

Informe Parcial del Proyecto
Caracterización Química de
Partículas Suspendidas $PM_{2.5}$
en el Área Metropolitana de
Monterrey, Estado de Nuevo
León

Agosto de 2020



CENTRO MARIO MOLINA PARA ESTUDIOS ESTRATÉGICOS
SOBRE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE A.C.

Dr. Mario Molina
Presidente

Ing. Carlos Mena Brito
Director Ejecutivo

Antonio Mediavilla Sahagún
Coordinador de Proyectos

INTEGRANTES DEL PROYECTO
Adriana Barradas Gimante
Hugo Alberto Barrera Huertas
Martin Danilo Gomez Sánchez

CONSULTORES EXTERNOS
M. en C. Salvador Blanco Jiménez
Biól. Sergio David Zamora Aparicio
Q.F.B. Marisela Pablo Santiago
David Gómez Martínez
Rosa María Camacho Flores

Agosto de 2020

Agradecemos la aportación de la Secretaría de Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Nuevo León para la realización de este proyecto.



Prolongación Paseo de los Laureles 458 Despacho 406,
Col. Bosques de las Lomas, Cuajimalpa, C.P. 05120, México, D.F.
Teléfonos: (52 55) 91 77 16 70

ÍNDICE

I	Resumen Ejecutivo	4
II	Introducción	6
III	Objetivo General.....	8
III.1	Objetivos específicos	8
IV	Métodos.....	9
V	Muestreo	9
VI	Preservación y Almacenamiento de las Muestras.....	11
VII	Análisis De Laboratorio.....	12
VIII	Evaluación de resultados.....	13
IX	Resultados.....	14
X	Composición química promedio de PM _{2.5} en los sitios de muestreo	15
XI	Comparación de composición química con estudios previos	16
XII	Factores de enriquecimiento.....	17
XIII	Reconstrucción de masa	18
XIV	Análisis multivariado por componentes principales	21
XV	Aplicación del modelo receptor factorización positiva de matrices (PMF)	23
XVI	Conclusiones y recomendaciones	30
XVII	Referencias	32
XVIII	Anexos.....	37

FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los municipios que conforman el Área Metropolitana de Monterrey (en amarillo) dentro del Estado de Nuevo León (en verde).	8
Figura 2. Diagrama de flujo de los procesos del Proyecto Caracterización Química de Partículas Suspendidas en el Área Metropolitana de Monterrey.	9
Figura 3. Muestreadores de bajo volumen Minivolos (A) y muestreador de flujo intermedio Slit-Jet Air Sampler (B).....	10
Figura 4. Sitios seleccionados para el muestreo de PM _{2.5} : Cadereyta, Apodaca, Universidad, Santa Catarina y García (con flechas amarillas) y San Bernabé (con flecha azul), zonas industriales (áreas color amarillo) y rosas de viento anuales de 2018 a 2019.	11
Figura 5. Equipos analíticos para el análisis de muestras de partículas (A) Ultramicrobalanza para determinación de masa, (B) Equipo de análisis elemental por fluorescencia de rayos X, (C) Cromatógrafo de iones para análisis de aniones y cationes y (D) Analizador de carbono por termorreflectancia óptica. ...	13
Figura 6. Variación diaria de PM _{2.5} de muestreos de 24 horas en seis sitios del Área Metropolitana de Monterrey.	14
Figura 7. Composición promedio de las partículas suspendidas PM _{2.5} en cada sitio de muestreo del Área Metropolitana de Monterrey.	16
Figura 8. Comparación de las concentraciones de elementos de febrero de 2020 con campañas realizadas en años previos.	17
Figura 9. Factores de enriquecimiento calculados tomado como referencia al elemento Silicio. La línea verde representa el límite de contribución natural, las línea naranja y roja representan aportes por contribución antropogénica en 100 y 1000 veces, respectivamente (Mateus et al., 2013; Summak et al., 2018).	18
Figura 10. Reconstrucción química promedio de la concentración de PM _{2.5} en los sitios de muestreo del Área Metropolitana de Monterrey.....	20
Figura 11. Perfil de la composición química de las partículas PM _{2.5} asociadas a fuentes potenciales de emisión de las muestras obtenidas en el Área Metropolitana de Monterrey.....	24
Figura 12. Perfil de composición y abundancia de las especies químicas de cada Factor. Las barras azules representan la concentración y los cuadros rojos el porcentaje de la especie química en el factor con respecto a su 100% representado en todos los factores.	25
Figura 13. Contribución promedio de las fuentes de emisión de cada sitio de muestreo y su interpolación en el Área Metropolitana de Monterrey.....	28

TABLAS

Tabla 1. Análisis de Componentes Principales de la composición química de las muestras obtenidas del 12 al 21 de febrero de 2020 en el Área Metropolitana de Monterrey. Resaltado en naranja se encuentran los máximos valores de correlación o de carga.....	22
Tabla 2. Contribución de las fuentes posibles de emisión al PM _{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey.....	26

I Resumen Ejecutivo

El Área Metropolitana de Monterrey, tiene gran actividad comercial e industrial con elevado desarrollo económico en el país.

Las emisiones industriales, aquellas derivadas de los automotores, de los comercios y servicios, así como de la explotación de bancos de materiales a cielo abierto, contribuyen a que los niveles de partículas suspendidas de la fracción fina $PM_{2.5}$ sean suficientemente altos como para representar un problema de salud pública y ambiental que es necesario atender mediante la implementación de políticas públicas que conlleven al control y mitigación de este contaminante.

En años recientes el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Área Metropolitana de Monterrey ha logrado incrementar en número de estaciones la medición automática horaria de este contaminante mediante la renovación y actualización de equipos hasta completar trece estaciones de monitoreo automático. Actualmente realiza el monitoreo continuo de $PM_{2.5}$ en estas 13 estaciones.

Por la relevancia de este contaminante, se diseñó un estudio que se realizara en el periodo de invierno, periodo en el que históricamente se presentan elevadas concentraciones de $PM_{2.5}$, con el objetivo de evaluar los niveles de concentración de las partículas suspendidas y su composición química asociada en sitios representativos del Área Metropolitana de Monterrey, con el fin de comprender la contribución de las fuentes o sectores de emisión que las emiten.

En el periodo comprendido entre el 12 y 21 de febrero de 2020 se realizaron muestreos de partículas suspendidas respirables finas en las estaciones fijas de: Cadereyta, Escobedo, García, Santa Catarina, Universidad y San Bernabé.

Los resultados de modelación de receptores, mediante la aplicación de Factorización Positiva de Matrices (PMF por sus siglas en inglés) (Paatero 1997 a y b; USEPA 20014 a y b) asociados con los indicadores químicos (Hopke, 2016) sugieren como fuentes potenciales probables que aportaron a la composición de las $PM_{2.5}$ de la siguiente forma:

1. Quema de diésel, aporta el 13.1%
2. Aporte regional (Refinería), contribuye con el 6.1%
3. Procesos de metales 1, aporta con el 14.8%
4. Elaboración del vidrio + Industria del Cemento aportan con el 20.3%
5. Quema de biomasa, contribuye con el 3.1%
6. Procesos de metales 2, contribuye con el 14.7%
7. Emisiones Vehiculares, aporta el 24.1%
8. Resuspensión del suelo + Pedreras, contribuye con el 3.7%

Estos resultados sugieren tomar acciones prioritarias que han sido contempladas en el Programa de Calidad del Aire de Nuevo León vigente, como reducir y controlar las emisiones industriales principalmente de los giros químico y metalúrgico y establecer programas de reducción de emisiones vehiculares, y por otro lado incorporar trampas de partículas que reduzcan la liberación de partículas por quema de leña y carbón vegetal en locales comerciales en donde se utilice la biomasa para cocinar carnes asadas y otros alimentos.

II Introducción

El Estado de Nuevo León, forma parte de la Sierra Madre Oriental, las Grandes Llanuras de Norteamérica y la Llanura Costera del Golfo Norte. En la ciudad de Monterrey, se encuentra el Cerro de la Silla con 1,800 metros sobre el nivel del mar (msnm). Monterrey se ubica en una llanura abierta, que morfológicamente es una planicie, que a su vez contiene valles menores de origen tectónico, como el Huajuco, las Cumbres, que constituyen una llanura fluvial (Cervantes y Merla, 1995).

El 68% del Estado presenta clima seco y semiseco, el 20% cálido subhúmedo se encuentra en la región perteneciente a la llanura costera del Golfo norte, el 7 % es templado subhúmedo y se localiza en las partes altas de las sierras y el restante 5% presenta clima muy seco hacia la Sierra madre Occidental. La temperatura media anual es alrededor de 20°C, la temperatura máxima promedio es de 32°C y se presenta en los meses de mayo a agosto, la temperatura mínima promedio es de 5°C y se presenta en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 650 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de agosto y septiembre. El clima que predomina en el estado es una limitante para la agricultura, sin embargo, se cultiva maíz, sorgo, trigo, frijol, avena y cebada principalmente a base de riego (INEGI, 2019a).

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se encuentra conformada por los municipios de Apodaca, Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás, San Pedro, Santa Catarina y García, que se presenta en la Figura 1.

El INEGI en el 2015 reportó que Nuevo León cuenta con 5'119,504 habitantes, que equivalen al 4.3 % de la población nacional, de los cuales dentro del Área Metropolitana de Monterrey se encuentra una población de 4.1 millones de habitantes (INEGI, 2019b).

Es importante mencionar que Nuevo León es el tercer estado que más contribuye al PIB nacional, por debajo de la Ciudad de México y el Estado de México. Esta entidad es predominantemente industrial, el 24 % del PIB se ubica en el sector manufacturero, el cual, además de generar el 30 % del empleo, es de los más productivos; en él destacan la industria automotriz, de electrodomésticos, metalmecánica, de fabricación de maquinaria y equipos, y otros más especializados como el aeroespacial, biotecnología y software. Otros ramos que sobresalen son el de la construcción y el de servicios. Cabe destacar que la mayor productividad económica se encuentra dentro del AMM (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2016).

En el AMM se han desarrollado diversas actividades industriales dentro del área manufacturera, metalúrgica, alimenticia, entre otras. El crecimiento de este sector junto con la expansión de la población, han generado el aumento de consumo de combustibles fósiles, factor ligado a la contaminación atmosférica pues contribuye a las emisiones de partículas PM_{2.5} y otros contaminantes criterio con efectos en el ambiente, en el clima y en la salud de los habitantes.

Las partículas respirables finas tienen diversos efectos en la salud, por su tamaño pueden penetrar en los pulmones y provocar enfermedades respiratorias y por el contenido de sustancias tóxicas en las partículas, éstas pueden afectar a otros órganos como el corazón. Este contaminante tiene relación epidemiológica con la mortalidad, cáncer, diabetes y envejecimiento prematuro de los pulmones, así como alteraciones en la función

respiratoria (WHO, 2016; Cohen et al., 2017; Bowe et al., 2019; Seposo et al., 2019).

Cada vez es más frecuente que no haya visibilidad adecuada en el AMM aún para ver el Cerro de la Silla y sus colinas, esto debido a la actividad fotoquímica de gases y partículas de la región. Así mismo, partículas emitidas por la quema de combustibles fósiles y de biomasa, contienen incluso carbono negro el cual tiene características de alterar el clima y contribuir así en el cambio climático global.

