Evaluación de Partículas Suspendidas $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental

Junio 2015

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530. Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

DIRECTORIO

Dra. María Amparo Martínez Arroyo
Directora General del INECC

Dr. J. Víctor Hugo Paramo Figueroa
Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

Dr. Arturo Gavilán García
Director de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas Productos y Residuos

COORDINADORES

Biól. Salvador Blanco Jiménez
Subdirector de Investigación sobre Contaminantes Atmosféricos

Dr. Akira Mizohata
Profesor-Investigador de la Universidad de la Prefectura de Osaka, Japón

ELABORACIÓN

Biól. Salvador Blanco Jiménez
Subdirector de Investigación sobre Contaminantes Atmosféricos

M.C. Faviola Altúzar Villatoro
Jefe de Departamento de Rastreo e Identificación de Riesgos de las Sustancias Químicas en el Ambiente

TRABAJOS DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

Biól. Salvador Blanco Jiménez
Subdirector de Investigación de Contaminantes Atmosféricos

Ing. Gabriel Aguilar Noguez
Especialista adjunto de análisis de gravimetría de partículas suspendidas

Ing. Becki Jiménez Gatica
Técnico de laboratorio de calibración y transferencia de estándares

Dra. María de los Ángeles Benítez Macías
Jefe de Departamento de Caracterización Básica y Biotoxicidad de Contaminantes

Q.F.B. Marisela Pablo Santiago
Profesional Ejecutivo

COLABORACIÓN

Dr. Alberto Mendoza
Profesor-Investigador del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Dra. Nora Elizondo Villarreal
Profesora-Investigadora de la Universidad Autónoma de Nuevo León

LF. J. Heriberto Vélez Garza
Universidad Autónoma de Nuevo León

AGRADECIMIENTOS

Ing. Armandina Valdez Cavazos
Dirección de Cambio Climático, Calidad del Aire y RETC
Secretaría de Desarrollo Sustentable.
Gobierno del Estado de Nuevo León

Japanese International Cooperation Agency (JICA)
Joint Research Project on Formation Mechanism of Ozone
VOCs and $PM_{2.5}$ & Proposal of Countermeasure Scenario

Citar este reporte como:
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. 34 pp.

D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Periférico Sur 5000. Col Insurgentes Cuicuilco
C. P. 04530. Delegación Coyoacán, México D. F.
http://www.inecc.gob.mx

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 7

1.1 Generalidades del área de estudio 9

1.2 Antecedentes 10

2 OBJETIVOS 13

2.1 Objetivo General 13

2.2 Objetivo Específico 13

3. **MUESTREO Y ANÁLISIS QUÍMICOS 13**

3.1 Muestreo de partículas suspendidas 13

3.2 Caracterización Analítica 15

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 18

4.1 Resultados de la campaña con los muestreadores Minivol (Octubre – Diciembre 2014) 18

4.1.1 Composición Química 18

4.2 Resultados de la campaña con el muestreador Slit Jet Air Sampler (Diciembre 2014 – Marzo 2015) 21

4.2.1 Composición Química 21

4.3 Reconstrucción de masa 22

5. BIBLIOGRAFÍA 26

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para contaminantes criterio de acuerdo a la normatividad mexicana. 12

Tabla 2. Comparación de la composición elemental de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en diversas investigaciones, de elementos mayoritarios. 20

Tabla 3. Comparación de la composición elemental de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en diversas investigaciones, de elementos de metales pesados y bromo 20

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área Metropolitana de Monterrey. Estaciones del Sistema de Monitoreo Ambiental. 10

Figura 2. Resultados del Inventario de emisiones del AMM, año base 2005. 11

Figura 3. Fuentes de PM_{10} y $PM_{2.5}$ de acuerdo al Inventario de Emisiones del AMM, año base 2005.11

Figura 4. Distribución espacial de la concentración de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey. 19

Figura 5. Tendencias de PM_{10} y $PM_{2.5}$ colectados con equipo Slit Jet Air sampler de mediano flujo, colocado en el Centro de Monterrey, del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015 21

Figura 6. Composición elemental de las fracciones gruesa (>2.5<10 µm) y fina (<2.5 µm) de los muestreos de PM_{10} con equipo Slit Jet Air Sampler, localizado en Obispado del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015..... 22

Figura 7. Masa reconstruida de la composición química de las partículas finas respirables colectadas con equipo Slit Jet Air Sampler, en Obispado del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015. ... 23

Figura 8. Reconstrucción de masa obtenidos de la composición de las partículas $PM_{2.5}$ de muestreos con Minivol de octubre a diciembre de 2014 25

1. INTRODUCCIÓN

La materia particulada (PM, por sus siglas en inglés) presente en la atmósfera, es un conjunto de sustancias en estado sólido y líquido, que se encuentra suspendida en el aire o bien, que se depositan en la superficie muy lentamente cuando éstas alcanzan un diámetro mayor. Algunos ejemplos de materia particulada son el hollín, los aerosoles, la arena, el polvo, etc. [Gallego et al. 2012].

