosférico presente en este lugar tiene un origen en el suelo natural y en el polvo, principalmente.

También gracias a la aplicación de estadística multivariada se sabe que el azufre formador del aerosol podría tener una segunda fuente de emisión, la cual se cree que podría ser producto de las emisiones de los equipos que controlan el acelerador o bien alguna fuga del hexafluoruro de azufre ahí utilizado. Esto se comprueba con la detección de la fuga, lo cual indica la correcta aplicación de la estadística multivariada, así como la adecuada interpretación de los resultados.

Lo antes obtenido con la técnica de XRF se comprobó mediante las observaciones y el análisis en el microscopio electrónico de barrido.

También se concluye que en este tipo de estudios la colección de partículas con un muestreador de alto flujo es de gran ayuda, ya que si bien con el MiniVol se tiene un flujo muy similar al de la respiración humana promedio, la cantidad de muestra colectada es muy poca, lo cual complica el análisis porque no se superan límites de detección de XRF y quizá algunas otras técnicas analíticas, en cambio

con el muestreador Ecotech sí se colectan suficientes partículas como para tener resultados confiables. Con esto se demuestra que lo planteado en el inicio de este trabajo es cierto y gracias al uso del muestreador Ecotech se pueden tener mejores resultados y más confiables, al menos para XRF.

También con los resultados antes mostrados se concluye que, en general, para PM_{10} se tienen dos fuentes de emisión, las cuales son: el suelo natural, y la fuga de hexafluoruro, para $PM_{2.5}$ también se puede suponer una posible aportación del suelo natural y otra de residuos industriales, recordando que las partículas menores que 2.5 micrómetros están típicamente relacionadas con emisiones antropogénicas, pero sobre estas partículas, $PM_{2.5}$, no se pueden hacer muchas deducciones en este estudio ya que en el área de interés no se colectó suficiente cantidad de material como para hacer un análisis más completo de esta fracción del aerosol atmosférico.

Algunos de los resultados aquí presentes concuerdan con los obtenidos en trabajos previos, por ejemplo en Zhao *et al.* (2004), se menciona que la concentración y el depósito de las partículas se ve influenciado por las condiciones de ventilación en el lugar de muestreo. En el presente trabajo se muestra que en general el factor de enriquecimiento es mayor para las muestras colectadas en el interior, lo cual se cree que se debe a la manera en que la partícula crece y se enriquece con los componentes presentes en el lugar de muestreo, que al ser un ambiente cerrado tiene una mayor recirculación de los mismos compuestos.

Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se pretende resaltar la importancia del monitoreo de la calidad del aire en los ambientes cerrados, ya que, es en los lugares cerrados en donde se pasa la mayor parte del tiempo y en la mayoría de las ocasiones no se conoce la calidad del aire de estos lugares.

5.1. Trabajos Futuros

Se propone realizar muestreos por periodos de tiempo más cortos para así conocer el cambio en las concentraciones a lo largo del día. También se plantea realizar análisis que den información acerca de los posibles compuestos orgánicos presentes, ya que con XRF solamente se conoce la composición elemental.

Se propone que en el futuro los estudios que se realicen en ambientes cerrados se haga con un muestreador de flujo similar al de Ecotech combo PM_{10} & $PM_{2.5}$, ya que con un flujo menor no se colecta la cantidad de materia necesaria para un correcto análisis químico.

En el futuro se pretende continuar con el muestro y el análisis del aerosol presente en ambientes cerrados, ya que con este y anteriores trabajos se comprueba que el estudio de la calidad del aire en este tipo de ambientes es de igual importancia que el del exterior.

Capítulo 6

Anexo I

A continuación, se muestra parte de la bitacora de trabajo, en donde se listan los filtros usados, fecha, etiqueta, material del filtro y la masa del filtro antes y despues de la colecta.

Fecha	Etiqueta	Material del filtro	Muestreador	Masa Promedio Fto. Vacío [g]	Masa Promedio Fto. con PM [g]	Tiempo de muestreo [h]
21/09/2018	PM10-01 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01582	0.01588	24
21/09/2018	PM10-01 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01567	0.01582	24
21/09/2018	PM2.5-01 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01611	0.01617	24
25/09/2018	PM10-02 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01555	0.01565	24
25/09/2018	PM10-02 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01584	0.01621	24
25/09/2018	PM2.5-02 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01582	0.01592	24
26/09/2018	PM10-03MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01564	0.01572	24
26/09/2018	PM10-03ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01587	0.01604	24
26/09/2018	PM2.5-03ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01562	0.01570	24
27/09/2018	PM10-04MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01567	N/A	0
27/09/2018	PM10-04ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01635	N/A	0
27/09/2018	PM2.5-04ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01606	N/A	0
28/09/2018	PM10-05MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01576	0.01583	24
28/09/2018	PM10-05ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01571	0.01589	24
28/09/2018	PM2.5-05ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01554	0.01564	24
02/10/2018	PM10-06 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01617	0.01620	24
02/10/2018	PM10-06 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01578	0.01590	24
02/10/2018	PM2.5-06 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01611	0.01616	24
04/10/2018	PM10-07 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01572	N/A	0
04/10/2018	PM10-07 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01574	N/A	0
04/10/2018	PM2.5-07 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01581	N/A	0
05/10/2018	PM10-08 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01564	0.01569	24
05/10/2018	PM10-08 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01628	0.01647	24
05/10/2018	PM2.5-08 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01575	0.01586	24
08/10/2018	PM10-09 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01567	0.01570	24
08/10/2018	PM10-09 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01568	0.01587	24
08/10/2018	PM2.5-09 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01596	0.01609	24
09/10/2018	PM10-10 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01787	0.01795	24
09/10/2018	PM10-10 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01815	0.01840	24
09/10/2018	PM2.5-10 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01762	0.01775	24
11/10/2018	PM10-11 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01758	0.01761	24
11/10/2018	PM10-11 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01803	0.01824	24
11/10/2018	PM2.5-11 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01782	0.01788	24
12/10/2018	PM10-12 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01800	0.01818	24
12/10/2018	PM10-12 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01758	0.01776	24
12/10/2018	PM2.5-12 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01791	0.01804	24
15/10/2018	PM10-13 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01736	0.01745	24
15/10/2018	PM10-13 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01808	0.01817	24
15/10/2018	PM2.5-13 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01796	0.01802	24
17/10/2018	PM10-14 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01797	0.01799	24
17/10/2018	PM10-14 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01777	0.01792	24
17/10/2018	PM2.5-14 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01812	0.01817	24
18/10/2018	PM10-15 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01763	0.01768	24
18/10/2018	PM10-15 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01822	0.01832	24
18/10/2018	PM2.5-15 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01755	0.01759	24
19/10/2018	PM10-16 MV	Polycarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01611	0.01615	24
19/10/2018	PM10-16 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01597	0.01606	24
19/10/2018	PM2.5-16 ECO	Polycarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01601	0.01604	24
22/10/2018	PM10-17 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.14693	0.14700	24
22/10/2018	PM10-17 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.15678	0.15693	24
22/10/2018	PM2.5-17 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.15298	0.15304	24
23/10/2018	PM10-18 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.15400	0.15406	24
23/10/2018	PM10-18 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.15684	0.15706	24
23/10/2018	PM2.5-18 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.15082	0.15090	24
24/10/2018	PM10-19 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.15828	0.15837	24
24/10/2018	PM10-19 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.16233	0.16264	24
24/10/2018	PM2.5-19 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.15830	0.16125	24
25/10/2018	PM10-20 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.16121	0.16128	24
25/10/2018	PM10-20 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.15476	0.15514	24
25/10/2018	PM2.5-20 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.16577	0.16593	24
26/10/2018	PM10-21 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.15742	0.15746	24
26/10/2018	PM10-21 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.16131	0.16164	24
26/10/2018	PM2.5-21 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.17129	0.17140	24
29/10/2018	PM10-22 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.16291	0.16297	24
29/10/2018	PM10-22 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.16706	0.16727	24
29/10/2018	PM2.5-22 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.15204	0.15208	24
30/10/2018	PM10-23 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.17384	0.17388	24
30/10/2018	PM10-23 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.16794	0.16814	24
30/10/2018	PM2.5-23 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.16063	0.16072	24