Algunas de las partículas son emitidas directamente de las fuentes fijas, móviles y de área, pero otras se forman a partir de la conversión de gas a partículas, formando partículas secundarias inorgánicas como el sulfato y nitrato de amonio a partir de los gases emitidos por los escapes de automotores y chimeneas industriales tales como los óxidos de azufre y de nitrógeno. También los compuestos orgánicos son condensados y forman partículas secundarias de carbono orgánico.

La Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, mide cada hora los 365 días del año, los niveles de concentración de los contaminantes criterio, incluidas las PM_{2.5} y en años recientes ha logrado ampliar en cobertura espacial con éxito su Sistema de Monitoreo de ocho a trece estaciones fijas.

El Inventario Nacional de Emisiones, más reciente en año base 2016, estimó que se emitieron de PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey 7,223 toneladas al año, el 67% por la industria, el 21% por fuentes móviles y el 12% por fuentes de área. Es por ello importante y necesario realizar mediciones que cuantifiquen las concentraciones para este contaminante, mediante métodos de colecta de dichas partículas para su análisis en laboratorio, cuya información permita aplicar modelos matemáticos para identificar qué sectores o fuentes de emisión aportan la formación de partículas en el ambiente bajo un escenario real.

Existen una variedad de modelos lineales conceptualizados desde la década de los 70's (Miller et al., 1972 y Friedlander, 1979), llamados modelos receptores, en particular dos han sido ampliamente utilizados y reportados en la literatura científica, el modelo CMB (balance químico de masa, por sus siglas en inglés) desarrollado por Watson (1979), y el modelo PMF (factorización positiva de matrices, por sus siglas en inglés), integrado por Paatero (1997 a y b), ambos modelos disponibles en software y difundidos por la Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, por sus siglas en inglés). CMB requiere contar con perfiles de composición preferentemente de la localidad a estudiar y PMF, opera sin hipótesis de composición a priori, cuyos resultados se contrastan con la información de la presencia de fuentes locales de acuerdo a la experiencia de quien lo aplica y se auxilia también de perfiles de composición publicados (Hopke, 2016; USEPA, 2014a y b).

Existen esfuerzos documentados desde la década de los 90's, tanto del Gobierno del Estado como de la academia, del Instituto de Investigaciones Nucleares, del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y recientemente del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey sobre la composición química de las partículas suspendidas de la localidad (Aldape et al., 1999; Badillo, 2012; Martínez et al., 2012; y Blanco et al., 2015).

El presente trabajo tuvo como propósito la colección de muestras de PM_{2.5} en diversos sitios del AMM durante una campaña intensiva que buscó cuantificar la composición

química de las mismas y aplicar el modelo PMF para identificar las posibles fuentes de emisión de mayor contribución en la localidad.

Figura 1. Ubicación de los municipios que conforman el Área Metropolitana de Monterrey (en amarillo) dentro del Estado de Nuevo León (en verde).



III Objetivo General

Evaluar en las partículas suspendidas $PM_{2.5}$, su composición química que permita conocer la contribución de las fuentes mayoritarias de emisión, entre ellas las de combustibles pesados, en el Área Metropolitana de Monterrey, cuya información proporcione elementos de juicio a considerarse en las propuestas de medidas y políticas de reducción de emisiones para mejorar la calidad del aire de la región.

III.1 Objetivos específicos

- I. Establecer el muestreo de partículas $PM_{2.5}$ en al menos cinco sitios representativos de las emisiones urbanas e industriales del Área Metropolitana de Monterrey para caracterizar la composición química de las partículas suspendidas.
- II. Comparar los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ en los sitios seleccionados.
- III. Cuantificar en laboratorio las especies químicas de los elementos del aluminio al plomo de la tabla periódica, los iones principalmente nitratos, sulfatos y amonio y las fracciones de carbono orgánico e inorgánico.
- IV. Estimar la reconstrucción de masa de materia de las especies cuantificadas para evaluar su contribución en las $PM_{2.5}$ de los diversos sitios estudiados.
- V. Examinar las excedencias antropogénicas de los metales y metaloides contenidos en $PM_{2.5}$, mediante la cuantificación de factores de enriquecimiento.
- VI. Analizar la contribución mayoritaria de las fuentes principales de emisión mediante la aplicación del modelo receptor USEPA PMF (Factorización Positiva de Matrices de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América por sus

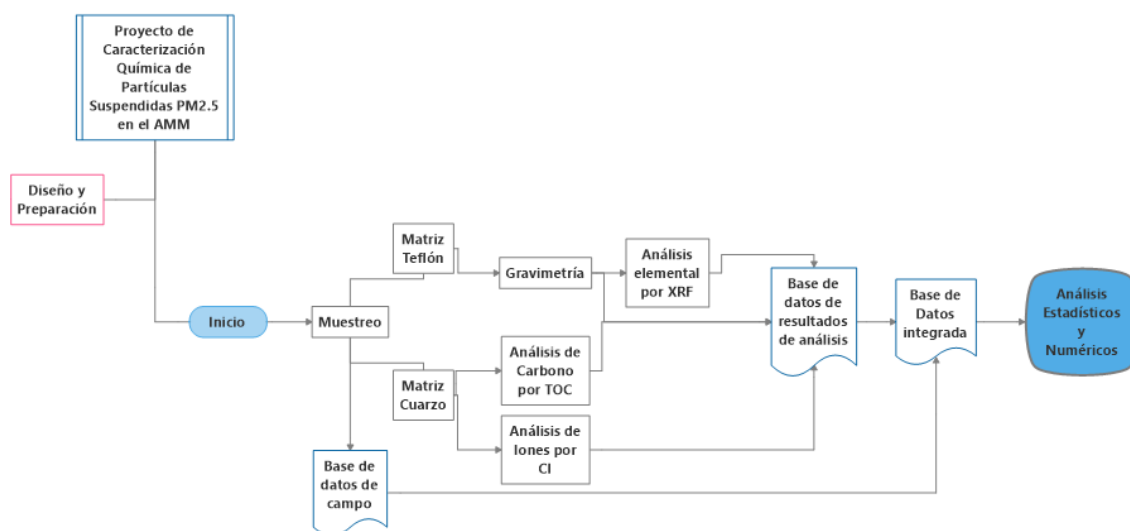
siglas en inglés).

IV Métodos

Las actividades del proyecto, se esquematizan en la Figura 2. A partir de un diseño y selección de los sitios representativos para este estudio, este último se presenta en el Anexo 1 y el programa e informe de muestreo en los Anexos 2 y 3.

Se realizaron muestreos de bajo y medio volumen para coleccionar partículas suspendidas de la fracción PM_{2.5} en filtros de cuarzo y teflón, cuyas muestras fueron ingresadas al Laboratorio del INECC para su análisis como se describe en secciones siguientes. Los datos de campo y los resultados analíticos de Laboratorio conformaron una sola base de datos integrada de concentración de especies químicas de PM_{2.5} para su evaluación numérica y estadística.

Figura 2. Diagrama de flujo de los procesos del Proyecto Caracterización Química de Partículas Suspendidas en el Área Metropolitana de Monterrey.



V Muestreo

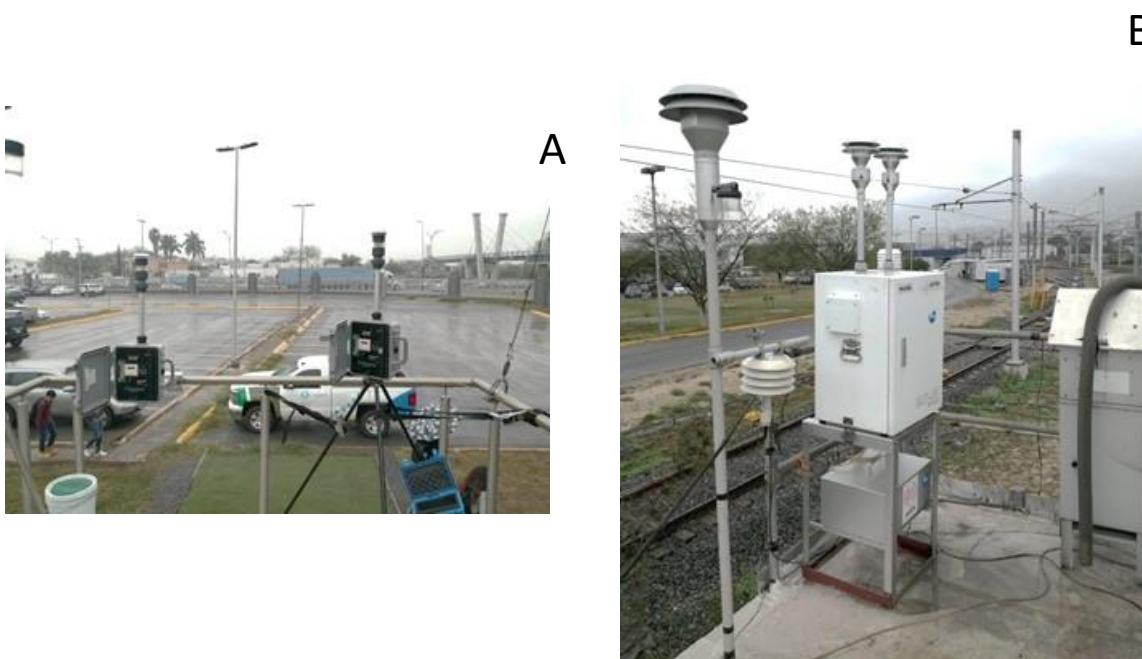
Se llevaron a cabo muestreos de 24 horas a las 10 am +/- 1 hora, diariamente del 12 al 21 de febrero de 2020, en las estaciones de monitoreo automático local cuyos sitios son: Cadereyta, Apodaca, García, Santa Catarina, Universidad y San Bernabé, mediante:

- Muestreadores de aire de bajo volumen Minivol TM TAS (Figura 3A), desarrollados por Airmetrics en conjunto con la Agencia Ambiental de los Estados Unidos de

América comparables con equipos de referencia (Baldauf et al., 2001), funcionan a través de la succión de aire mediante una bomba de vacío que opera con un flujo de 5 L/min y es controlada por un temporizador programable que además contiene un rotámetro como sistema controlador de flujo. Las partículas son direccionadas por un sistema de impactadores en donde se hace la separación del material particulado. Dichas partículas fueron recolectadas sobre filtros de 47 mm de diámetro que se colocaron sobre un casete de soporte. Se utilizaron matrices de colección de teflón y cuarzo en equipos dispuestos lado al lado por sitio de muestreo. Los flujos de muestreo locales fueron verificados y corregidos mediante medidores de presión digitales trazables. Finalmente, el volumen de muestreo fue ajustado a las condiciones de temperatura y presión ambientales locales.

- Muestreador de flujo intermedio Slit jet MCAS-SJ air sampler (Murata Keisokuki Service Co., Ltd.) (Figura 3B), equipo utilizado ampliamente en Japón y en Asia (Baldorj y Sato, 2015). Este equipo cuenta con dos cabezales para utilizar, cada uno con diferentes matrices de colección el cual operó a un flujo de 30 L/min estándar, por lo que el volumen de muestreo se pasó a condiciones locales corrigiendo los flujos de muestreo utilizando la presión y temperatura local. Sigue el mismo principio de separación del tamaño de partículas que el Minivol, descrito anteriormente.