Las partículas suspendidas totales presentan una distribución de tamaños que van desde 0.005 hasta 100 µm, aunque la mayoría tienen un tamaño menor a 40 micras. Desde el punto de vista epidemiológico, aquellas partículas con diámetros menores a 10 µm (PM_{10}) conforman la fracción inhalable, la cual se divide en fracción gruesa (diámetros entre 2.5 y 10 µm), fina (diámetros menores a 2.5 µm, $PM_{2.5}$) y ultrafina (diámetros menores a 1 µm) [González-Santiago et al., 2011; Badillo, 2012; Gallego et al. 2012].

Con respecto a las fuentes de emisión, las partículas primarias de $PM_{2.5}$ pueden tener su origen en fuentes naturales como las sales marinas, la erosión y resuspensión del suelo, incendios naturales, actividad volcánica y material biológico (fragmentos de plantas, microorganismos, polen, etc.). o bien provenir de fuentes antropogénicas, entre ellas, la quema de biomasa, combustión incompleta de combustibles fósiles, polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, actividades agrícolas, de construcción, procesos industriales, procesos metalúrgicos, etc. [Manzanares et al., 2011; Pöschl, 2005]. Por otro lado, las partículas secundarias pueden generarse a través de los procesos de formación que incluyen la condensación de gases de baja presión de vapor en la superficie de las partículas existentes, la coagulación de partículas pequeñas, reacción de gases en o sobre las partículas, evaporación de neblina y gotas de agua en las que los gases se han disuelto y reaccionado [Manzanares et al., 2011; Garreaud et al., 2006].

Una vez liberadas al ambiente, las $PM_{2.5}$ pueden ser transportadas desde cientos a miles de kilómetros de la fuente de emisión y permanecer en la atmósfera durante días a semanas, hasta que sean removidas por deposición seca o húmeda. La deposición seca se produce cuando las partículas transportadas por el viento inciden sobre una superficie y se depositan sobre ella. En cuanto a la deposición húmeda, la precipitación recoge las partículas de la atmósfera y las transporta hasta la superficie terrestre, o bien, con la incorporación de partículas atmosféricas y gases en las gotas que forman las nubes y con la subsecuente remoción de la atmósfera como lluvia o nieve [Manzanares et al., 2011; Garreaud, et al., 2006].

La composición química de las partículas es muy diversa y depende, principalmente de la fuente emisora y del mecanismo de formación de las partículas. En términos generales se divide en fracción orgánica e inorgánica. La fracción orgánica contiene cientos o miles de compuestos dentro de los que se encuentran el carbono elemental, carbón orgánico (que comprende los compuestos orgánicos tanto primarios como secundarios que son resultado de la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles) y material biológico que incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y metales térreos [Badillo, 2012; Mancilla et al., 2014; Manzanares et al., 2011].

Efectos a la salud y al ambiente

Se considera que las $PM_{2.5}$ son las más nocivas para la salud humana, ya que pueden penetrar directamente a los alveolos. Afecta principalmente al sistema respiratorio y cardiovascular, incrementando el riesgo de una embolia o un infarto, o bien provocando la aceleración de la aterosclerosis (endurecimiento de las arterias) cuando hay una exposición crónica a este contaminante [Manzanares et al., 2011; Gallego et al., 2012]. De hecho, las $PM_{2.5}$ ocupan el noveno lugar en la lista de los factores de riesgo asociados con los índices de mortalidad a nivel mundial, principalmente por enfermedades cardiovasculares [López y Pérez, 2014]. Así mismo, se ha identificado que los compuestos orgánicos presentes en las partículas tienen posibles efectos mutagénicos y carcinogénicos [Mancilla et al., 2014].

Se ha reportado que las concentraciones de este contaminante en un intervalo de 11 a 29.6 $\mu g/m^3$, están relacionadas con morbilidad y mortalidad en ambientes urbanos [Martínez et al., 2012].

Por otra parte, en cuanto a los efectos al ambiente, se sabe que cuando las partículas se depositan en la superficie terrestre, pueden provocar una serie de daños debido a todos los compuestos asociados a las partículas. Por ejemplo, se ha observado una reducción en la fotosíntesis, cambios en la salinidad del suelo, reducción del crecimiento, disminución de los procesos reproductivos, reducción de la presencia de microorganismos, entre otros [Manzanares et al., 2011].