31/10/2018	PM10-24 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.15758	0.15765	24
31/10/2018	PM10-24 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.16837	0.16858	24
31/10/2018	PM2.5-24 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.16487	0.16494	24
05/11/2018	PM10-25 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.17203	0.17206	24
05/11/2018	PM10-25 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.15706	0.15726	24
05/11/2018	PM2.5-25 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.15636	0.15641	24
06/11/2018	PM10-26 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.17704	0.17709	24
06/11/2018	PM10-26 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.17033	0.17064	24
06/11/2018	PM2.5-26 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.17480	0.17491	24
08/11/2018	PM10-27 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.15749	0.15758	24
08/11/2018	PM10-27 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.18008	0.18043	24
08/11/2018	PM2.5-27 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.17731	0.17735	24
09/11/2018	PM10-28 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.17368	0.17371	24
09/11/2018	PM10-28 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.17730	0.17752	24
09/11/2018	PM2.5-28 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.17459	0.17463	24
13/11/2018	PM10-29 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.17853	0.17864	24
13/11/2018	PM10-29 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.17979	0.17983	24
13/11/2018	PM2.5-29 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.15042	0.15070	24
14/11/2018	PM10-30 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01792	0.01796	24
14/11/2018	PM10-30 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01805	0.01811	24
14/11/2018	PM2.5-30 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01808	0.01810	24
08/01/2019	PM10-31 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.15806	0.15810	24
08/01/2019	PM10-31 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.15664	0.15678	24
08/01/2019	PM2.5-31 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.16346	0.16351	24
09/01/2019	PM10-32 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.16360	0.16367	24
09/01/2019	PM10-32 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.15679	0.15698	24
09/01/2019	PM2.5-32 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.16210	0.16218	24
10/01/2019	PM10-33 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01751	0.01754	24
10/01/2019	PM10-33 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01735	0.01747	24
10/01/2019	PM2.5-33 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01768	0.01775	24
11/01/2019	PM10-34 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01693	0.01694	24
11/01/2019	PM10-34 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01754	0.01765	24
11/01/2019	PM2.5-34 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01682	0.01690	24
11/01/2019	PM10-35 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01773	0.01779	24
11/01/2019	PM10-35 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01761	0.01780	24
11/01/2019	PM2.5-35 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01756	0.01765	24
15/01/2019	PM10-36 MV	Teflon	MiniVol PM ₁₀	0.16943	0.16955	24
15/01/2019	PM10-36 ECO	Teflon	Ecotech PM ₁₀	0.17332	0.17399	24
15/01/2019	PM2.5-36 ECO	Teflon	Ecotech PM _{2.5}	0.16826	0.16849	24
16/01/2019	PM10-37 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01579	0.01588	24
16/01/2019	PM10-37 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01590	0.01629	24
16/01/2019	PM2.5-37 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01647	0.01665	24
Muestreo en la azotea del edificio Colisur						
23/01/2019	PM10-38 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01780	0.01796	24
23/01/2019	PM10-38 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01743	0.01806	24
23/01/2019	PM2.5-38 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01756	0.01765	24
24/01/2019	PM10-39 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01786	0.01803	24
24/01/2019	PM10-39 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01745	0.01799	24
24/01/2019	PM2.5-39 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01753	0.01758	24
25/01/2019	PM10-40 MV	Policarbonato	MiniVol PM ₁₀	0.01721	0.01727	24
25/01/2019	PM10-40 ECO	Policarbonato	Ecotech PM ₁₀	0.01769	0.01811	24
25/01/2019	PM2.5-40 ECO	Policarbonato	Ecotech PM _{2.5}	0.01749	0.01757	24

Figura 6.1: Bitacora de trabajo.

Capítulo 7

Anexo II

A continuación, se listan los patrones de calibración utilizados para el análisis elemental del presente trabajo.

Tabla 7.1: Patrones de calibración utilizados.

Patrón	Concentración [$\mu\text{g cm}^{-2}$]
Micromatter Al	41.6 (5%)
Micromatter CuS _x	44.1 (5%) y 12.9 (5%)
Micromatter KCl	45.8 (5%)
Micromatter Fe	42.3 (5%)
Micromatter Ge	42.5 (5%)
Micromatter SrF ₂	46.5 (5%)
Micromatter SiO	48.2 (5%)
Micromatter GaP	45.0 (5%)
Micromatter NaCl	50.4 (5%)
Micromatter MgF ₂	58.1 (5%)
Micromatter CaF ₂	57.5 (5%)
Micromatter ScF ₃	58.2 (5%)
Micromatter Ti	44.5 (5%)
Micromatter V	47.8 (5%)
Micromatter Cr	47.8 (5%)
Micromatter Mn	46.3 (5%)
Micromatter Co	43.2 (5%)
Micromatter Ni	44.2 (5%)
Micromatter Cu	41.0 (5%)
Micromatter ZnTe	41.0 (5%)
Micromatter GaAs	42.3 (5%)
Micromatter Se	48.2 (5%)
Micromatter SrF ₂	46.5 (5%)
Micromatter In	47.5 (5%)
Micromatter ZrF ₄	55.8 (5%)
Micromatter Ag	47.0 (5%)
Micromatter CsBr	44.6 (5%)
Micromatter Nb ₂ O ₃	45.7 (5%)
Micromatter Pt	49.7 (5%)
Micromatter Sb	43.1 (5%)
Micromatter Au	46.4 (5%)
Micromatter TiCl	48.8 (5%)
Micromatter Pb	53.4 (5%)

Nota: Todos los patrones de calibración están sobre una hoja de Mylar de 3 μm .

Capítulo 8

Anexo III

67

A continuación, se muestran las concentraciones elementales de cada una de las muestras tomadas en el interior del LEMA.