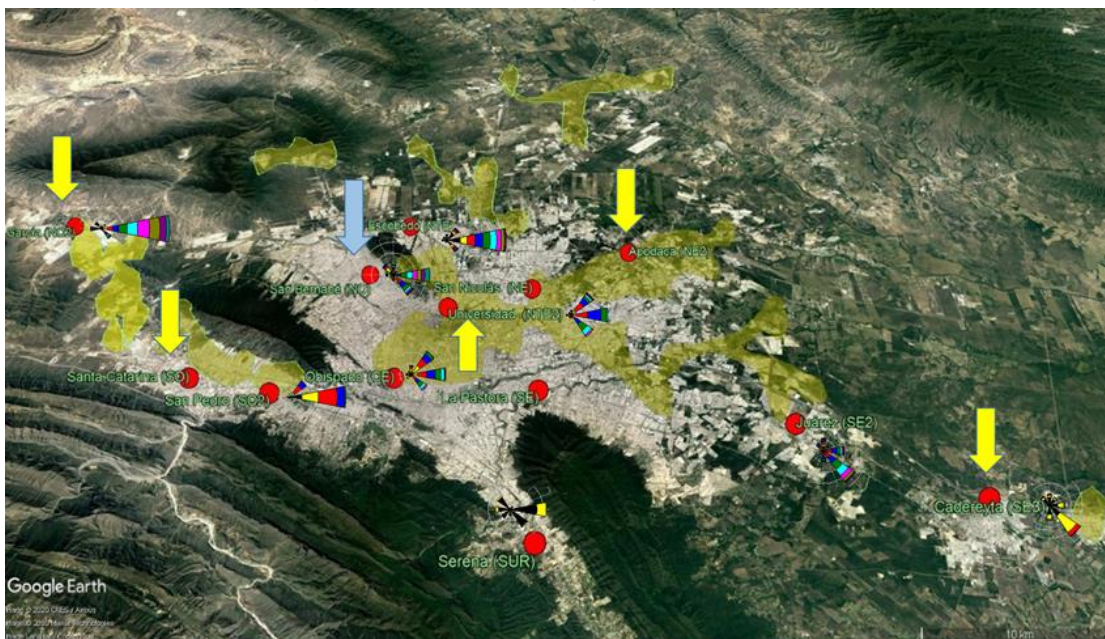
Figura 3. Muestreadores de bajo volumen Minivoles (A) y muestreador de flujo intermedio Slit-Jet Air Sampler (B).



Con base en la revisión de datos históricos de las partículas suspendidas del Área Metropolitana de Monterrey y con la visita a todas las estaciones automáticas de

monitoreo atmosférico de la localidad, se seleccionaron sitios con disponibilidad de corriente eléctrica, seguridad y representatividad estadística de sus mediciones. Se seleccionaron en conjunto entre el INECC y el Centro Mario Molina cinco sitios que posteriormente fueron ampliados a seis, éstos se presentan en la Figura 4.

Figura 4. Sitios seleccionados para el muestreo de PM_{2.5}: Cadereyta, Apodaca, Universidad, Santa Catarina y García (con flechas amarillas) y San Bernabé (con flecha azul), zonas industriales (áreas color amarillo) y rosas de viento anuales de 2018 a 2019.



VI Preservación y Almacenamiento de las Muestras

Previo al muestreo, los filtros fueron ensamblados en los cabezales para su traslado a los sitios de recolección tanto de la matriz de colección de cuarzo como de teflón, también en hieleras con geles refrigerantes, sin exposición a la luz.

En el sitio de muestreo se realizó el recambio de cabezales y las muestras obtenidas se trasladaron al sitio habilitado como laboratorio para su manejo, etiquetado y almacenamiento.

Una vez concluida la campaña de medición, las muestras fueron trasladadas en refrigeración, de Monterrey a los Laboratorios del INECC ubicados en los Viveros de Coyoacán donde fueron resguardadas en un cuarto frío a 4 °C y al siguiente día hábil, fueron ingresadas al Área de Recepción de muestras con cadena de custodia y hojas de campo para su ingreso, revisión de integridad de los filtros, codificación y conducción a las áreas analíticas correspondientes.

VII Análisis De Laboratorio

Las muestras obtenidas por la matriz de colección de teflón fueron analizadas de la siguiente manera:

- **Acondicionamiento y pesaje de las muestras:** éstas se analizaron mediante gravimetría previo y posterior al muestreo para determinar las concentraciones de partículas suspendidas en aire ambiente. El pesaje de los filtros se realizó en el Laboratorio de Acondicionamiento y Pesaje de Filtros del INECC, empleando una ultra microbalanza analítica, marca Cahn en condiciones de temperatura (22 +/- 3°C) y humedad (30 +/- 5%) controlados al interior del laboratorio y con la eliminación de estática en el área (Figura 5A).
- **Análisis por fluorescencia de rayos X:** para la determinación de 16 elementos: aluminio, silicio, azufre, cloro, potasio, calcio, titanio, vanadio, cromo, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, bromo y plomo, se utilizó un equipo de fluorescencia de rayos-X (XRF por energía dispersiva) marca Thermo Scientific modelo ERD QUANT´X obtenidas de teflón de 47 mm de diámetro. El principio de medición de este instrumento consiste en la emisión de rayos X a partir de un filamento de rodio, que incide en la muestra, excitando los átomos presentes en la misma, que a su vez emiten radiación característica denominada fluorescencia de rayos X, cuya intensidad es transmitida a un detector de rayos X de estado sólido de silicio litio (Si [Li]) (Figura 5B).

A las muestras colectadas en filtros con una matriz de colección de cuarzo, se les realizaron los análisis:

- **Evaluación de iones y cationes:** se cuantificaron los aniones: cloruro, sulfato, nitrato, sodio, amonio y calcio. Las especies químicas de aniones y cationes fueron extraídas de los filtros de cuarzo muestreados, con agua desionizada, cuyo material extraído fue analizado mediante cromatografía líquida de intercambio iónico con el equipo marca Dionex DX-500 con Columna IonPac AS14 para aniones y para cationes con el equipo Dionex ICS 1600 (Figura 5C).
- **Cuantificación de carbono orgánico y carbono elemental:** con un analizador de carbono marca Sunset Lab., mediante un proceso químico, de oxidación diferencial del carbono orgánico (OC) y del carbono elemental (EC), con una rampa de temperatura, la parte orgánica es volatilizada en las primeras temperaturas en una atmósfera sin oxígeno (140, 280, 480 y 580 °C) y la parte elemental se volatiliza en las últimas temperaturas en una atmósfera con oxígeno (580, 740 y 840°C) de operación del equipo (Figura 5D).

Figura 5. Equipos analíticos para el análisis de muestras de partículas (A) Ultramicrobalanza para determinación de masa, (B) Equipo de análisis elemental por fluorescencia de rayos X, (C) Cromatógrafo de iones para análisis de aniones y cationes y (D) Analizador de carbono por termorreflectancia óptica.



VIII Evaluación de resultados

De la revisión de las bases de datos de composición química de las partículas PM_{2.5}, se obtuvieron estadísticos de tendencia central, promedios para conocer la variación diaria en seis sitios de muestreo.

Se llevó a cabo la reconstrucción de masa para obtener el aporte de elementos mayoritarios como primer indicio de identificación de fuentes, así como de la contribución de partículas secundarias inorgánicas.

Se realizó la cuantificación de factores de enriquecimiento en la composición elemental de PM_{2.5}.

Se realizó estadística multivariada de reducción de variables mediante análisis de componentes principales para obtener la agrupación de variables o en factores o fuentes potenciales de emisión, partiendo de la correlación de las variables.

Se aplicó la metodología del modelo Receptor PMF de la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, por sus siglas en inglés) en su versión 5, para obtener los perfiles de composición y fuentes potenciales de emisión o factores (USEPA, 2014 a y b). Los factores obtenidos de los resultados del modelo se compararon con las bases de datos SPECIATE versión 5 (USEPA, 2019) y de SPECIEUROPE 2.0 (Pernigotti, Belis y Spanò, 2016), así como de los perfiles publicados en la literatura

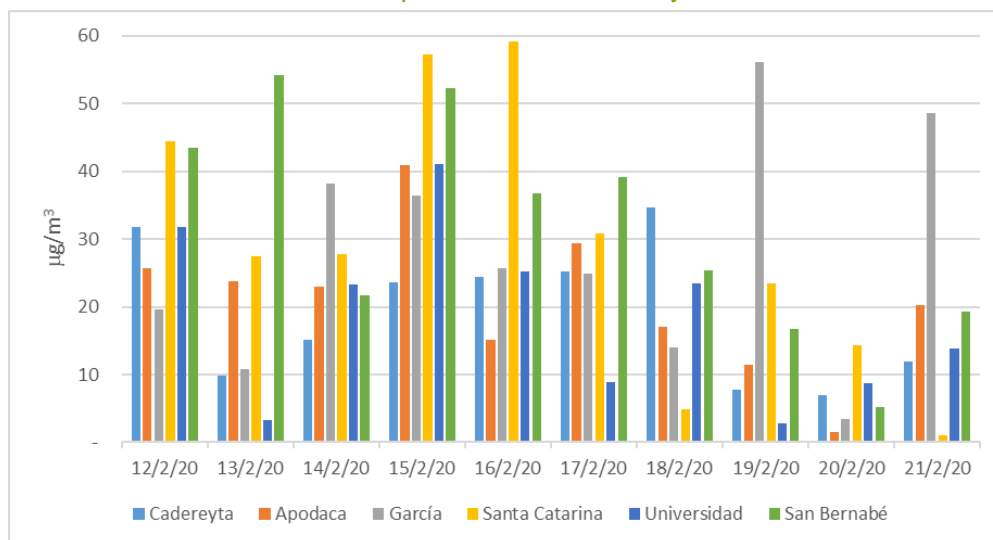
científica (Amato et al., 2014; Čargonja et al., 2019; Hsu et al., 2017; Jeričević et al., 2019; Maenhaut, 2018; Samek et al., 2017; Viana et al., 2008). Finalmente, se designaron las probables fuentes tomando en cuenta las fuentes descritas en el Inventario Nacional de Emisiones año base 2016 para el Área Metropolitana de Monterrey (SEMARNAT, 2019).

Con el fin de evaluar los resultados de cada fuente de emisión potencial se realizaron interpolaciones espaciales de los sitios de muestreo para determinar las zonas de mayor aporte de las partículas suspendidas finas.

IX Resultados

En la campaña de medición realizada del 12 al 21 de febrero de 2020, se colectaron 60 muestras integradas de 24 horas en seis sitios de muestreo: Cadereyta, Apodaca, García, Santa Catarina, Universidad y San Bernabé en el Área Metropolitana de Monterrey. Las concentraciones de partículas PM_{2.5} solo en seis ocasiones rebasaron los límites de la NOM-025-SSA1-2014 para periodos de exposición de 24 horas establecida en 45 µg/m³, dos ocasiones en García, 2 en Santa Catarina y 2 en San Bernabé. Estos sitios se encuentran cercanos a colinas y a amplias áreas de terracería. Es importante señalar que el 19 de febrero, ocurrió un incendio en plaza comercial en García que contribuyó en la excedencia a la Norma en ese sitio. Es importante señalar que a partir del 18 de febrero se presentaron condiciones de lluvia y bajas temperaturas y esto propició la disminución en las concentraciones de partículas suspendidas (Figura 6).