Además, se ha reportado que durante su permanencia en la atmósfera, las partículas provocan la disminución de la visibilidad, además de impactar en el cambio climático, mediante la dispersión y absorción de radiación infrarroja y térmica o por la modificación de las propiedades de la nubosidad. Los efectos radiativos de las partículas se producen de dos formas: el efecto directo, por el que las partículas dispersan y absorben radiación infrarroja solar y térmica, y el efecto indirecto, en el que las partículas modifican las propiedades de la nubosidad [Manzanares et al., 2011].

El efecto directo es mostrado por los sulfatos, los nitratos y el carbón orgánico, ya que éstos pueden reflejar la radiación solar incidente y dar lugar a un efecto de enfriamiento. Sin embargo, otros componentes de las partículas, como el hollín (carbono negro), pueden absorber la radiación solar y contribuir de esta forma al calentamiento. Ambos efectos afectan al balance radiativo global y se cuantifican a través del término “forzamiento radiativo”, el cual se define como la medida de la influencia que un factor ejerce en la modificación del equilibrio entre la energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera.

Respecto a los efectos indirectos, se ha observado que las partículas actúan como núcleos de condensación, en los que el vapor de agua puede acumularse durante la formación de las nubes. Cualquier cambio en la concentración o en las propiedades higroscópicas de tales partículas puede modificar las propiedades radiativas y físicas de las nubes en dos formas principalmente: en la luminosidad de la nube y en la probabilidad e intensidad con la cual una nube se precipita. Por otro lado, se cree que la absorción de la radiación solar por las partículas contribuye a la reducción del nublado, proceso referido como un efecto semidirecto derivado de la presencia de las partículas en la atmósfera. Esta reducción ocurre porque la radiación que absorben las partículas calienta la

atmósfera, lo cual cambia la estabilidad atmosférica y reduce el flujo solar en la superficie [Manzanares et al., 2011].

En conclusión, las partículas aumentan la reflectancia del planeta, lo que reduce la cantidad de luz solar que llega a la superficie de la Tierra, produciendo un efecto de enfriamiento, así como una redistribución de la energía que está en la atmósfera. Estos efectos pueden alterar la circulación atmosférica y el ciclo del agua, así como los patrones de precipitación a todas las escalas [Manzanares et al., 2011].

Dado el impacto que estos contaminantes tienen sobre el ambiente y la salud humana, el Gobierno Mexicano mediante el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en colaboración con el Gobierno de Japón, a través de la Universidad de Ehime y la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón, se desarrolla desde 2011 y hasta 2015 el "Proyecto de Investigación conjunta sobre los mecanismos de formación de ozono, compuestos orgánicos volátiles y $PM_{2.5}$ y propuesta de escenarios de medidas para su control", enfocado en las tres principales zonas metropolitanas del país: la del Valle de México, Guadalajara y Monterrey.

En este informe se abordan los resultados obtenidos a partir del monitoreo y caracterización química de una campaña corta de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), en el periodo de octubre de 2014 a marzo de 2015.

1.1 Generalidades del área de estudio

El Área Metropolitana de Monterrey se encuentra ubicada en el noreste del país y es el tercer centro urbano más grande de México [Martínez et al., 2012]. Cuenta con una población de 4, 414,800 habitantes de acuerdo a las proyecciones del Consejo Nacional de Población para 2014 [CONAPO, 2014], la cual es casi el 87% de la población estatal. Está conformada por los municipios de Apodaca, Cadereyta Jiménez, Carmen, García, Gral. Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Santiago. Cuenta con una superficie de 6,794 Km^2 y una altitud de 540 msnm [INEGI, 2014]. El AMM está rodeado por la Sierra Madre Oriental, el Cerro de la Silla, el Cerro de las Mitras y el Cerro del Topo Chico (Figura 1), las cuales constituyen una barrera física natural para la circulación del viento e impiden el desalojo del aire contaminado hacia el exterior de la zona [PROAIRE 2008-2012].

De acuerdo al Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León 2014, la temperatura media anual registrada por la estación de la Comisión Nacional del Agua ubicada en Monterrey es de 22.3°C [INEGI, 2014]. En agosto se alcanzan temperaturas promedio de hasta 28.4°C, mientras que en enero la temperatura promedio es de 14.6°C. La precipitación anual promedio de 583.2 mm.