	Concentración elemental MiniVol PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]															
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
MV 01 PM10	0.19	0.036	0.075	0.40		0.54	0.043	0.18			0.24	0.25	0.03	0.25		
MV 02 PM10	0.24	0.029	0.15	0.35	0.017	0.86	0.047	0.48			0.26	0.16	0.086	0.15		
MV 03 PM10	0.008			0.16		0.35		0.19			0.18	0.19		0.12		
MV 04 PM10		0.014	0.03	0.11		0.47		0.17			0.19	0.2		0.15		
MV 05 PM10	0.14		0.057	0.15		0.44	0.054	0.21			0.21	0.19		0.13		
MV 06 PM10	0.058	0.043	0.057	0.13		0.35		0.15			0.23	0.19		0.19		0.012
MV 07 PM10	0.40	0.071	0.071	0.13	0.027	0.31	0.096	0.37			0.25	0.18	0.028	0.12	0.054	
MV 08 PM10		0.24	0.003	0.066		0.49		0.20			0.26	0.17	0.013	0.11		
MV 09 PM10				0.015	0.031	0.55		0.098			0.2	0.15	0.002	0.11		
MV 10 PM10			0.009	0.042		0.31		0.073			0.06	0.16		0.05	0.079	
MV 11 PM10	0.041	0.058	0.021	0.10	0.013	1.022		0.079			0.21	0.23	0.014	0.13		
MV 12 PM10	0.21	0.064	0.021	0.05	0.012	0.19	0.097	0.10		0.003	0.15	0.26		0.13		
MV 13 PM10		0.27	0.06	0.18		1.017	0.079	0.28		0.60	0.55	0.19	0.054	0.2		0.015
MV 14 PM10	0.55		0.051	0.06	0.005	0.41	0.018	0.076			0.21	0.23	0.036	0.086		
MV 15 PM10	0.16			0.011		0.056		0.089			0.19	0.23	0.023	0.18		
MV 16 PM10				0.073		0.19		0.009			0.22	0.19	0.061	0.21		
MV 17 PM10			0.006	0.052	0.005	0.25	0.004	0.12			0.1	0.17		0.1		0.012
MV 18 PM10		0.014	0.033	0.048	0.005	0.24		0.061			0.15	0.16		0.053		
MV 19 PM10			0.08	0.075	0.019	0.25		0.10			0.066	0.16		0.085	0.026	
MV 20 PM10			0.063	0.079	0.02	0.66	0.04	0.15	0.009		0.092	0.14	0.006	0.084	0.022	
MV 21 PM10				0.064	0.006	0.85		0.067	0.011		0.23	0.12		0.047		
MV 22 PM10			0.033	0.082	0.001	0.47		0.082			0.079	0.13		0.036		
MV 23 PM10	0.13		0.039	0.1	0.007	0.36	0.025	0.12	0.026		0.063	0.17		0.073		
MV 24 PM10			0.045	0.015	0.007	0.23		0.076			0.12	0.18		0.09		
MV 25 PM10				0.054	0.008	0.23		0.024			0.088	0.17		0.077		
MV 26 PM10			0.039	0.059	0.002	0.58		0.046			0.18	0.16	0.001	0.084		0.013
MV 27 PM10			0.06	0.1	0.017	0.51		0.17			0.088	0.15	0.028	0.091	0.004	
MV 28 PM10			0.069	0.073	0.021	0.52		0.073			0.16	0.16		0.082		
MV 29 PM10			0.021	0.31		0.62	0.079	0.15	0.11		0.31	0.35	0.024	0.21		
MV 30 PM10	0.5	0.2	0.033	0.23	0.067	1.41		0.20	0.004		0.34	0.32		0.26		
MV 31 PM10			0.21	0.33		0.55		0.20			0.54	0.65		0.55		
MV 32 PM10			0.058	0.046	0.026	0.63		0.14	0.069		0.12	0.22		0.15		
MV 33 PM10	0.13			0.33	0.054	1.47		0.34			0.63	0.76	0.003	0.3		
MV 34 PM10	0.71		0.023	0.48	0.19	1.37	0.34	0.34			0.79	0.93		0.61		
MV 35 PM10	0.56			0.39	0.20	2.93		0.29			0.66	0.54	0.314	0.28		0.39
PROMEDIO	0.27	0.094	0.053	0.14	0.033	0.62	0.077	0.16	0.038	0.3	0.24	0.25	0.045	0.16	0.037	0.09
CONTADOR	15	11	27	35	23	35	12	35	6	2	35	35	16	35	5	5
MAXIMO	0.71	0.27	0.21	0.48	0.20	2.93	0.34	0.48	0.11	0.60	0.79	0.93	0.31	0.61	0.079	0.39
MINIMO	0.008	0.014	0.003	0.011	0.001	0.056	0.004	0.009	0.004	0.003	0.055	0.12	0.001	0.036	0.004	0.012

∞

Figura 8.1: Concentraciones elementales de muestras tomadas con MiniVol PM₁₀ en el interior del LEMA.

	Concentración elemental ECOTECH PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]															
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
IN 01 PM10	0.053		0.081	0.079	0.004	0.44	0.057	0.12		0.004	0.13	0.059	0.015	0.068		
IN 02 PM10		0.004	0.037	0.037	0.009	0.21		0.029			0.11	0.055		0.037		0.022
IN 03 PM10	0.029	0.024	0.026	0.14	0.009	0.33	0.007	0.070			0.15	0.068	0.007	0.057		
IN 04 PM10			0.13	0.11	0.011	1.66		0.2			0.13	0.089		0.037		
IN 05 PM10	0.075		0.046	0.1	0.009	0.4	0.011	0.11			0.12	0.044		0.037		
IN 06 PM10			0.040	0.1		0.34	0.026	0.15			0.15	0.042		0.088		
IN 07 PM10	0.026		0.095	0.29	0.042	1.4	0.2	0.23	0.020	0.022	0.22	0.046	0.011	0.092		
IN 08 PM10	0.088		0.090	0.21	0.007	1.57		0.25			0.11	0.091		0.055		
IN 09 PM10	0.11		0.035	0.090	0.018	0.99	0.024	0.092	0.007	0.018	0.11	0.073	0.009	0.092		
IN 10 PM10			0.095	0.19	0.026	0.95		0.45			0.13	0.1		0.32		
IN 11 PM10		0.035	0.009	0.051	0.004	0.47		0.064			0.2	0.092	0.018	0.040		0.012
IN 12 PM10	0.048	0.13	0.020	0.073	0.009	0.49	0.062	0.12			0.13	0.064		0.066		
IN 13 PM10	0.097	0.007	0.029	0.084		1.59	0.013	0.1		0.007	0.14	0.055	0.004	0.022		
IN 14 PM10	0.16	0.048	0.075	0.1	0.009	0.39	0.037	0.14		0.011	0.15	0.053	0.015	0.064		
IN 15 PM10	0.037	0.026	0.024	0.055	0.007	0.20	0.051	0.088		0.007	0.1	0.062	0.002	0.077		
IN 16 PM10	0.057		0.046	0.079	0.004	0.21	0.002	0.11			0.12	0.059	0.009	0.068		
IN 17 PM10		0.011	0.073	0.13		0.38	0.046	0.18	0.011		0.12	0.042	0.011	0.042		
IN 18 PM10			0.070	0.16	0.009	0.38	0.002	0.13	0.007		0.16	0.040	0.002	0.04		0.015
IN 19 PM10	0.040	0.007	0.086	0.17	0.013	0.39	0.053	0.16	0.002		0.13	0.031	0.009	0.053		
IN 20 PM10		0.002	0.064	0.18	0.020	0.96	0.048	0.16			0.18	0.057	0.009	0.055		
IN 21 PM10			0.042	0.11	0.022	1.86	0.031	0.1			0.079	0.037	0.002	0.042		0.010
IN 22 PM10		0.004	0.046	0.12	0.018	0.65	0.040	0.15			0.086	0.035		0.051		
IN 23 PM10	0.004	0.009	0.042	0.1	0.011	0.42		0.11			0.2	0.029		0.04		
IN 24 PM10			0.044	0.092		0.41	0.031	0.12	0.004		0.14	0.044	0.007	0.037		
IN 25 PM10	0.035	0.011	0.073	0.17	0.009	0.3	0.066	0.16			0.15	0.048		0.044		
IN 26 PM10			0.068	0.18	0.020	0.89	0.044	0.13	0.024		0.16	0.040	0.020	0.068		
IN 27 PM10	0.013	0.033	0.086	0.26	0.024	0.71	0.086	0.21	0.013		0.2	0.037	0.007	0.07	0.004	
IN 28 PM10	0.068		0.055	0.13	0.022	0.79	0.035	0.14	0.002		0.14	0.059	0.002	0.092		
IN 29 PM10	0.19	0.020	0.020	0.086	0.013	1.53	0.044	0.11	0.013		0.1	0.066	0.024	0.062		
IN 30 PM10	0.026		0.042	0.18	0.040	1.99	0.086	0.15		0.013	0.23	0.066	0.031	0.13		
IN 31 PM10			1.61	0.48	0.75	3.74	1.53	3.77	0.65		2.53	1.76		2.24	0.18	0.45
IN 32 PM10	0.38		0.059	0.33	0.068	2.58	0.13	0.22			0.2	0.17	0.059	0.27		
IN 33 PM10	0.086		0.11	0.45	0.068	1.03	0.14	0.25			0.35	0.18	0.053	0.18		
IN 34 PM10	0.10	0.024	0.055	0.33	0.1	2.94	0.16	0.5	0.024		0.29	0.28	0.037	0.14		
IN 35 PM10	0.095	0.007	0.20	0.49	0.062	2.5	0.19	0.34	0.035		0.29	0.059		0.084		
PROMEDIO	0.082	0.024	0.11	0.17	0.046	1.03	0.11	0.27	0.063	0.012	0.23	0.12	0.016	0.14	0.095	0.10
CONTADOR	22	17	35	35	31	35	29	35	13	7	35	35	23	35	2	5
MAXIMO	0.38	0.13	1.61	0.49	0.75	3.74	1.53	3.77	0.65	0.022	2.53	1.76	0.059	2.24	0.18	0.45
MINIMO	0.004	0.002	0.009	0.037	0.004	0.20	0.002	0.029	0.002	0.004	0.079	0.029	0.002	0.022	0.004	0.01

Figura 8.2: Concentraciones elementales de muestras tomadas con ECOTECH PM₁₀ en el interior del LEMA.