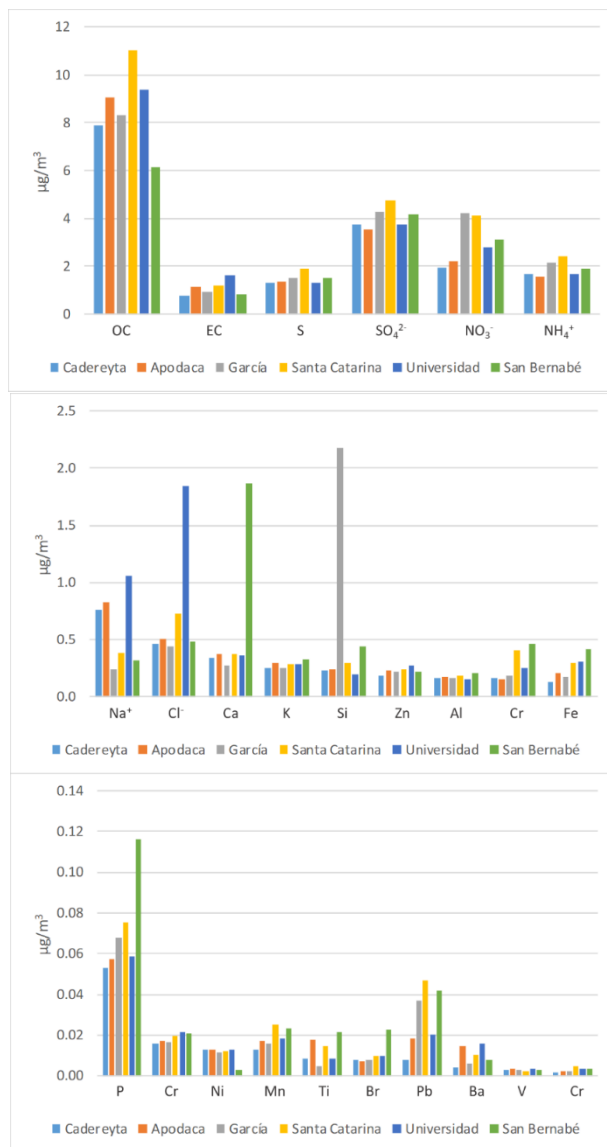
Figura 6. Variación diaria de PM_{2.5} de muestreos de 24 horas en seis sitios del Área Metropolitana de Monterrey.



X Composición química promedio de PM_{2.5} en los sitios de muestreo

La composición química promedio por sitio de muestreo de toda la campaña de PM_{2.5} se observa en la Figura 7. Los elementos de mayor concentración por arriba de 1 µg/m³ son carbono orgánico, sulfatos, nitratos, amonio, azufre y carbono elemental; en un segundo bloque las especies químicas por arriba de 0.1 y por debajo de 2.3 µg/m³ son el sodio, cloruro, calcio y silicio que superan en algunos sitios los 0.5 µg/m³, los elementos K, Zn, Al, Cl y Fe se encontraron por arriba de 0.15 y por debajo de 0.5 µg/m³ y por último el tercer bloque corresponde a los elementos traza P, Cu, Ni, Mn, Ti, Br, Pb V, y Cr, que estuvieron por debajo de 0.12 µg/m³.

Figura 7. Composición promedio de las partículas suspendidas PM_{2.5} en cada sitio de muestreo del Área Metropolitana de Monterrey.

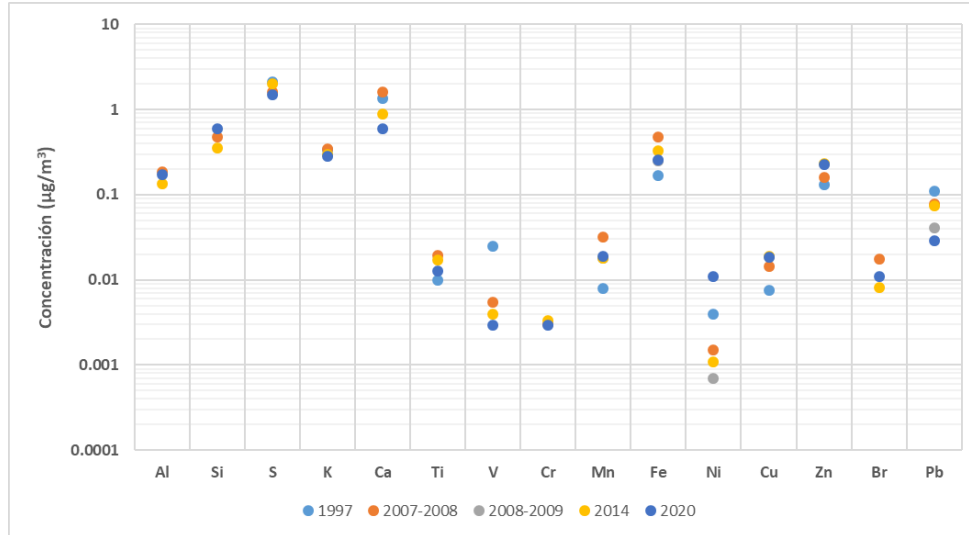


XI Comparación de composición química con estudios previos

La comparación de concentraciones de elementos de la composición química de PM_{2.5} de este estudio de febrero de 2020 con hallazgos previos de los años de 1997 a 2014 en el Área Metropolitana de Monterrey, de Aldape (1999) en 1997; de Martínez et al. (2012) en 2007 y 2008; de Badillo (2012) en 2008 a 2009 y de Blanco et al. (2015) en 2014, se presentan en la Figura 8. Elementos como el Al, Si, S, K, Ti, Cr se han mantenido con

concentraciones constantes a lo largo del tiempo, otros con variaciones intermedias como Mn y Fe. Cabe señalar que aquellos como Ca, V y Pb se observó una importante disminución en sus concentraciones, sin embargo, para los elementos de Ni, Cu y Zn estos se incrementaron. Los cambios mencionados se atribuyen a cambios en las reformulaciones de combustibles, incremento en el número de automóviles en circulación, posible reducción de las emisiones de las pedreras, cementeras y variaciones en la actividad industrial química y metalúrgica de la localidad.

Figura 8. Comparación de las concentraciones de elementos de febrero de 2020 con campañas realizadas en años previos.



XII Factores de enriquecimiento

A los elementos determinados por Fluorescencia de rayos X se les aplicó la metodología de cuantificación de factores de enriquecimiento, desarrollada para conocer el grado de impacto al ambiente, dicho factor relaciona la concentración de la composición elemental con respecto a la composición natural de la superficie de la corteza terrestre determinando el grado de aporte antropogénico de las especies químicas, tomado como referencia a un elemento típico del suelo y de la corteza como pueden ser el Si, Al y Fe. En este estudio se tomó al Aluminio como indicador natural.

El factor de enriquecimiento fue calculado de la siguiente manera:

$$FE = (X/Al)_{(aire)} / (X/Al)_{(corteza)}$$

Dónde FE es el factor de enriquecimiento y X es la concentración del elemento en cuestión.

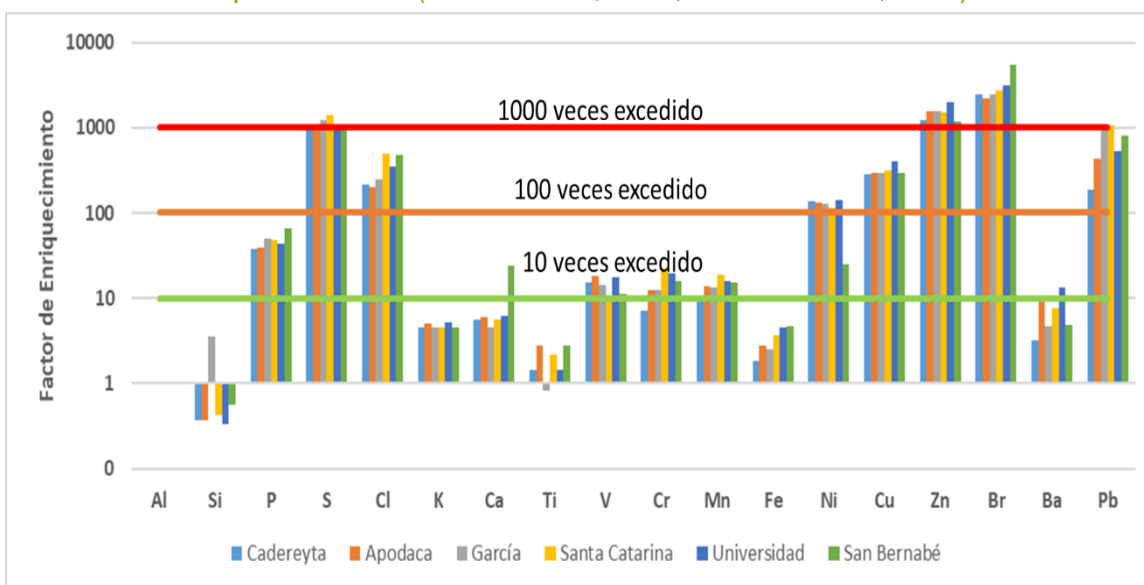
El resultado es una unidad adimensional que representa cuántas veces puede excederse un determinado elemento en el ambiente con relación a la concentración natural de este mismo elemento, conforme a la composición de la corteza terrestre. Los elementos que se encuentran por debajo de 10 veces con respecto a los cocientes $(X/Al)_{(corteza)}$ se

consideran que no tienen excedencia por la actividad antropogénica (Mateus et al., 2013; Summak et al., 2018).

Los factores de enriquecimiento de este estudio se presentan para cada elemento en la Figura 9 y se describen enseguida para este estudio.

Los elementos característicos del suelo Si, Ti y Fe, así como K y Ba para todos los sitios de muestreo y Ca con excepción de San Bernabé presentan un FE de contribución natural. Los metales V, Cr y Mn y el elemento P, denotan contribución antropogénica con FE entre 10 y 100 veces en todos los sitios con excepción de Cr en Cadereyta. Los elementos Cl, Ni, Cu y Pb se encuentran excedidos entre 100 y 1000 veces. Los elementos S, Zn y Br se encuentran en con niveles superiores a FE de 1000 y por debajo de 10,000 veces la contribución natural.

Figura 9. Factores de enriquecimiento calculados tomado como referencia al elemento Silicio. La línea verde representa el límite de contribución natural, las línea naranja y roja representan aportes por contribución antropogénica en 100 y 1000 veces, respectivamente (Mateus et al., 2013; Summak et al., 2018).