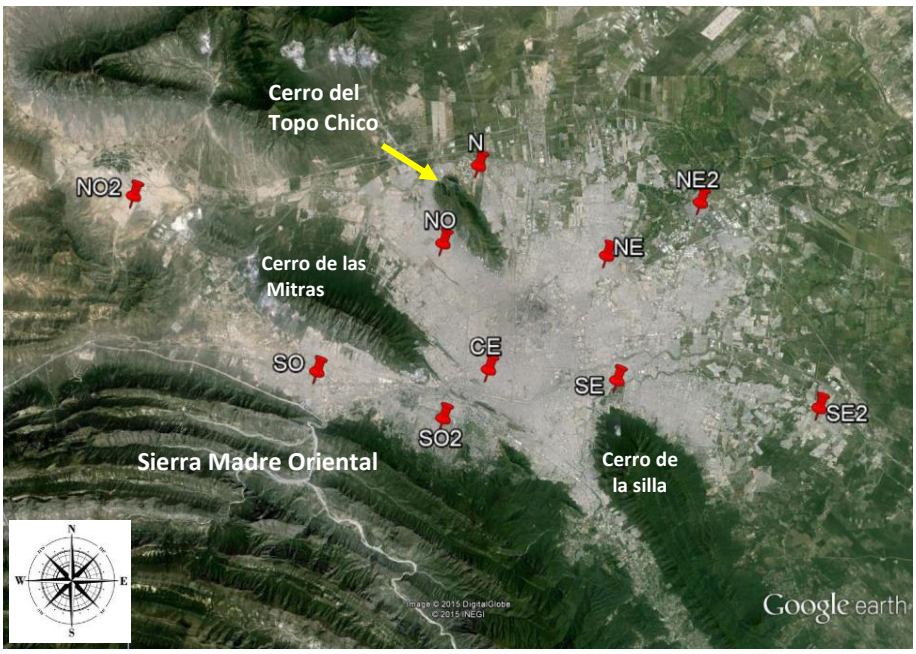

Figura 1. Área Metropolitana de Monterrey. Estaciones del Sistema de Monitoreo Ambiental. Fuente: Elaboración propia con datos de INECC, 2015.

Con respecto al parque vehicular, el AMM tiene registrados un poco más de dos millones de vehículos de motor en circulación, de los cuales, el 73.4% corresponden a automóviles tanto de uso oficial, público y particular, seguido por el 23% de camiones y camionetas de carga. En menor proporción se encuentran los camiones de pasajeros (0.8%) y las motocicletas (2.6%). [INEGI, 2014].

El AMM se caracteriza por su alta actividad industrial. En 2013, 348 establecimientos industriales, reportaron al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de competencia federal, siendo el sector químico y el metalúrgico los de mayor representación (58 y 50 empresas, respectivamente) [RETC, 2015]. Por otra parte, el PROAIRE 2008-2012, menciona que las principales industrias en la región son la siderúrgica, la fabricación de maquinaria, artículos metálicos, automotriz, celulosa y papel, vidrio, barro, loza, cerámica, textil, cemento, eléctrica, electrónica, entre otras.

1.2 Antecedentes

El AMM cuenta con un inventario de emisiones de contaminantes criterio, Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}), Partículas menores a 2.5micrómetros $PM_{2.5}$, Monóxido de Carbono (CO), Bióxido de Azufre (SO_2) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y gases precursores con año base 2005, donde se identifican las principales fuentes de emisión, clasificadas en: fijas, de área, móviles, móviles no carreteras y naturales. De acuerdo a este inventario, en el año de estudio se emitieron 910,461.5 ton de estos contaminantes, de las cuales el 56% corresponde al CO, seguido por el material particulado con el 17%, los compuestos orgánicos totales (COT) con el 13% y finalmente el SO_2 y los NO_x con un 7% cada uno (Figura 2) [PROAIRE 2008-2012].

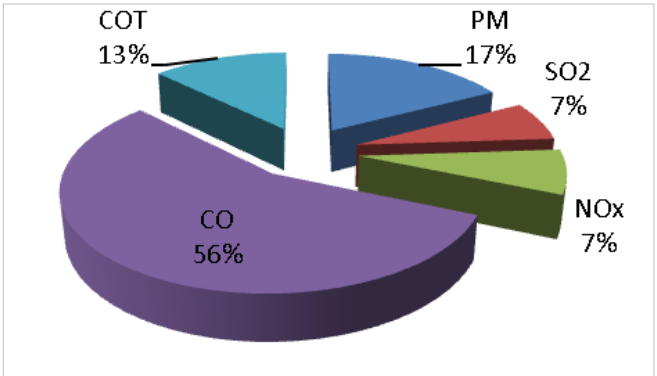

Figura 2. Resultados del Inventario de emisiones del AMM, año base 2005.
Fuente: Elaboración propia con datos de [PROAIRE 2008-2012]

Con respecto a la materia particulada, de las 157,761 toneladas emitidas, el 40% corresponde a PM_{10} y el 12% a $PM_{2.5}$, siendo las fuentes de área las más importantes (Figura 3). Cabe mencionar que en este tipo de fuente, están incluidos los establecimientos industriales y comerciales de diversos giros, así como las actividades de servicios y domésticas cuyas emisiones se estiman en forma colectiva [PROAIRE 2008-2012].