	Concentración elemental ECOTECH PM _{2.5} [µg m ⁻³]															
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
IN 01 PM2.5	0.011	0.006	0.05	0.15		0.14	0.006	0.31			0.098	0.052	0.017	0.035		
IN 02 PM2.5		0.024	0.26	0.74		0.49	0.090	1.64			0.26	0.062	0.057	0.053	0.005	
IN 03 PM2.5	0.063	0.017	0.008	0.026	0.002	0.16	0.008	0.016			0.084	0.049	0.004	0.025		
IN 04 PM2.5			0.010	0.06	0.021	1.059	0.036	0.045	0.025		0.056	0.055		0.038		
IN 05 PM2.5	0.007		0.011	0.029	0.007	0.22	0.002	0.012			0.066	0.062	0.001	0.044		
IN 06 PM2.5	0.007	0.01	0.011	0.03	0.004	0.17		0.059			0.11	0.057		0.057		
IN 07 PM2.5	0.023		0.015	0.074	0.027	0.85	0.084	0.045	0.001		0.058	0.073		0.055		
IN 08 PM2.5	0.06			0.025	0.017	0.46	0.028	0.05			0.15	0.059		0.052		
IN 09 PM2.5	0.043		0.007	0.042	0.01	0.45	0.012	0.033			0.083	0.068	0.015	0.068		
IN 10 PM2.5	0.011			0.014	0.005	0.26		0.025			0.079	0.056	0.003	0.004		
IN 11 PM2.5	0.083		0.007	0.034	0.004	0.25	0.010	0.075			0.068	0.044	0.024	0.046		
IN 12 PM2.5	0.087	0.019	0.007	0.039	0.008	0.51	0.013	0.026			0.058	0.035	0.016	0.043		
IN 13 PM2.5		0.018		0.022		0.034	0.024	0.048			0.068	0.057	0.011	0.025		
IN 14 PM2.5	0.12		0.006	0.019	0.002	0.097		0.052			0.081	0.056	0.004	0.037		
IN 15 PM2.5	0.02	0.008	0.002	0.006	0.007	0.11		0.017			0.099	0.058	0.006	0.061		
IN 16 PM2.5	0.15	0.021	0.008	0.025	0.003	0.099		0.012			0.081	0.077	0.005	0.053		
IN 17 PM2.5	0.005		0.018	0.015	0.005	0.17		0.028			0.027	0.044		0.025		
IN 18 PM2.5			0.004	0.011	0.001	0.13		0.027	0.002		0.041	0.047	0.004	0.019		
IN 19 PM2.5	0.019		0.031	0.027	0.006	0.18	0.009	0.014			0.035	0.039		0.021		
IN 20 PM2.5			0.021	0.035	0.015	0.47	0.012	0.02	0.006		0.041	0.054	0.006	0.024		
IN 21 PM2.5		0.019	0.017	0.028	0.01	0.58	0.017	0.017	0.005		0.041	0.043		0.017		
IN 22 PM2.5		0.008		0.017	0.004	0.3		0.012			0.019	0.044		0.035	0.004	
IN 23 PM2.5		0.004	0.006	0.013	0.004	0.18	0.002	0.035			0.006	0.055	0.008	0.034		
IN 24 PM2.5			0.016	0.011	0.003	0.15		0.017			0.042	0.041	0.002	0.014		
IN 25 PM2.5		0.006	0.013	0.01	0.003	0.11		0.007	0.009		0.023	0.041		0.03		
IN 26 PM2.5				0.017	0.012	0.38		0.009	0.003		0.048	0.068		0.021		
IN 27 PM2.5	0.072	0.018	0.01	0.022	0.003	0.17	0.004	0.027	0.012		0.038	0.061	0.016	0.034		
IN 28 PM2.5	0.018		0.013	0.028	0.012	0.42	0.046	0.034			0.026	0.049	0.007	0.043		
IN 29 PM2.5	0.24	0.035		0.027	0.017	1.19	0.048	0.054	0.009		0.12	0.079	0.041	0.044		
IN 30 PM2.5		0.004	0.002	0.016	0.008	0.2		0.038	0.004		0.046	0.062		0.037		
IN 31 PM2.5			0.033	0.011	0.005	0.11		0.039	0.006		0.042	0.094		0.052		
IN 32 PM2.5			0.013	0.038	0.016	0.55	0.024	0.006	0.002		0.059	0.10		0.057	0.009	
IN 33 PM2.5	0.072	0.048		0.15	0.064	0.62	0.16	0.03	0.005		0.22	0.12		0.14		
IN 34 PM2.5	0.53		0.045	0.13	0.076	0.67	0.074	0.2			0.14	0.25	0.007	0.094		
IN 35 PM2.5				0.11	0.10	1.55	0.006	0.042			0.18	0.19	0.10	0.11		
PROMEDIO	0.082	0.017	0.024	0.059	0.015	0.38	0.032	0.089	0.007	< LD	0.076	0.069	0.017	0.044	0.006	< LD
CONTAR	20	16	27	35	32	35	22	35	13		35	35	21	35	3	
MAXIMO	0.53	0.048	0.26	0.74	0.10	1.55	0.16	1.64	0.025		0.26	0.25	0.10	0.14	0.009	
MINIMO	0.005	0.004	0.002	0.006	0.001	0.034	0.002	0.006	0.001		0.006	0.035	0.001	0.004	0.004	

Figura 8.3: Concentraciones elementales de muestras tomadas con ECOTECH PM_{2.5} en el interior del LEMA.

A continuación, se muestran las concentraciones elementales de cada una de las muestras tomadas en la azotea del IFUNAM.

Concentración elemental MiniVol PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$] EXTERIOR																
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
MV 38 PM10	0.17		0.92	2.59	0.14	1.38	0.87	1.83			1.31	0.49	0.023	0.28		0.15
MV 39 PM10	0.47	0.19	0.69	2.016	0.15	1.076	0.4	1.41	0.017		1.34	0.43	0.21	0.28		0.13
MV 40 PM10	0.17		0.25	0.72	0.13	1.24	0.47	0.4			0.45	0.49	0.07	0.19		0.15
PROMEDIO	0.27	0.19	0.62	1.77	0.14	1.23	0.58	1.21	0.017	<LD	1.032	0.47	0.10	0.25	<LD	0.14

Figura 8.4: Concentraciones elementales de muestras tomadas con MiniVol PM₁₀ en la azotea del IFUNAM.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección)

Concentración elemental ECOTECH PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$] EXTERIOR																
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
IN 38 PM10	0.36	0.27	1.84	1.51	0.095	1.098	0.78	3.18	0.018	0.042	2.044	0.12	0.046	0.19		0.17
IN 39 PM10	0.15	0.17	1.35	3.09	0.088	1.001	0.57	1.99	0.018		1.47	0.13	0.035	0.084		0.14
IN 40 PM10	0.34	0.022	1.008	2.4	0.064	0.89	0.59	1.33		0.011	1.089	0.12	0.057	0.075		0.15
PROMEDIO	0.28	0.15	1.4	2.33	0.082	1.0	0.65	2.17	0.018	0.026	1.53	0.12	0.046	0.12	<LD	0.15

Figura 8.5: Concentraciones elementales de muestras tomadas con ECOTECH PM₁₀ en la azotea del IFUNAM.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección)

Concentración elemental ECOTECH PM2.5 [$\mu\text{g m}^{-3}$] EXTERIOR																
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
IN 38 PM2.5	0.018		0.02	0.13	0.065	0.59	0.17	0.15			0.18	0.13	0.014	0.042		0.11
IN 39 PM2.5	0.054	0.027	0.054	0.17	0.041	0.58	0.16	0.12		0.007	0.14	0.089	0.018	0.060		0.08
IN 40 PM2.5			0.029	0.12	0.051	0.54	0.28	0.14			0.08	0.14	0.038	0.071		0.12
PROMEDIO	0.036	0.027	0.034	0.14	0.052	0.57	0.2	0.13	<LD	0.007	0.13	0.12	0.023	0.058	<LD	0.10

Figura 8.6: Concentraciones elementales de muestras tomadas con ECOTECH PM_{2.5} en la azotea del IFUNAM.