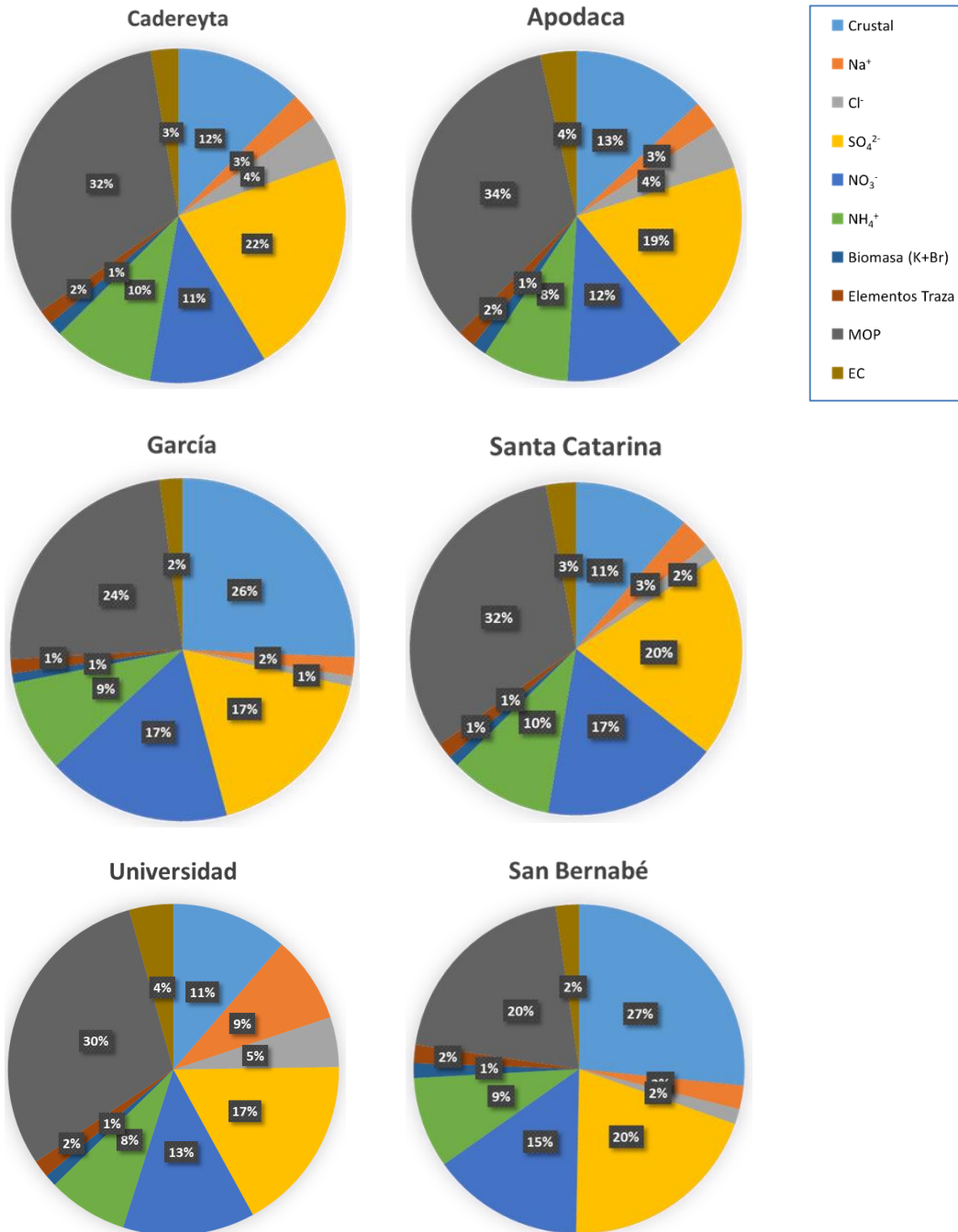


XIII Reconstrucción de masa

Se evaluó la concentración reconstruida a partir de los elementos del suelo en su forma oxidada, suma de marcadores de biomasa, partículas secundarias inorgánicas formadas a partir de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, material orgánico particulado y elementos traza que contienen metales pesados (Chow et al., 2015). Para la totalidad de la campaña se obtuvo una correspondencia del 95% con la gravimetría y del 89% con las concentraciones reportadas con los monitores automáticos de las estaciones fijas. En la Figura 10 se muestran por sitio, las reconstrucciones del PM_{2.5} por la composición química de los muestreos.

García y San Bernabé tienen los mayores aportes del suelo, con 24 y 26%, respectivamente, los demás sitios se mantienen entre 10 y 12%. El material orgánico particulado (MOP) es el más abundante en todos los sitios, de menor contribución en San Bernabé y García con 29 y 34% respectivamente, los demás sitios oscilan entre 42 y 46%. En Cadereyta y San Bernabé la conversión de dióxido de azufre a sulfato fue de 17% en ambos, los demás sitios mostraron entre 14 y 16%. Los nitratos fueron mayores en García y Santa Catarina con 14% en los dos sitios y en los demás estuvo presente entre 9 y 12%. El ion amonio fue muy similar en todos los puntos de muestreo entre 6 y 8%. El carbono elemental tuvo baja presencia entre 2 y 4%, lo mismo que los metales pesados traza y constituyentes de indicadores de quema de biomasa. En general, la atmósfera del AMM debido a la elevada diferencia entre carbono orgánico y elemental parece tener elevada contribución en la formación de compuestos orgánicos secundarios, al igual que la presencia de nitratos sulfatos y amonio derivados de la conversión de gas a partículas inorgánicas secundarias.

Figura 10. Reconstrucción química promedio de la concentración de PM_{2.5} en los sitios de muestreo del Área Metropolitana de Monterrey



XIV Análisis multivariado por componentes principales

El análisis de componentes principales, es un análisis multivariado que reúne a las variables por su varianza común y las agrupa en factores o fuentes de emisión probables, que tiene como punto de partida la existencia de correlación entre las variables de la composición del PM_{2.5}.

En la Tabla 1 se muestran las correlaciones o cargas de las especies químicas en cada componente, cuyas fuentes de emisión han sido sugeridas por las bases de datos SPECIATE versión 5 de la USEPA y con SPECIEUROPE 2.0 de la Unión Europea. Los siguientes componentes o fuentes potenciales de emisión son:

- Componente 1.- Los elementos Al, P, Cl, Ca, Ti, Fe y Br se relacionan con resuspensión del suelo y actividad minera a cielo abierto de las Pedreras
- Componente 2. El S, K, V, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ y OC se asocian con actividad vehicular e industrial
- Componente 3. El Mn, Zn, Ba, OC y EC se atribuyen al uso de diésel
- Componente 4. Los elementos As, Pb y N O₃⁻ se relacionan con quema de biomasa
- Componente 5. El elemento Se, se encuentra en los combustibles fósiles y por ello se relaciona con emisiones regionales procedentes posiblemente de la Refinería
- Componente 6. El elemento Si procede del material del suelo

La aplicación estadística del análisis de componentes principales generalizado, resulta insuficiente para la definición de fuentes potenciales de emisión por ello es necesario utilizar técnicas más avanzadas, sin embargo, al menos ha sido útil como punto de partida hacia la metodología que en la sección siguiente se presenta.

Tabla 1. Análisis de Componentes Principales de la composición química de las muestras obtenidas del 12 al 21 de febrero de 2020 en el Área Metropolitana de Monterrey. Resultado en naranja se encuentran los máximos valores de correlación o de carga.

Componente						
	1	2	3	4	5	6
Al	0.58	0.33	0.47			0.48
Si						0.95
P	0.73	0.42	0.24			0.45
S	0.21	0.85	0.18		0.19	
Cl	0.58	0.18	0.28	0.35	0.39	
K	0.27	0.72	0.37	0.18		
Ca	0.92	0.12	0.15			
Ti	0.57	0.14	0.49		0.14	
V	0.10	0.58	0.19			
Cr	0.49	0.15	0.40		0.54	
Mn	0.42	0.38	0.57			
Fe	0.73	0.24	0.55	0.10	0.13	
Ni		0.10	0.36			0.14
Cu	0.25		0.52	0.39		
Zn	0.24	0.29	0.79	0.13	0.10	
As	0.17	0.13	0.16	0.89	0.13	
Se		0.26	0.21	0.11	0.79	
Br	0.70	0.13	0.20	0.21	0.17	
Ba			0.69		0.15	
Pb	0.23	0.17	0.15	0.89		
NO ₃ _ion		0.55		0.65	0.20	
SO ₄ _ion	0.17	0.86		0.13	0.14	0.21
NH ₄ _ion	0.16	0.78		0.43	0.24	0.11
OC		0.64	0.52	0.32		
EC	0.16	0.34	0.78	0.29		

XV Aplicación del modelo receptor factorización positiva de matrices (PMF)

De lo anterior se desprende que es factible utilizar modelos de aporte de fuente capaces de distinguir con mayor definición y desagregación a las fuentes principales que contribuyen en la concentración de PM_{2.5}. Se aplicó entonces el modelo receptor de la USEPA PMF versión 5, creando dos matrices una de resultados y otra de sus incertidumbres asociadas. El modelo tuvo como salida ocho fuentes o grupos de fuentes en cien iteraciones en la búsqueda de relaciones lineales entre variables.

En la Figura 11 se presenta la huella o perfil de los factores o fuentes potenciales de emisión de cada uno de los componentes químicos estudiados para la totalidad de 60 muestras colectadas en la región. Se observa que no existen elementos químicos, iones y carbono exclusivos de una sola fuente de emisión.

En la Figura 12 el modelo expone los ocho perfiles de las fuentes probables de emisión en cuanto a su concentración por factor, así como la proporción de la composición de cada una de las especies químicas. La máxima contribución de un elemento o grupos de elementos apunta a ser considerados como indicadores de fuentes. El trabajo de campo, las visitas a los lugares, el conocimiento del Inventario Nacional de Emisiones (SEMARNAT, 2019), así como los perfiles de composición de la USEPA SPECIATE (USEPA, 2019) y SPECIEUROPE (Pernigotti, Belis y Spanò, 2016), así como de los perfiles publicados en la literatura científica (Amato et al., 2014; Čargonja et al., 2019; Hsu et al., 2017; Jeričević et al., 2019; Maenhaut, 2018; Samek et al., 2017 y Viana et al., 2008), que han fundamentado las fuentes potenciales probables, que arroja el modelo PMF de la USEPA.

La relación de componentes químicos se asocia de la siguiente forma:

- Factor 1, con los indicadores, SO₄²⁻, NH₄⁺, Ni y V
- Factor 2 con Pb, As, EC, OC, Cl, Ni y V
- Factor 3 con EC, Ba, Fe, Mn, EC, Cu, Zn OC y Se
- Factor 4 con V, K, Si, Al, OC, EC, Ca, Ni, Cu y Zn
- Factor 5 con Cl, Br, Se y K
- Factor 6 con Ni, Cu, Zn, Al, Fe, Ti, V, Cr, OC, EC, NO₃⁻, SO₄²⁻ y NH₄⁺
- Factor 7 con NO₃⁻, SO₄²⁻, OC
- Factor 8 con Ca, Al, Si, Ti, Fe

Por lo tanto, las fuentes sugeridas de aporte mayoritario son:

- Factor 1, Quema de diésel
- Factor 2, Aporte regional (Refinería de Cadereyta)
- Factor 3, Procesos de metales 1
- Factor 4, Elaboración del vidrio + industria del cemento
- Factor 5, Quema de biomasa
- Factor 6, Procesos de metales 1
- Factor 7, Emisiones vehiculares
- Factor 8, Resuspensión del suelo + Pedreras

En promedio según el modelo de PM_{2.5} de la campaña de medición fue de 20.2 µg/m³ de los cuales aportan al PM_{2.5} las siguientes fuentes: la quema de diésel con el 13.1%, el posible aporte regional de la Refinería con el 6.1%, procesos del metales 1 con el 14.8%, elaboración del vidrio más industria del cemento con el 20.3%, la quema de biomasa con el 3.1%, procesos de metales 2 con el 14.7%, emisiones vehiculares con el 24.1% y la resuspensión del suelo más la actividad de las pedreras con el 3.7% (Tabla 2).

Figura 11. Perfil de la composición química de las partículas PM_{2.5} asociadas a fuentes potenciales de emisión de las muestras obtenidas en el Área Metropolitana de Monterrey.