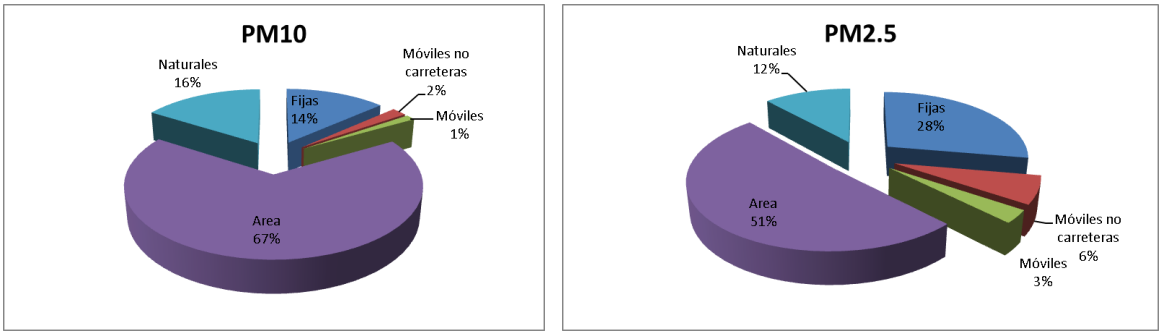

Figura 3. Fuentes de PM_{10} y $PM_{2.5}$ de acuerdo al Inventario de Emisiones del AMM, año base 2005.
Fuente: Elaboración propia con información de [PROAIRE 2008-2012].

Otra fuente de información sobre los niveles de contaminantes criterio en el AMM, es el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) que opera desde 1992. Actualmente, está conformado por 10 estaciones automáticas ubicadas en puntos estratégicos (Figura 1) con el fin de contar con datos homogeneizados de la calidad del aire. Cada una de ellas monitorea tanto contaminantes criterio (PM_{10}, $PM_{2.5}$, ozono (O_3), CO, SO_2 y NO_2) así como parámetros meteorológicos, entre ellos la temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento [INECC, 2015].

Cabe mencionar que al inicio de su operación, el SIMA estaba conformado por 5 estaciones: SO-Santa Catarina, NO-San Bernabé, CE-Obispado, NE-San Nicolás y SE-La Pastora. Posteriormente, en 2009 se incluyeron las estaciones de NO2-García y N-Escobedo, para 2011 se incorporó la estación NE2 en Apodaca; en 2012, la estación SE2-Juárez y por último la estación SO2-San Pedro [INECC, 2015].

Respecto a la variación estacional en el AMM se encontró que las mayores concentraciones de casi todos los contaminantes se presentan en los meses fríos, probablemente debido al aumento en la actividad vehicular por las fiestas de fin de año y a la presencia de inversiones térmicas que impiden

la dispersión de los contaminantes; mientras que los niveles más bajos se registran durante la época de lluvias por la retención y arrastre en las gotas de lluvia. Sin embargo, para el ozono, no se observó un patrón claro de comportamiento [Benítez et al., 2014; González-Santiago et al., 2011; Tzintzun et al., 2011].

Se ha observado una variación horaria de PM_{10} en el AMM, ya que la concentración aumenta durante las primeras horas de la mañana, la cual atribuyen al inicio de las actividades antropogénicas [Benítez et al., 2014], aunque también se menciona una contribución de las variables meteorológicas, como la inversión térmica, la cual durante los meses de noviembre a febrero tiene una profundidad de 1000 m, en octubre y marzo la profundidad es de aproximadamente de 300 m, mientras que de abril a septiembre la inversión es bastante baja o nula [González-Santiago et al., 2011].

Los promedios anuales de las concentraciones registradas de material particulado en el AMM por el SIMA, se encuentran en el intervalo de 27.66 a 35.34 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ en el periodo 2003-2007 [Martínez et al., 2012], mientras que para PM_{10}, de acuerdo al análisis de Benítez et al., 2014 realizado para el periodo de 2000 a 2011, se registraron promedios anuales mayores a 40 $\mu g/m^3$; ambos por encima de los valores máximos permisibles de acuerdo a la normatividad mexicana (Tabla 1).

A partir de la información revisada en este capítulo, se destaca que en el AMM se cumplen los criterios de calidad de aire para CO, NO_2 y SO_2 de acuerdo a las normas oficiales mexicanas (Tabla 1), pero no para el caso de O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$ [Alfaro-Barbosa et al., 2008; INEGI, 2014; Martínez et al., 2012; Menchaca y Mendoza, 2014; PROAIRE 2008-2012].