Nota: < LD (Menor que el límite de detección)

Capítulo 9

Anexo IV

72

En este Anexo se muestra el cociente de la concentración elemental de algunos de los elementos de la corteza terrestre entre la concentración elemental de la concentración de silicio en la corteza terrestre (Demayo A., 1984)

Tabla 9.1: Cociente de la concentración elemental promedio de algunos de los elementos presentes en la corteza terrestre y la concentración promedio de silicio de la corteza terrestre.

Elemento	FE
O	1.68
Al	0.293
Fe	0.180
Ca	0.131
Na	0.102
K	0.093
Ti	0.0154
Mn	0.0036
Br	5.8×10^{-3}
P	4.3×10^{-3}
S	1.8×10^{-3}
C	1.15×10^{-3}
Cl	1.13×10^{-3}
Rb	1.12×10^{-3}
Sr	1.08×10^{-3}
V	5.4×10^{-4}
Zn	4.8×10^{-4}
Ni	2.9×10^{-4}
As	1.8×10^{-4}
Cu	2.5×10^{-4}
Zr	8.0×10^{-4}
Cr	7.2×10^{-4}
Pb	5.8×10^{-5}
Ga	5.41×10^{-5}
Se	3.25×10^{-7}
Ag	3.61×10^{-7}

Factores de enriquecimiento obtenidos para los elementos presentes en las muestras analizadas.

Tabla 9.2: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras PM₁₀ tomadas con muestreador MiniVol.

Elemento	FE INTERNO	FE EXTERNO
Na	19 (11)	1.5 (1.0)
Al	1.27 (0.41)	1.20 (0.17)
P	54 (21)	18.4 (3.8)
S	2330 (663)	370 (75)
K	5.8 (3.4)	3.5 (0.6)
Ca	8.5 (2.4)	5.2 (0.7)
V	490 (228)	17.7 (15.7)
Mn	590 (148)	
Fe	9.4 (3.2)	3.2 (0.5)
Ni	6130 (1530)	920 (149)
Cu	1280 (593)	230 (65)
Zn	2340 (609)	300 (54)
Sr	240 (91)	
Pb	11300 (10100)	13700 (2090)

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Tabla 9.3: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras PM₁₀ tomadas con muestreador ECOTECH.

Elemento	FE INTERNO	FE EXTERNO
Na	4.8 (9.1)	1.2 (1.1)
Al	2.1 (1.9)	2.1 (1.3)
P	64 (57)	8.2 (5.2)
S	3230 (2300)	230 (146)
K	7.1 (7.9)	2.9 (1.9)
Ca	12.11 (10.95)	7.09 (4.44)
V	680 (563)	14 (11)
Mn	19 (32)	3.1 (5.8)
Fe	7.4 (8.4)	3.6 (2.4)
Ni	2410 (2240)	180 (157)
Cu	370 (585)	79 (61)
Zn	1740 (154)	103 (97)
Sr	520 (414)	
Pb	10600 (19300)	11000 (1180)

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Tabla 9.4: Factor de enriquecimiento promedio para algunos de los elementos en las muestras PM_{2.5} tomadas con muestreador ECOTECH.

Elemento	FE INTERNO	FE EXTERNO
Na	13.70 (27.0)	2.5 (6.8)
Al	1.4 (1.7)	0.84 (0.74)
P	60 (77)	88 (41)
S	3500 (4250)	2170 (1420)
K	6 (13)	16 (8)
Ca	12 (15)	7.4 (5.4)
V	220 (365)	
Mn		14 (21)
Fe	7.2 (10.4)	5.3 (4.9)
Ni	4040 (5140)	2940 (1920)
Cu	1160 (1770)	670 (802)
Zn	1580 (1970)	860 (658)
Sr	95 (127)	
Pb		12100 (13600)

Nota: Los números entre paréntesis representan la incertidumbre tipo A.

Capítulo 10

Anexo V

77

A continuación, se muestran las correlaciones calculadas para los elementos presentes en el aerosol atmosférico colectado en el interior del LEMA. Como se mencionó en la **Sección 3.3** aquí no se encuentran todos los elementos identificados en el aerosol, sólo se muestran los elementos con un número de apariciones superior a 10.

Nota: Se resaltan las correlaciones mayores con una R^2 mayor que 0.75.

Correlación MiniVol PM ₁₀												
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	Ni	Cu	Zn
Na	1											
Mg	0.182	1										
Al	-0.134	0.078	1									
Si	0.416	0.015	0.482	1								
P	0.676	0.373	-0.115	0.833	1							
S	0.499	0.075	0.072	0.662	0.829	1						
K	0.653	0.878	-0.225	0.611	0.952	0.578	1					
Ca	0.314	0.184	0.469	0.752	0.516	0.509	0.419	1				
Fe	0.603	0.202	0.288	0.808	0.828	0.734	0.844	0.640	1			
Ni	0.518	0.269	0.249	0.755	0.809	0.577	0.948	0.490	0.868	1		
Cu	0.534	-0.550	0.753	0.518	0.889	0.762	-0.021	0.302	0.559	0.359	1	
Zn	0.568	0.336	0.421	0.791	0.850	0.448	0.916	0.492	0.845	0.893	0.402	1

Figura 10.1: Correlación MiniVol PM₁₀

Correlación ECOTECH PM ₁₀													
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Fe	Ni	Cu	Zn
Na	1												
Mg	-0.007	1											
Al	-0.011	-0.276	1										
Si	0.225	-0.204	0.532	1									
P	0.363	-0.140	0.984	0.568	1								
S	0.513	-0.149	0.572	0.700	0.653	1							
K	0.146	-0.034	0.989	0.592	0.994	0.649	1						
Ca	0.169	-0.077	0.990	0.543	0.992	0.610	0.993	1					
V	0.128	-0.031	0.997	0.586	0.995	0.699	0.993	0.996	1				
Fe	0.039	-0.053	0.988	0.551	0.994	0.587	0.993	0.988	0.998	1			
Ni	0.437	0.092	0.978	0.521	0.994	0.615	0.985	0.990	0.991	0.989	1		
Cu	0.635	0.222	0.239	0.701	0.750	0.600	0.635	0.543	0.747	0.699	0.762	1	
Zn	0.639	0.198	0.981	0.517	0.988	0.586	0.988	0.990	0.999	0.983	0.988	0.871	1

Figura 10.2: Correlación ECOTECH PM₁₀

Correlación ECOTECH PM _{2.5}													
	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	V	Fe	Ni	Cu	Zn
Na	1.000												
Mg	0.588	1.000											
Al	0.405	0.443	1.000										
Si	0.353	0.260	0.983	1.000									
P	0.658	0.809	0.636	0.905	1.000								
S	0.444	0.684	0.148	0.198	0.735	1.000							
K	0.282	0.854	0.589	0.459	0.476	0.281	1.000						
Ca	0.353	0.130	0.985	0.974	0.497	0.059	0.334	1.000					
V	0.485	-0.065	-0.072	0.050	-0.018	0.358	-0.237	0.324	1.000				
Fe	0.359	0.658	0.804	0.708	0.710	0.410	0.621	0.608	-0.041	1.000			
Ni	0.866	0.754	0.106	0.169	0.876	0.526	0.344	0.041	-0.247	0.480	1.000		
Cu	0.174	0.604	0.870	0.478	0.732	0.808	0.177	0.389	0.547	0.693	0.437	1.000	
Zn	0.371	0.659	0.164	0.262	0.795	0.492	0.638	0.087	-0.085	0.670	0.722	0.626	1.000

Figura 10.3: Correlación ECOTECH PM_{2.5}

Capítulo 11

Anexo VI

En esta sección se muestran los espectros resultantes de cada uno de los análisis elementales realizados en el microscopio electrónico de barrido del LCM, tal como se obtiene de manera automática por el software del detector.