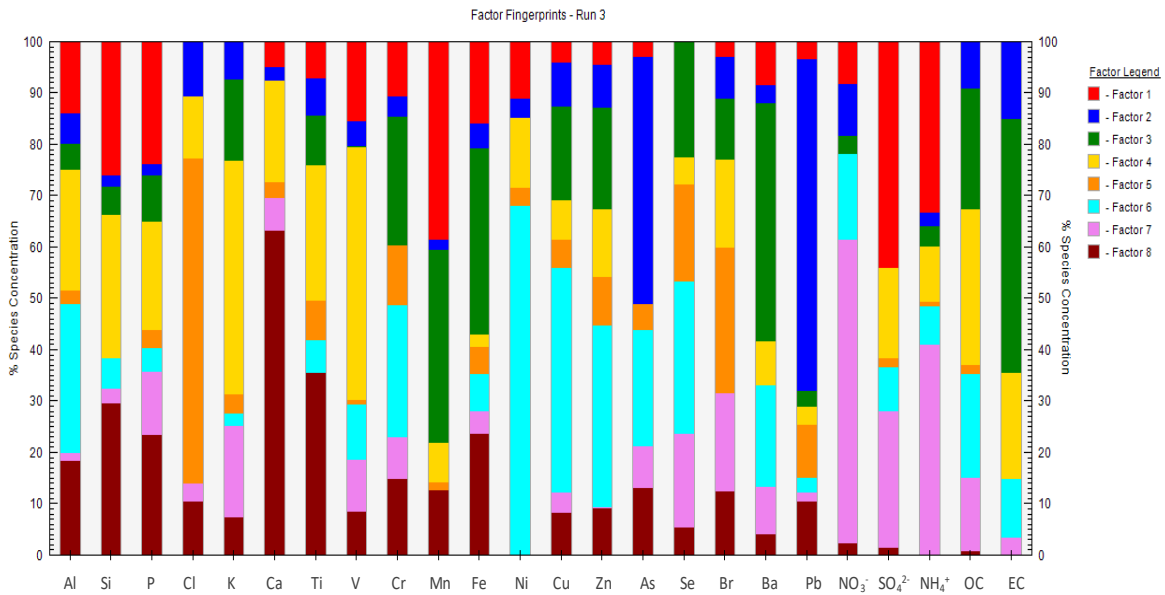


Figura 12. Perfil de composición y abundancia de las especies químicas de cada Factor. Las barras azules representan la concentración y los cuadros rojos el porcentaje de la especie química en el factor con respecto a su 100% representado en todos los factores.

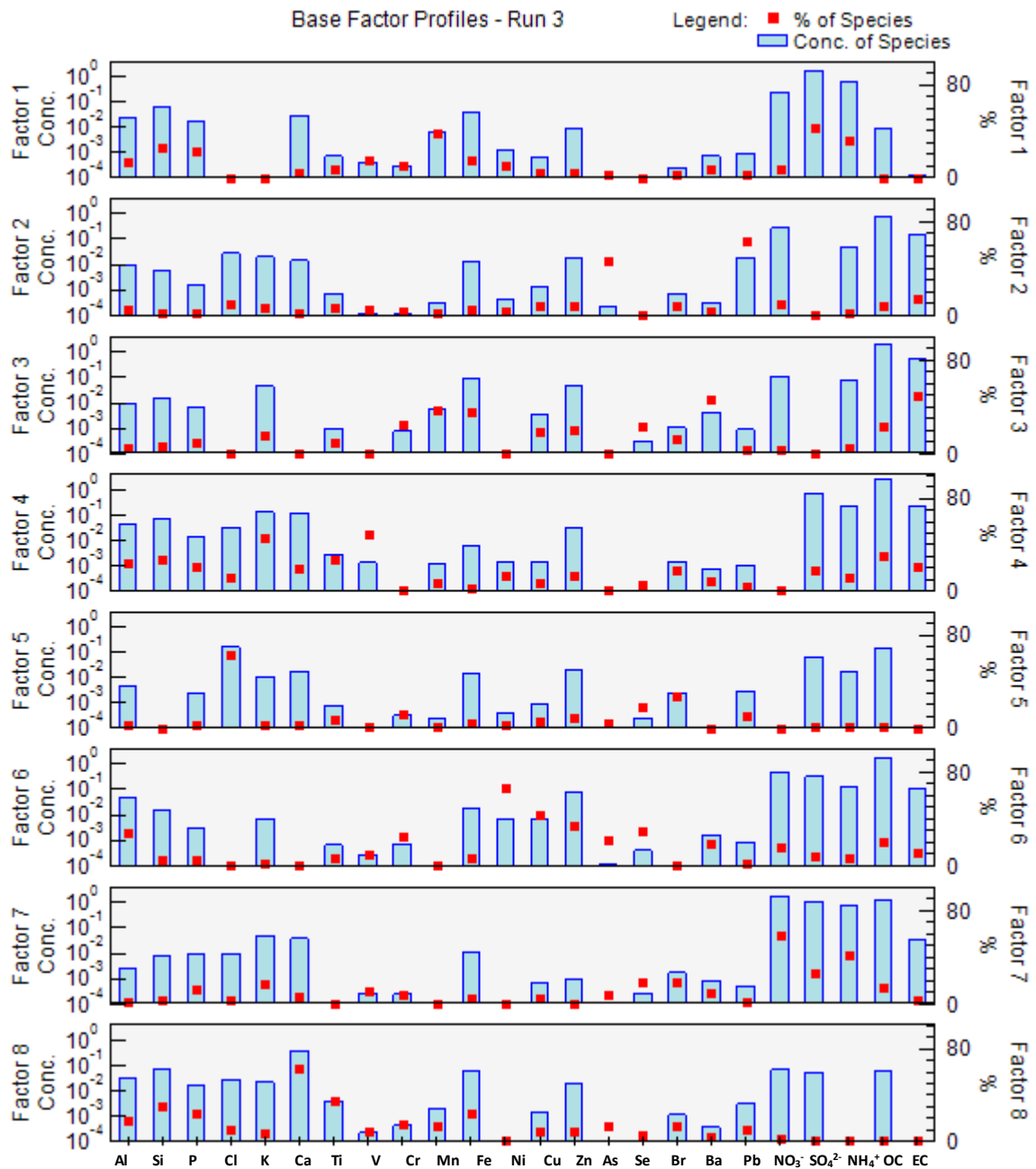


Tabla 2. Contribución de las fuentes posibles de emisión al PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey.

Fuente Potencial	Concentración	
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	%
Factor 1. Quema de diésel	2.6	13.1
Factor 2. Aporte regional (Refinería)	1.2	6.1
Factor 3. Procesos de metales 1	3.0	14.8
Factor 4. Elaboración del vidrio + Industria del Cemento	4.1	20.3
Factor 5. Quema de biomasa	0.6	3.1
Factor 6. Procesos de metales 2	3.0	14.7
Factor 7. Emisiones Vehiculares	4.9	24.1
Factor 8. Resuspensión del suelo + Pedreras	0.7	3.7
Total	20.2	100.0

En la Figura 13 se observa la contribución promedio de todo el periodo de estudio, de cada sector o fuente potencial de emisión en los sitios en donde se realizaron muestreos de partículas PM_{2.5} así mismo, se observa la distribución espacial calculada a partir de la interpolación de resultados para toda la región del Área Metropolitana de Monterrey. Es importante señalar que el aporte de las fuentes, cuando este se presenta en mayor concentración de un sitio con respecto a otros, se refiere a que es el sitio donde se origina o bien donde se acumula la emisión, debido al trasladado de masas de aire procedentes de otros lugares de la región de estudio.

El Factor 1, quema de diésel, tiene su máximo aporte en Santa Catarina con 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras los demás sitios se encuentran entre 2.5 y 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es importante señalar que en toda el Área Metropolitana hay circulación de vehículos de carga pesados que utilizan al diésel como combustible.

El Factor 2, aporte regional posible de la Refinería, las masas de aire se trasladan e impactan a zonas lejanas como Santa Catarina y en general hacia el poniente. La región oriente presentó concentraciones por debajo de 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en contraste e poniente representado por García, Santa Catarina y San Bernabé oscilaron entre 1.8 y 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es posible que ocurran fenómenos de depositación de contaminantes procedentes de la Refinería y su mayor contribución ocurre en lugares más allá de la Zona Metropolitana de Monterrey.

El Factor 3, procesos de metales 1, tiene su máxima concentración en Universidad con $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido por Santa Catarina con $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y Apodaca con $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los demás sitios se encuentran por debajo de $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aparentemente este sector no solamente está focalizado en el área circunvecina de la Universidad Autónoma de Nuevo León, sino que existen aportes de emisiones de metales de más plantas industriales de otras áreas. La contribución de este sector puede considerarse también regional.

El Factor 4, se refiere a una combinación de fuentes potenciales, tanto de la elaboración del vidrio sumada a la industria del cemento, se regionaliza también en tres secciones, del centro al oriente entre Apodaca y Cadereyta se encuentran concentraciones de 5.5 a $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, al centro en Universidad se encuentra por debajo de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y Santa Catarina y San Bernabé con valores cercanos a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

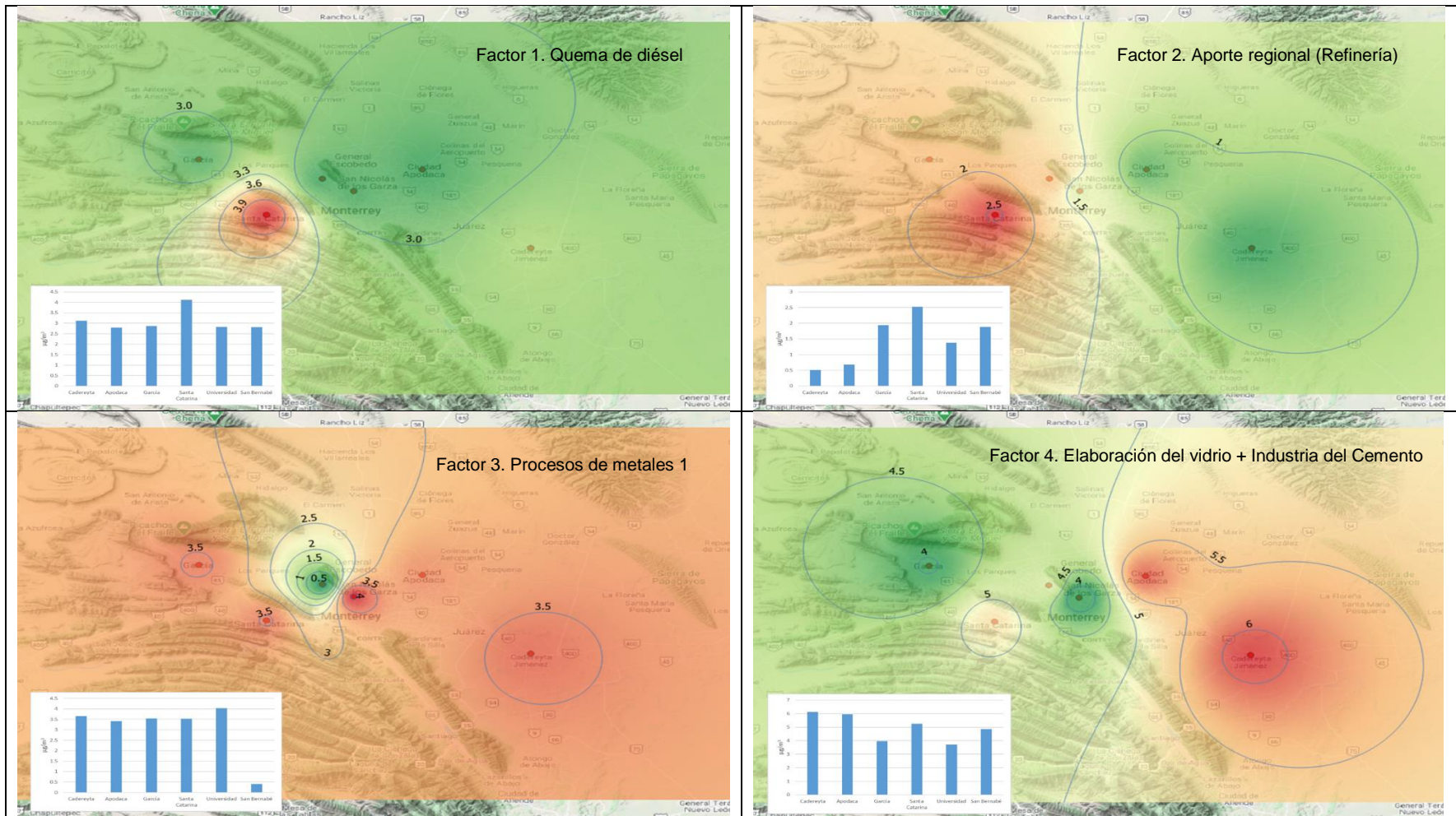
Factor 5, quema de biomasa, presenta su máximo de concentración en San Bernabé con $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de Santa Catarina con $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en los demás sitios oscilan entre 0.3 y $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