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para contaminantes criterio de acuerdo a la normatividad mexicana.

Norma Oficial Mexicana	**Contaminante**	**Límite Máximo Permisible**			
		Promedio móvil de 8 h 1 vez al año	**Promedio anual**	**Promedio de 24 h**	**Promedio 1 h una vez al año**
NOM-025-SSA1-2014	PM_{10}	----	40 $\mu g/m^3$	75 $\mu g/m^3$	----
NOM-025-SSA1-2014	$PM_{2.5}$	----	12 $\mu g/m^3$	45 $\mu g/m^3$	----
NOM-020-SSA1-2014	Ozono	0.070 ppm	----	0.095 ppm	----
NOM-021-SSA1-1993	CO	12.595 $\mu g/m^3$ (11 ppm)	----	----	----
NOM-022-SSA1-2010	SO_2	----	66 $\mu g/m^3$ (0.110 ppm)	288 $\mu g/m^3$ (0.025 ppm)	----
NOM-023-SSA1-1993	NO_2	----	----	----	395 $\mu g/m^3$ (0.21 ppm)

Fuente: Elaboración propia con datos de las NOM mencionadas.

A pesar de que la materia particulada es uno de los contaminantes de mayor preocupación en el AMM, aún son pocos los estudios que se han realizado al respecto que contemplan la caracterización química de las partículas suspendidas y ninguno aborda la variación espacial y temporal con información contundente sobre las fuentes potenciales de emisión. Por lo tanto, se hace necesario contar con la información que permita la implementación de medidas de control

efectivas para reducir las emisiones y los precursores de estas partículas para solucionar el problema de una manera efectiva. El presente estudio expone en parte estas consideraciones.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar y cuantificar los componentes químicos presentes en las partículas $PM_{2.5}$, en sitios seleccionados del Área Metropolitana de Monterrey y su asociación con fuentes de emisión potenciales.

2.2 Objetivo Específico

Implementar una campaña de medición de octubre de 2014 a marzo de 2014, para caracterizar la composición química de $PM_{2.5}$, de iones, carbono y elementos ligeros y pesados, que permita distinguir las fuentes potenciales de emisión a través de la reconstrucción química de la masa colectada.

3. MUESTREO Y ANÁLISIS QUÍMICOS

3.1 Muestreo de partículas suspendidas

El personal de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC en colaboración con el Sistema de Monitoreo Ambiental del Gobierno del Estado de Nuevo León, el Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) realizaron la campaña de medición y sus componentes.

Se llevó a cabo una semana de capacitación del 12 al 19 de octubre de 2014, sobre la instalación y operación de los equipos de muestreo, así como del manejo adecuado de las muestras durante su transporte y almacenamiento. Además, se estableció la logística del envío programado en condiciones de refrigeración para su análisis en los Laboratorios del INECC. El programa y actividades de muestreo se describen en el Anexo 1.

Sitios de muestreo

Inicialmente, se eligieron tres sitios de la red de monitoreo del SIMA: Santa Catarina, San Bernabé y San Nicolás, de acuerdo a los datos históricos de concentración de partículas de 2000 a 2009, que muestran que estos sitios frecuentemente presentan concentraciones elevadas de partículas

suspendidas. Además se buscó representatividad geográfica, ya que estos sitios se encuentran ubicados al Suroeste, Noroeste y Noreste, respectivamente.

Sin embargo, gracias a la respuesta de colaboración del Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas de la UANL y del ITESM, se agregaron los sitios de Obispado, La Pastora y Ciudad Universitaria, ampliando la cobertura espacial de este estudio, incluyendo el Centro y Sureste de la región.

Muestreadores

En este estudio se utilizaron muestreadores de bajo volumen en el periodo de octubre a diciembre de 2014 y de flujo intermedio durante diciembre de 2014 a marzo de 2015. Las condiciones de muestreo se describen a continuación.

Muestreadores de bajo volumen

La colección de muestras se realizó en muestreadores de bajo volumen Minivol, marca Airmetrics, a un flujo de 5 litros por minuto, durante 48 horas continuas, con el fin de obtener mayor cantidad de masa y con ello asegurar concentraciones por arriba del límite de detección de las especies químicas en estudio.

En cada sitio se colocaron dos muestreadores: uno con filtro de teflón de 47 milímetros de diámetro, usado posteriormente para la determinación de masa, caracterización elemental por Fluorescencia de Rayos X y carbón por método óptico; y otro con dos filtros de cuarzo del mismo diámetro para caracterizar la composición de iones.