11.1. PM_{2.5}

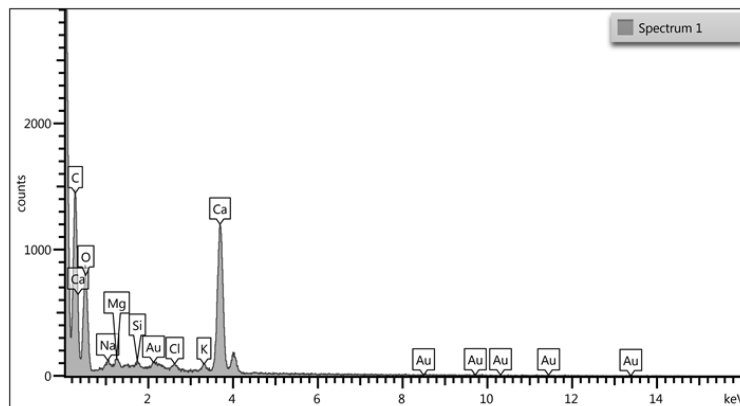


Figura 11.1: Espectro correspondiente a la figura 4.14

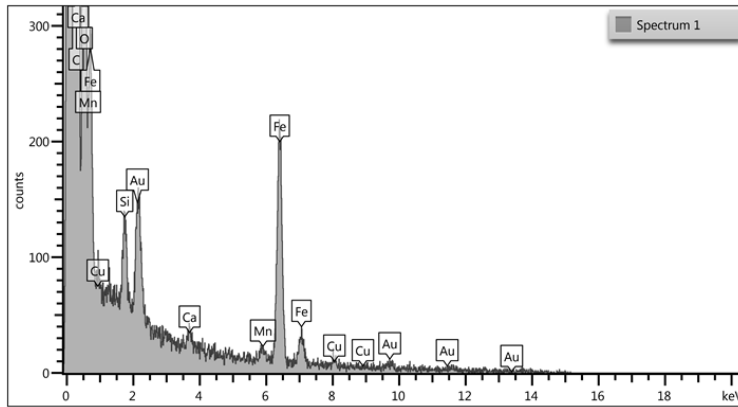


Figura 11.2: Espectro correspondiente a la figura 4.15

11.2. PM₁₀

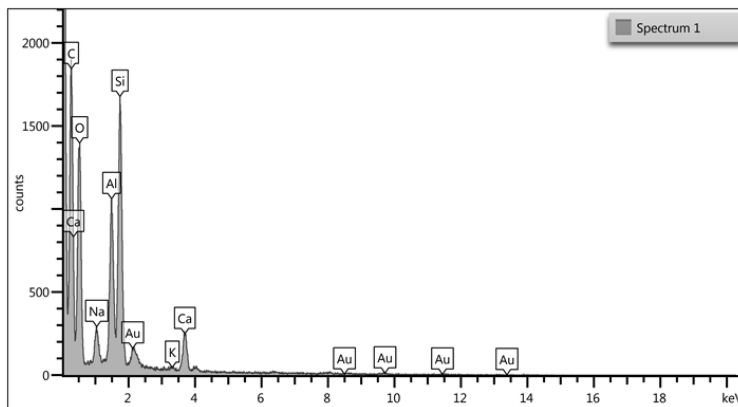


Figura 11.3: Espectro correspondiente a la figura 4.17

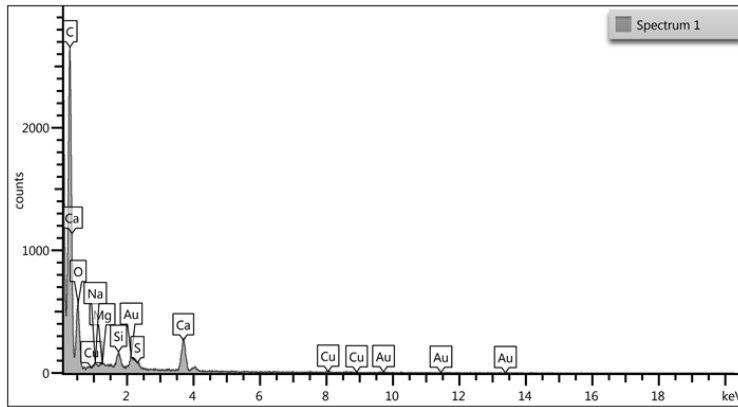


Figura 11.4: Espectro correspondiente a la figura 4.18

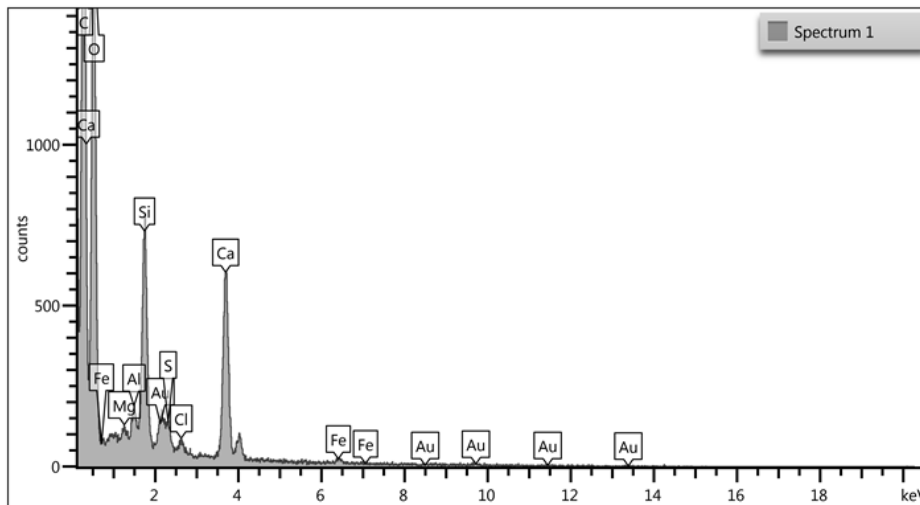


Figura 11.5: Espectro correspondiente a la figura 4.20

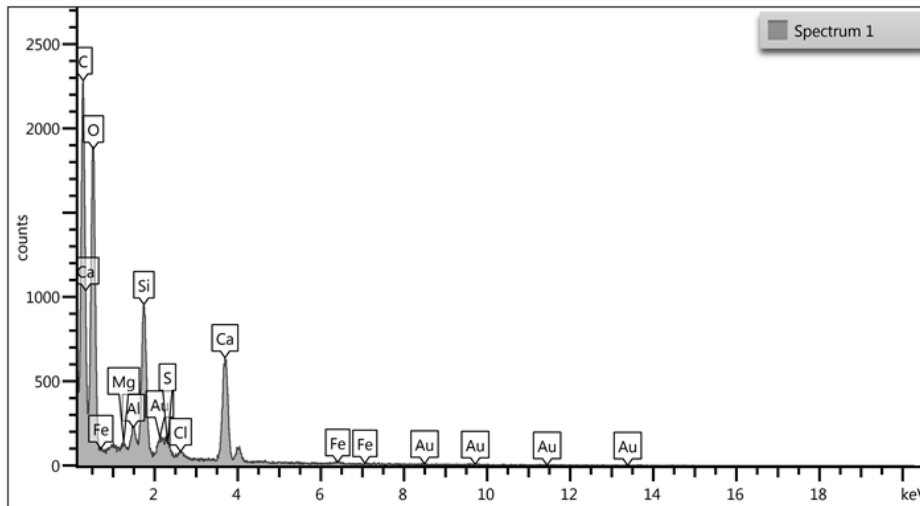


Figura 11.6: Espectro correspondiente a la figura 4.21

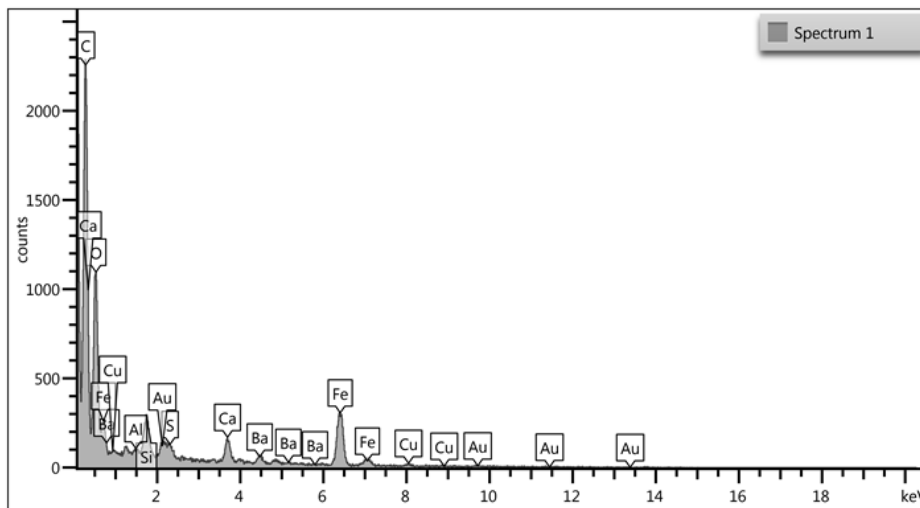


Figura 11.7: Espectro correspondiente a la figura 4.22

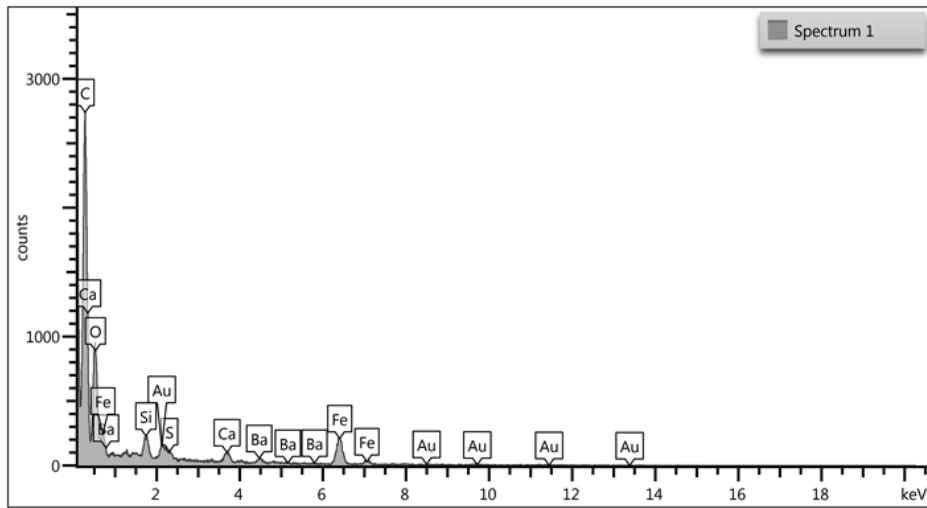


Figura 11.8: Espectro correspondiente a la figura 4.23

Referencias

Alley, R. B. (2000). The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary science reviews*, 19(1-5), 213-226..

Air Metrics., (2002), MiniVol Portable Air Sampler. 30/Oct/2018, de Air Metrics Sitio web: <http://www.airmetrics.com/products/minivol/>

Aparicio, F. (2019). XRF: Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X. 13/01/2020, de Alter Technology Sitio web: <https://wpo.altertechnology.com/es/xrf-x-ray-fluorescence-spectroscopy-hi-rel-parts/>

B.D Cullity. Elements of x-ray diffraction, ed Addison-Wesley publishing company, inc, EstadoUnidos. 1956.

Baldauf, R. W., Lane, D. D., Marotz, G. A., & Wiener, R. W., (2001), Performance evaluation of the portable MiniVol particulate matter sampler. *Atmospheric Environment*, 35(35), 6087-6091.

Barrera López, V., (2012), Estudio de procedencia de PM₁₀ en la zona metropolitana de la ciudad de México con análisis elemental con las técnicas de PIXE y MicroPIXE y desarrollo de modelo receptor. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Tierra.

Berend, I. T. (2016). An economic history of twentieth-century Europe: economic regimes from laissez-faire to globalization. Cambridge University Press, United Kingdom.

Beverly S. Cohen, Susanne V. Hering., (1995), Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants 8th Edition. E.U.A: American Conference of Governmental Industrial Hygienists Committee.

Bratveit, M., Haaland, I.M., Moen, B.E., & Malsnes, A., (2004). Exposure to sulfuric acid in zinc production. *The Annals of Occupational Hygiene* 48, 159-170.