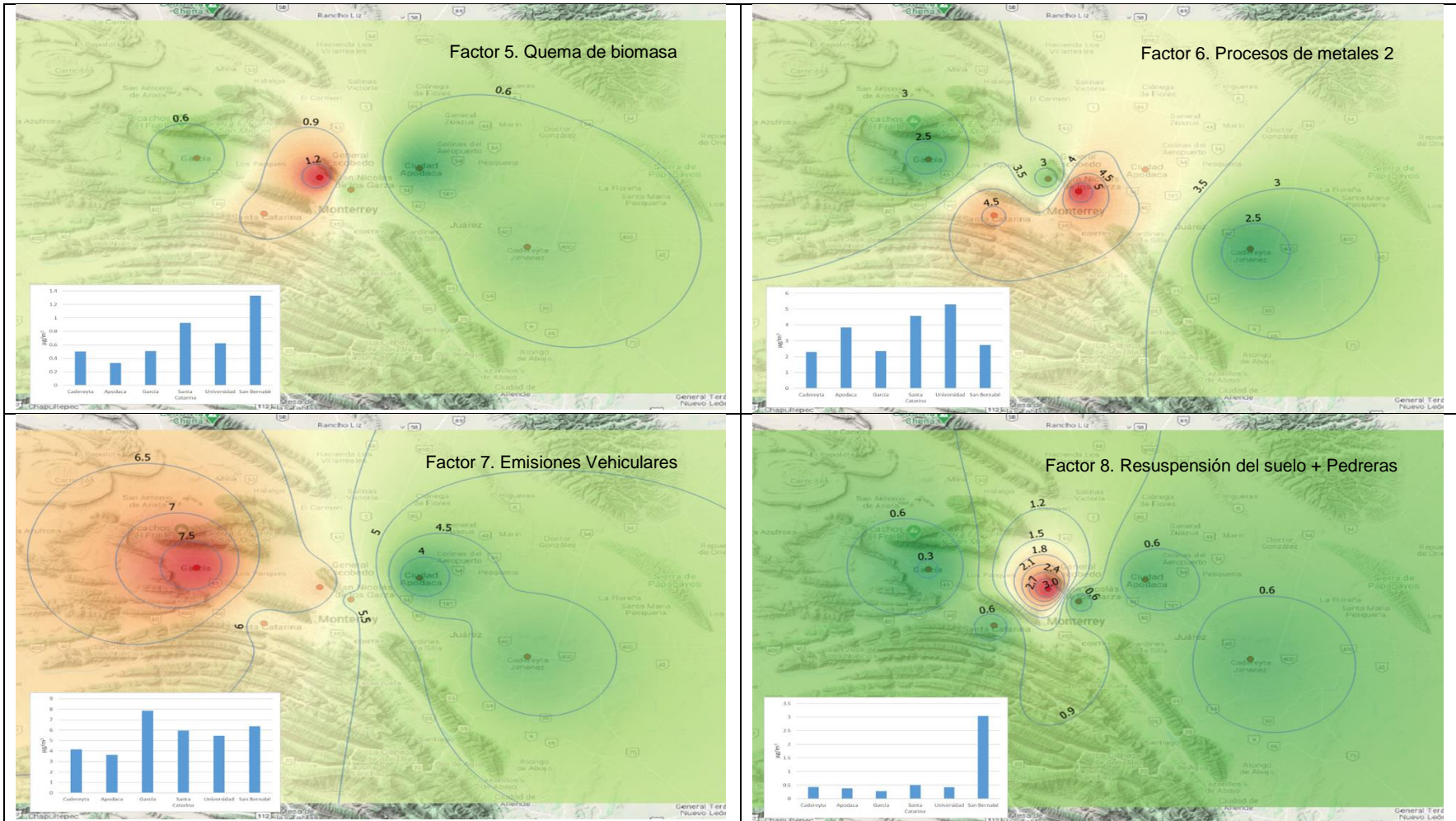
El Factor 6 atribuido a procesos de metales 2, tiene aporte entre 3.4 y $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en todos los sitios con excepción de San Bernabé que parece ser el sitio de menor impacto, en donde solo tiene poco menos de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El Factor 7, vehicular, se observa con máximas contribuciones entre 5.2 y $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en García, Santa Catarina, Universidad y San Bernabé y los sitios Cadereyta y Apodaca tienen 4 y $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El congestionamiento vial es una constante en toda la zona de estudio, más allá de las horas pico.

El Factor 8, Crustal-Pedreras contribuye con poco menos de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en todos los sitios con excepción de San Bernabé en donde alcanza los $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en donde existen áreas cercanas en las colinas en donde se practica la actividad de extracción de minerales a cielo abierto.

Figura 13. Contribución promedio de las fuentes de emisión de cada sitio de muestreo y su interpolación en el Área Metropolitana de Monterrey.





XVI Conclusiones y recomendaciones

Se cumplieron los objetivos de realizar una campaña de 10 días consecutivos para caracterizar especies químicas en $PM_{2.5}$ mediante la obtención de 60 muestras en campo, al incorporar un sitio adicional de muestreo, San Bernabé, con impacto de acumulación y transporte de contaminantes atmosféricos y recepción de actividad de las Pedreras. Los otros 5 sitios fueron Cadereyta, Apodaca, García, Santa Catarina y Universidad. Logrando con ello representatividad de la cobertura del Área Metropolitana de Monterrey, en sitios en donde se aloja una estación de monitoreo automática de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos.

De los 60 muestreos, en dos ocasiones, se excedieron los límites de $PM_{2.5}$ establecidos en la Norma Oficial Mexicana ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en los sitios de San Bernabé, Santa Catarina y García

Se logró observar como Santa Catarina alcanzó un máximo aproximado de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así mismo San Bernabé y García se vieron impactados por la resuspensión del suelo y la cercanía con colinas, en tanto que Santa Catarina, estuvo influenciado por el gran flujo vehicular derivado de la red vial en la salida hacia Saltillo.

Las especies químicas más abundantes fueron para toda la región el carbono orgánico, los iones sulfato, nitrato y amonio denotan la ocurrencia de elevada reactividad atmosférica, tanto por la conversión de gas a partícula de los óxidos de nitrógeno y azufre, así como por la formación secundaria de carbono orgánico, este último entre seis a diez veces mayor que la emisión primaria. Sin embargo, aquellos elementos traza, con menor abundancia como el Ni, Cu y Pb se exceden entre 800 y 2,000 veces por contribución antropogénica, así como el S, Zn y Br elevándose de 3 mil hasta 10 mil veces de acuerdo a los factores de enriquecimiento calculados. Estos elementos tienen impacto en la salud y en el ambiente.

En la región se han realizado diversos estudios previos desde el año de 1997 a 2014 que se compararon con este estudio de febrero de 2020. Se destaca que Ca, V y Pb han tenido tendencias en la reducción de sus concentraciones y Ni, Cu y Zn se han incrementado. Estas variaciones se atribuyen a las reformulaciones de combustibles, incremento de automóviles, posible reducción de la actividad de las pedreras, cementeras y de las industrias química y metalúrgica de la localidad.

La reconstrucción de masa basada en la composición química tuvo un 95% de correspondencia entre el modelo y las concentraciones de $PM_{2.5}$ para el total de las muestras. En este estudio contrario a la idea que se tiene que por contar Monterrey con un clima semiseco, el mayor aporte lo tiene la resuspensión del suelo, esto no lo fue para $PM_{2.5}$ durante la época del año en el que fue desarrollado este estudio, pues los máximos de composición crustal, alcanzaron el 24% y 26% en García y San Bernabé y los demás sitios estuvieron por debajo del 12% posiblemente por la influencia también de la presencia de lluvias en esta campaña. La mayor contribución es del material orgánico particulado primario y secundario, producto de la combustión de combustibles fósiles los cuales aportaron entre 29 y 46% de la composición de $PM_{2.5}$. Así mismo, otro gran contribuyente fueron las partículas secundarias inorgánicas de la conversión de los gases de óxidos de nitrógeno y azufre a sulfatos y nitratos de amonio derivados de la

combustión de automotores e industria que aportaron entre el 38 y el 47%, partículas que se formaron y trasladaron incluso a sitios potencialmente no emisores como San Bernabé.

El primer indicio de la asociación de la composición y fuentes de emisión potenciales obtenida del análisis de las muestras de PM_{2.5} se obtuvo a través de la aplicación de análisis estadístico multivariado, que mostró indicadores químicos de (1) Pedreras, (2) Actividad vehicular e industrial, (3) Uso de diésel, (4) Quema de biomasa, (5) Emisiones regionales procedentes posiblemente de la Refinería y (6). Material de resuspensión del suelo. Este método solo permitió distinguir fuentes, pero no tuvo alcances de cuantificación de los aportes al ambiente.

Lo anterior sugirió la aplicación de modelos receptores de mayor alcance y se seleccionó al modelo de Factorización Positiva de Matrices (PMF, versión 5) que es un modelo de referencia de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América ampliamente utilizado en el mundo.

Los resultados de PMF tuvieron una correspondencia entre lo modelado y lo medido del 94%, cuyos indicadores químicos sugieren como fuentes y sectores potenciales probables que aportan a las PM_{2.5} de la siguiente forma:

9. Quema de diésel, aporta el 13.1%
10. Aporte regional (Refinería), contribuye con el 6.1%
11. Procesos de metales 1, aporta con el 14.8%
12. Elaboración del vidrio + Industria del Cemento aportan con el 20.3%
13. Quema de biomasa, contribuye con el 3.1%
14. Procesos de metales 2, contribuye con el 14.7%
15. Emisiones Vehiculares, aporta el 24.1%
16. Resuspensión del suelo + Pedreras, contribuye con el 3.7%

Estos resultados sugieren tomar acciones prioritarias que han sido contempladas en el Programa de Calidad del Aire de Nuevo León vigente, como reducir y controlar las emisiones industriales principalmente de los giros químico y metalúrgico y establecer programas de reducción de emisiones vehiculares y por otro lado incorporar trampas de partículas que reduzcan la liberación de las mismas por quema de leña y carbón vegetal en locales comerciales en donde se utilice la biomasa para cocinar carnes asadas y otros alimentos.