Con estos equipos, se realizaron dos campañas, la primera de una semana en los sitios de Santa Catarina, San Bernabé y San Nicolás, del 12 al 19 de octubre de 2014, con el objetivo de instalar los equipos y capacitar al personal del SIMA y de la UANL en el manejo de la muestra y utilización de equipos. En este periodo, el muestreo iniciaba a las 11:00 h ± 1 h cada 48 horas a partir del lunes 13 de octubre (Anexo 1).

La segunda campaña sistemática de mediano plazo se llevó a cabo del viernes 24 de octubre de 2014 hasta el 18 de diciembre, con una frecuencia de cada seis días, una duración del muestreo de 48 horas, en los 6 sitios mencionados en párrafos anteriores. Es importante señalar que el sitio Ciudad Universitaria continuó hasta marzo de 2015, obteniéndose 13 muestras más.

Muestreadores de flujo intermedio

Además de los equipos Minivol, se utilizó un muestreador Slit Jet Air Sampler, de diseño japonés que operó a 30 litros por minuto por periodos de 24 horas. Este instrumento cuenta con dos cabezales independientes que fraccionan el ingreso de partículas por su tamaño, en menores o iguales a 2.5 µm de diámetro y en mayores a 2.5 y menores a 10 µm. En una línea de succión se colocaron filtros de teflón y en la otra, filtros de cuarzo.

Este equipo se instaló el 16 de diciembre de 2014 en el Centro del AMM en la estación Obispado del SIMA con adecuadas condiciones de seguridad y acceso; una vez que el INECC confirmó la correcta operación de este equipo en sus laboratorios.

Se capacitó en la operación de este equipo a personal del Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas de la UANL.

El programa de muestreo se desarrolló del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015 con una frecuencia de cada tres días por periodos de 24 horas como se describen las actividades realizadas en el Anexo 1.

3.2 Caracterización Analítica

Determinación Gravimétrica

Para la cuantificación de la masa, las muestras colectadas en los filtros de teflón de ambos equipos, se analizaron mediante gravimetría para determinar la concentración de las 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 (CAHN C-35, con una resolución mínima de 1.0 µg, incertidumbre de ± 0.005 mg, precisión de 1.0 µg y exactitud de 0.0012%) según procedimiento interno para bajo volumen (PT-APF-01). El método y procedimiento en laboratorio incluyó lo siguiente: (1) acondicionamiento durante 24 horas antes y después del muestreo a condiciones controladas de temperatura de 22ºC (±3ºC) y humedad relativa de 40% (±5%); (2) uso de ionizador de aire y tapete específicos para eliminar las cargas electrostáticas en el manejo de los filtros; (3) calibración del equipo (efectuada por un laboratorio acreditado), verificación con pesas calibradas trazables E1 y verificación con pesas calibradas de trabajo en cada sesión de pesaje. Se utilizó el 5% de los filtros como blancos de laboratorio. Una vez que se calculó la masa neta se relacionó con el volumen de muestreo para obtener la concentración de partículas.

Determinación de compuestos inorgánicos secundarios, aniones y cationes

Se cuantificaron los aniones: fluoruro, cloruro, nitrito, sulfato, bromuro, nitrato y fosfato y seis cationes: litio, sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio.

Las especies químicas de aniones y cationes fueron extraídas de los filtros de cuarzo muestreados, con agua desionizada mediante sonicación por 60 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente las muestras se agitaron en un cuarto frío a 4°C por 12 horas; a 100 revoluciones por minuto.

Las muestras, los blancos de método y blancos adicionados fueron filtrados por medio de acrodiscos de 0.2 μm de tamaño de poro.

Se realizó una segunda extracción bajo el mismo procedimiento, con el objetivo de recuperar un porcentaje adicional (5-8%) al 90% del analito recuperado en la primera extracción, que sumados se obtiene una recuperación aproximada del 95% de la muestra.

El 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, basado en los métodos analíticos para aniones EPA 9056A y para cationes ASTM 6919, bajo el procedimiento interno de análisis establecido en los Laboratorios de PT-CLAR-003 e INECC PT-CLAR-004, respectivamente.

Para el análisis de aniones se utilizó una fase móvil de bicarbonato de sodio y de carbonato de sodio a 3 miliMolar y para el análisis de cationes la fase móvil de ácido Metansulfónico de 20 miliMolar.

Los resultados fueron obtenidos a partir de curvas de calibración expresados en µg/mL y referenciados a µg/cm^2 del filtro de cuarzo muestreado.