Brouwer, P. (2010). *Theory of XRF: Getting Acquainted with the Principles*: Almelo. Netherlands, PANalytical BV.

Clayton, C. A., Perritt, R. L., Pellizzari, E. D., Thomas, K. W., Whitmore, R. W., Wallace, L. A., ... & Spengler, J. D. (1993). Particle Total Exposure Assessment Methodology (PTEAM) study: distributions of aerosol and elemental concentrations in personal, indoor, and outdoor air samples in a southern California community. *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, 3(2), 227-250.

Chao, C. Y., & Wong, K. K. (2002). Residential indoor PM₁₀ and PM_{2.5} in Hong Kong and the elemental composition. *Atmospheric Environment*, 36(2), 265-277.

DeCarlo, P. F., Slowik, J. G., Worsnop, D. R., Davidovits, P., & Jimenez, J. L., (2004), Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory. *Aerosol Science and Technology*, 38(12), 1185-1205.

Demayo A. (1984). Composition of average earth crust. In: *Handbook of Chemistry and Physics* (R.C. Weast, Ed.), 65th ed. CRC Press, Boca Raton, p. F-146.

Diario oficial de la federación., (2016). Normas Oficiales Mexicanas. URL: <http://www.diariooficial.gob.mx>. Fecha de modificación, 1, 01-14.

Dilo Company, Inc., SF₆ Leak Detector, Recuperado de: <https://www.gasequipmentcatalog.net/product/104>, Octubre, 2019.

Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., and Speizer, F. E. (1993). An Association Between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities., *N. Engl. J. Med.* 329:1753–1759
ECOTECH INSTRUMENTS., (s.f), Combo PM₁₀ & PM_{2.5} Sampler. 30/10/2018, de ECOTECH INSTRUMENTS Sitio web: <http://ecotechinstruments.tradeindia.com/combo-pm10-pm2-5-sampler->

2377580.html

Espinosa, A., Miranda, J., & Pineda, J. C. (2010). Evaluación de la incertidumbre en cantidades correlacionadas: aplicación al análisis elemental de aerosoles atmosféricos. *Revista Mexicana de Física E*, 56(1), 134-140.

Finlayson-Pitts, B.J., Pitts J.N., (1999), *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, Academic Press, San Diego, E.U.A.

Fromme, H., Diemer, J., Dietrich, S., Cyrys, J., Heinrich, J., Lang, W., Kiranoglu, M., & Twardella, D., (2008). Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Atmospheric Environment* 42, 6597-6605.