Finalmente es importante mencionar que la dinámica de los vientos, los cambios extremos de temperatura y humedad en cortos periodos y las características orográficas de la localidad establecen una mezcla compleja de los contaminantes, de tal forma que su destino e impacto puede tener influencia a lugares más distantes del Área Metropolitana de Monterrey.

XVII Referencias

Aldape, F., Flores M. J., Díaz, R.V., Hernández-Méndez, B., Montoya Z. J.M., Blanco, E.E., Fuentes A.F., Torres-Martínez, L.M. 1999. PIXE analysis of airborne particulate matter from Monterrey Mexico. A first survey. Nuclear instruments and Methods in Physics Research B. 150: 439-444.

Almeida S.M., Pio C.A., Freitas M.C., Reis M.A., Troncoso M.A. (2006), Approaching PM_{2.5} and PM_{2.5-10} source apportionment by mass balance analysis, principal component analysis and particle size distribution, Science of The Total Environment, Volume 368, Issues 2-3, Pages 663-674, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.03.031>.

Amato F., Alastuey A., de la Rosa J., Gonzalez Castanedo Y., Sánchez de la Campa A. M., Pandolfi M., Lozano A., Contreras González J., and Querol X. (2014). Trends of road dust emissions contributions on ambient air particulate levels at rural, urban and industrial sites in southern Spain, Atmospheric Chemistry and Physics. 14, 3533-3544. <https://doi.org/10.5194/acp-14-3533-2014>.

Ashbaugh L.L., Malm W.C., Sadeh, W.Z., (1985). A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park. Atmospheric. Environment. (1967) 19 (8), 1263e1270.

Badillo Castañeda, C. T. 2012. Caracterización del Contenido de Metales en Partículas PM_{2.5} en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. 114 pp.

Baldauf R.W., Lane D.D., Marotz G.A., Wiener R.W. (2001). Performance evaluation of the portable MiniVOL particulate matter sampler. Atmospheric Environment, Volume 35, Issue 35, Pages 6087-6091. ISSN 1352-2310, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00403-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00403-4).

Baldorj B. and Sato K. (2017). Chemical Characterization of PM_{2.5} particles in Ulaanbaatar, Mongolia. EANET Research Fellowship Program. 23 pp.

Blanco-Jiménez S., Altúzar F., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M. y Benítez M.A. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 39 pp.

Bowe B., Xie Y., Yan Y. and Al-Aly Z. (2019). Burden of Cause-Specific Mortality Associated With PM_{2.5} Air Pollution in the United States. JAMA Network Open. 2(11):e1915834. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.15834>.

Čargonja M., Mekterović D., Mance D., Žauhar G., Bogdanović Radović I., Zamboni I. (2019). Characteristics of aerosol pollution in the vicinity of an oil refinery near Rijeka, Croatia. X - Ray Spectrometry. Pages 1-8. <https://doi.org/10.1002/xrs.3052>.

Cervantes J.F. y Merla G. (1995). "Geografía del Valle de Monterrey" en: Atlas de Monterrey. Coordinador Gustavo Garza. Monterrey: Gobierno del Estado de Nuevo León,

Universidad Autónoma de Nuevo León, Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León, El Colegio de México. 1995.

Chow J.C., Lowenthal D.H., Chen L.A., Wang X. and Watson J.G. (2015). Mass reconstruction methods for PM_{2.5}: a review. *Air Quality Atmospheric Health*. 8, 243–263. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0338-3>.

Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Balakrishnan K., Brunekreef B., Dandona L., Dandona R., Feigin V., Freedman G., Hubbell B., Jobling A., Kan H., Knibbs L., Liu Y., Martin R., Morawska L., Pope III C.A., Shin H., Straif K., Shaddick G., Thomas M, van Dingenen R., van Donkelaar A., Vos T., Murray C.J.L., Forouzanfar M.H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global burden of diseases study 2015. *Lancet*. 389:1907–1918.

Derwent R.G., Jenkin M.E., Passant N.R., Pilling M.J. (2007) Photochemical ozone creation potentials (POCPs) for different emission sources of organic compounds under European conditions estimated with a master chemical mechanism. *Atmospheric Environment* 41, 2570-2579.

Friedlander, S.K. (1973). Chemical element balances and identification of air pollution sources. *Environmental Science and Technology*. 7:235-40.

Gobierno del Estado de Nuevo León. (2016). Plan Estatal de Desarrollo. Capítulo 4. Economía incluyente. México.

Herrera J., Ramos A., Garcia F., Blanco S., Cardenas B., Mizohata A. (2012). Chemical composition of PM_{2.5} particles in Salamanca, Guanajuato Mexico: Source apportionment with receptor models. *Atmospheric Research*. 107. 31-41. 10.1016/j.atmosres.2011.12.010.

Herrera Murillo J., Rodriguez Roman S., Rojas Marin J.F., Campos Ramos A., Blanco Jimenez S., Cardenas Gonzalez B., Baumgardner D.G. (2013). Chemical characterization and source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the metropolitan area of Costa Rica, Central America, *Atmospheric Pollution Research*, Volume 4, Issue 2, Pages 181-190, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.5094/APR.2013.018>.

Hopke P.K. (2016) Review of receptor modeling methods for source apportionment, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66:3, 237-259, DOI: 10.1080/10962247.2016.1140693.

Hsu C., Chiang H., Chen M., Chuang C., Tsen C., Fang G., Tsai Y., Chen N., Lin T., Lin S., Chen Y. (2017). Ambient PM_{2.5} in the residential area near industrial complexes: Spatiotemporal variation, source apportionment, and health impact. *Science of the Total Environment*. Volumes 590–591. Pages 204-214. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.212>.

INEGI (2019a). Monografías Cuéntame. Clima del Estado de Nuevo León. Sitio web: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/territorio/clima.aspx?tema=me&=19>. Fecha de consulta 9 de junio del 2020.

INEGI. (2019b). Monografías Cuéntame. Número de habitantes en el Estado de Nuevo León. Sitio web: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/poblacion/?fbclid=IwAR1dNDGR O13iwFa1f0IXNhogLJngmj7I0NMFL Eqwi6VeqAc7KKsqcC5x8eM>. Tomado de la Encuesta Intercensal 2015. Fecha de consulta 9 de junio del 2020.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2019). Informe Nacional de Calidad del Aire 2018, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. México 395pp.

Jeričević A., Gašparac G., Mikulec M.M., Kumar P., Prtenjak M.T. (2019). Identification of diverse air pollution sources in a complex urban area of Croatia. *Journal of Environmental Management*. Volume 243. Pages 67-77. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.024>.

Maenhaut W. (2018). Source apportionment revisited for long-term measurements of fine aerosol trace elements at two locations in southern Norway. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. Volume 417, Pages 133-138. ISSN 0168-583X. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.07.006>.

Martínez, M. A., Caballero, P., Carrillo, O., Mendoza, A. y Mejía, G.M. 2012. Chemical characterization and factor analysis of PM_{2.5} in two sites of Monterrey, Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association* 62: 817-827.

Mateus V.L., Gonçalves I.L., Chávez R.C., Dillenburg T., Gioda A. (2013). Study of the chemical composition of particulate matter from the Rio de Janeiro metropolitan region, Brazil, by inductively coupled plasma-mass spectrometry and optical emission spectrometry, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. Volume 86. Pages 131-136. ISSN 0584-8547. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2013.03.003>.

Miller, M.S., S.K. Friedlander, and G.M. Hidy. (1972). A Chemical Element Balance for the Pasadena Aerosol, *J. Colloid Interface Sci.*, 39: 165-176.

NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de agosto de 2014.

Paatero P. (1997a). Least squares formulation of robust, nonnegative factor analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 37:23–35. doi: 10.1016/S0169-7439(96)00044-5.

Paatero P. (1997b). A weighted non-negative least-squares algorithm for three-way 'PARAFAC' factor analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 38:223–242. doi:10.1016/S0169-7439(97)00031-2.

Pernigotti D., Belis C.A., Spanó L., (2016). SPECIEUROPE: The European data base for PM source profiles. *Atmospheric Pollution Research*, 7 (2), pp. 307-314. DOI: 10.1016/j.apr.2015.10.007.

Samek L., Stegowski Z., Furman L. (2017). Chemical content and estimated sources of fine fraction of particulate matter collected in Krakow. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 10, 47–52. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0407-2>.

Secretaría de Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Nuevo León. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Nuevo León (2016). Proaire 2016-2025. México 249 pp.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). Inventario Nacional de Emisiones. Año base 2016. México. Página electrónica <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>. Consultado el 15 de mayo de 2020.

Seposito X., Ueda K, Park S.S-, Sudo K., Takemura T. and Nakajima T. (2019). Effect of global atmospheric aerosol emission change on PM_{2.5}-related health impacts, *Global Health Action*, 12:1, 1664130. <https://doi.org/10.1080/16549716.2019.1664130>.

Summak G., Ozdemir H., Oruc I., Kuzu L., Saral A. and Demir G. (2018). Statistical evaluation and predicting the possible sources of particulate matter in a Mediterranean metropolitan city. *Global NEST Journal*, Vol 20, No 2, pp 173-180.

U.S. Environmental Protection Agency. (2014a). Receptor modeling, positive matrix factorization. <http://www.epa.gov/head/research/pmf.html>.

U.S. Environmental Protection Agency. (2014b), EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide. Available at <http://www.epa.gov/head/documents/EPA%20PMF%205.0%20User%20Guide.pdf>.

U.S. Environmental Protection Agency. (2019). Database SPECIATE 5.0. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-0>.

Viana M., Querol X., Alastuey A., Gil JI., Menéndez M. (2006). Identification of PM sources by principal component analysis (PCA) coupled with wind direction data. *Chemosphere*. 65(11):2411 - 2418. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.04.060.

Viana M., Kuhlbusch T. A. J., Querol X., Alastuey A., Harrison R. M., Hopke P. K., Hitenberger R. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *Journal of Aerosol Science*, 39(10), 827–849. doi:10.1016/j.jaerosci.2008.05.007.

Watson, J.G. (1979). Chemical element balance receptor model methodology for assessing the sources of fine and total particulate matter in Portland, Oregon. Ph.D. Oregon Graduate Center, Beaverton, OR.

WHO. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Geneva (Switzerland): WHO.

Zhaochu Hu and Shan Gao. (2008). Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update, *Chemical Geology*, Volume 253, Issues 3–4, Pages 205-221, ISSN 0009-2541, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.010>.

XVIII Anexos

Anexo 1. Selección de sitios para el muestreo de $PM_{2.5}$

Anexo 2. Plan de Muestreo de $PM_{2.5}$ en el AMM

Anexo 3. Informe de Muestreo de $PM_{2.5}$ en el AMM

Anexo 4. Tabla de Resultados de Laboratorio



Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.

Paseo de los Laureles No 458 Int. 406

Col. Bosques de las Lomas

C.P. 05120

México, D.F.

T: (+55) 9177.1670

F: (+55) 9177.1690

www.centromariomolina.org

Twitter: @CentroMMolina

Facebook.com/CentroMarioMolina