Gehin, E., Ramalho, O., & Kirchner, S., (2008). Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmospheric Environment* 42, 8341-8352.

Godish T., (2004), *Air Quality*, Lewis Publishers, Florida, E.U.A.

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*, New York, Springer.

Harrison, R. M., & Yin, J., (2000), Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. *Science of the Total Environment*, 249(1-3), 85-101.

Henry, R. C., Lewis, C. W., Hopke, P. K., & Williamson, H. J. (1984). Review of receptor model fundamentals. *Atmospheric Environment* (1967), 18(8), 1507-1515.

Hildemann, L.M., Rogge, W.F., Cass, G.R., Mazurek, M.A., Simoneit, B.R.T., (1996), Contribution of primary aerosol emissions from vegetation-derived sources to fine particle concentrations in Los Angeles, *Journal of Geophysical Research* 101, 19541-19549.

International Commission on Radiological Protection, (1994), Human Respiratory tract model for radiological protection, ICRP Publication 66, *Annals of the ICRP*, 24, 1-482.

Jacobson, M. Z., (2002), Analysis of aerosol interactions with numerical techniques for solving coagulation, nucleation, condensation, dissolution, and reversible chemistry among multiple size distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D19).

Kang, S., Hwang, H.J., Park, J.M., Kim, H.K., & Ro, C.U., (2008). Chemical compositions of subway particles in Seoul, Korea determined by a quantitative single particle analysis. *Environmental Science and Technology* 42, 9051-9057.

Kuo, S.C., Hsieh, L.Y., Tsai, C.H., & Tsai, Y.I., (2007). Characterization of PM_{2.5} fugitive metal in the workplaces and the surrounding environment of a secondary aluminum smelter. *Atmospheric Environment* 41, 6884-6900.

Koutrakis, P., Briggs, S. L., & Leaderer, B. P. (1992). Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York. *Environmental Science & Technology*, 26(3), 521-527.

Kulkarni, P., Baron, P. A., & Willeke, K. (Eds.). (2011). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. John Wiley & Sons.

Malmqvist, K. G. (1984). PIXE—a useful tool in studies of work environment aerosols. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 3(1-3), 529-540.

Manahan, S. E., (2006), *Introducción a la química ambiental*, Reverté, Ciudad de México, México.

Martuzevicius, D., Grinshpun, S., Lee, T., Hu, S., Biswas, P., Reponen, T., & LeMasters, G., (2008). Traffic-related PM_{2.5} aerosol in residential houses: indoor versus outdoor concentrations. *Atmospheric Environment* 42, 6575-6585.

Mejía-Ponce, L. V., Hernández-López, A. E., Reynoso-Cruces, S., Pineda, J. C., Mendoza-Flores, J. A., & Miranda, J. (2018). Improvements to the X-ray Spectrometer at the Aerosol Laboratory, Instituto de Física, UNAM., Chitkara University., *Jornal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, Vol 6(1) 57-60.

Mészáros, E., (1999), *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*, Akadémiai Kiado, Budapest, Hungary.

Miranda J., (1994), Modelos de Receptor para Aerosoles Atmosféricos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Física Nuclear, Santiago de Chile, Chile.

Miranda J. y Pegueros J. R. (1993). Interacción de Rayos X y Gamma con Materia. Física Experimental, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

National Center for Environmental Assessment (Research Triangle Park, & NC). (1996). Air Quality Criteria for Particulate Matter (Vol. 3). US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment.

Nygren, O., & Aspman, O., (2004). Validation and application of wipe sampline and portable XRF analysis as an on-site screening method for assessment of deposited aerosols in workplaces. Australian Journal of Chemistry 57, 1021-1028.

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación, 26 de Septiembre 2005.

Organización Mundial de la Salud. (2 de Mayo de 2018). Calidad del aire y salud. 30 de Noviembre de 2018, de OMS Sitio web: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

Özkaynak , H., Xue, J., Spengler, J., Wallace, L., Pellizzari, E., and Jenkins, P. (1996). Personal Exposure to Airborne Particles and Metals: Results from the Particle Team Study in Riverside, California, Journal of Exposure Anahsis and Environmental Epidemiolog, 6(1), 57.

Pérez, I., Serrano. J., Alfaro Moreno E., Baumgardner D., García Cuellar C., Miranda J., Raga G. B., Castillejos M., Drucker Colín R., Osornio Vargas A. R., (2007), Relations between PM₁₀ composition and cell toxicity. A multivariate and graphical approach, Chemosphere 67, 1218-1228.

Phalen R.F. (1999). Airway Anatomy and Physiology. In: Vincent J.H. (eds), Particle Size-Selective Sampling for Particulate Air Contaminants. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Cincinnati,

OH, USA.

Raunemaa, T., Kulmala, M., Saari, H., Olin, M., & Kulmala, M. H. (1989). Indoor air aerosol model: transport indoors and deposition of fine and coarse particles. *Aerosol Science and Technology*, 11(1), 11-25.

Raut, J.-C., Chazette, P., & Fortain, A., (2009). Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris. *Atmospheric Environment* 43, 860-868.

Reimer, L. (2013). *Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis* (Vol. 45), Springer, Stanford, CA., USA.

Rogge, W. F., Hildemann, L. M., Mazurek, M. A., Cass, G. R., & Simoneit, B. R., (1991), Sources of fine organic aerosol. 1. Charbroilers and meat cooking operations. *Environmental Science & Technology*, 25(6), 1112-1125.

Salma, I., Weidinger, T., & Maenhaut, W., (2007). Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a Metropolitan underground railway station. *Atmospheric Environment* 41, 8391-8405.

See, S.W., & Balasubramanian, R.,(2008). Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods. *Atmospheric Environment* 42, 8852-8862.

Seinfeld, J.H., Pandis S.N., (1998), *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley, New York, E.U.A.

Sheppard, N., Willis, H. A., & Rigg, J. C. (1987). Names, symbols, definitions and units of quantities in optical spectroscopy (Recommendations 1984). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 43(1), 1-9.

Shih, T.S., Lai, C.H., Hung, H.F., Ku, S.J., Tsai, P.J., Yang, T., Liou, S.H., Loh, C.H., & Jaakkola, J.K., (2008). Exposure to elemental and organic carbon among highway Toll workers in Taipei. *Science of the Total Environment* 402, 163-170.

Sotiriou, M., Ferguson, S.F., Davey, M., Wolfson, J.M., Demokritou, P., Lawrence, J., Sax, S.N., & Koutrakis, P., (2008). Measurement of particle concentrations in a dental office. *Environmental Monitoring and Assessment*

137, 351-361.

Spurny, K. R. (2017). *Analytical Chemistry of Aerosols: Science and Technology*, Routledge, New York, USA.

Statistica/W (2015) Statsoft, Tulsa, Oklahoma.

Suárez, A., & Augusto, C., (2012), Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Revista luna azul*, (34).

Vekemans, B., Janssens, K., Vincze, L., Adams, F., & Van Espen, P. (1994). Analysis of X-ray spectra by iterative least squares (AXIL): New developments. *X-Ray Spectrometry*, 23(6), 278-285.

Viana Rodríguez, M. D. M., (2003), Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias, Universitat de Barcelona, Barcelona, España. Tesis para obtener el grado de doctora en Geoquímica.

Wilms, V., Böckler, M., Fendler, D., Goergens, U., Brucksch, E., & Knopp, R., (2006). Lackaerosole beim Spritzlackieren Beschreibung der expositions situation. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 6, 239-244.

World Health Organization. (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). Geneva: World Health Organization.

Zhao, B., Zhang, Y., Li, X., Yang, X., & Huang, D. (2004). Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method. *Building and Environment*, 39(1), 1-8.

Žitnik, M., Kastelic, A., Rupnik, Z., Pelicon, P., Vaupetič, P., Bučar, K., & Ishii, K. (2010). Time-resolved measurements of aerosol elemental concentrations in indoor working environments. *Atmospheric Environment*, 44(38), 4954-4963.