Determinación de carbono negro y carbón orgánico por atenuación de luz

La determinación semicuantitativa de carbono se realizó en filtros de teflón que fueron analizados con el equipo transmisómetro Soot Scan™ Modelo OT21 que determina los valores de atenuación de luz transmitida a través del filtro con muestra, que fue expuesto a luz transmitida a dos longitudes de onda: en la región ultravioleta (370nm, para la determinación de Carbono Orgánico) y la región infrarroja (880nm, con la cual conocemos la atenuación del Carbono Negro), mediante el procedimiento interno de análisis establecido en los Laboratorios de INECC PT-CQP-002.

Las medidas que registra son: atenuación UV e IR, que se calcula como:

$$Atenuación = 100 * Ln\left(\frac{Transmición\ de\ luz\ del\ filtro\ blanco}{Transmición\ de\ luz\ filtro\ muestra}\right)$$

Este principio de atenuación está determinado por medio de la ley de Beer-Lambert que explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa.

El correcto funcionamiento fue verificado con lentes de densidad neutra (DN) que se utilizan periódicamente para comprobar la respuesta del equipo. Estos discos filtro DN están hechos de materiales fotométricos estándar y se suministran en una caja protectora. Exhiben absorbancia reproducible en las dos longitudes de onda de análisis, y están certificados bajo una norma fotométrica-NIST.

Los valores de atenuación para cada muestra fueron referidos a su equivalencia de concentración expresada en $\mu g/cm^2$.

Determinación de carbono elemental y carbón orgánico con analizador Térmico-óptico Modelo 2001

El principio de operación del equipo analizador de carbono Modelo 2001, se lleva a cabo mediante un proceso químico, el cual se basa en la oxidación diferencial del carbono orgánico (CO) y del carbono elemental (CE), mediante una rampa de temperaturas, la parte orgánica es volatilizada en las primeras temperaturas (140, 280, 480 y 580 °C) y la parte elemental se volatiliza en las últimas temperaturas (580, 740 y 840°C) de operación del equipo. A la temperatura de 580°C, se lleva a cabo la pirolisis entre CO4 y CE1.

La reacción de oxidación se lleva a cabo en la columna empacada con dióxido de manganeso (MnO_2) produciéndose monóxido de carbono (CO) y posteriormente pasa a través de una segunda columna empacada de hidrógeno enriquecido con níquel (H-Ni), en la que se lleva a cabo una reacción de reducción produciendo metano (CH_4).

Cabe mencionar que la determinación de carbono total puede ser por la técnica de reflectancia (TOR) y/o de transmitancias (TOT).

Por otra parte, los filtros utilizados para este equipo son de fibra de cuarzo, los cuales previamente son pre-quemados a una temperatura de 900°C por 5 horas, para eliminar todos los compuestos orgánicos. El análisis de carbono se llevó a cabo mediante procedimiento interno de análisis establecido en los Laboratorios de INECC PT-003.

Determinación de elementos ligeros y pesados por Fluorescencia de Energía Dispersiva de Rayos X

Para la determinación de 17 elementos: Aluminio, Silicio, Fósforo, 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, para muestras obtenidas de teflón de 47 mm de diámetro. Los análisis se realizaron conforme al Procedimiento Estándar de Operación de RTI International (2009), que se utiliza para la especiación química de 280 estaciones de monitoreo la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

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]) que opera con enfriamiento por vía electrónica por debajo de 190 K, la electrónica de procesamiento de pulso es conducida a un PC, que muestra y procesa la información espectral y salidas de datos de concentración elementales.

Este equipo fue calibrado con estándares de concentraciones conocidas de sustancias depositadas de manera uniforme en membranas de teflón y mylar, marca Micromatter.

La verificación y ajuste fino, se realizó cada semana mediante el acondicionamiento del instrumento con una placa de cobre para 8041 eV y la evaluación periódica de un material de referencia certificado de partículas suspendidas (NIST No. 2783) de composición elemental conocida.

Las muestras colectadas de partículas suspendidas se analizaron de 200 a 300 segundos, en cinco diferentes condiciones de tipos de filtración de rayos X, voltaje y corriente eléctrica. Los resultados obtenidos fueron expresados en $\mu g/cm^2$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la campaña con los muestreadores Minivol (Octubre – Diciembre 2014)

4.1.1 Composición Química

Los muestreos realizados del 13 de Octubre al 18 de Diciembre de 2014, con equipo de bajo volumen (Minivol), indicaron que los sitios con mayor concentración son Santa Catarina y San Bernabé con promedios de 35 y 36 $\mu g/m^3$ respectivamente, los demás sitios tuvieron concentraciones menores de 26, 26, 23 y 18 $\mu g/m^3$ en las estaciones San Nicolás, Obispado, La Pastora y Ciudad Universitaria, respectivamente (Figura 5). Solamente Santa Catarina dos veces y

San Bernabé en tres ocasiones, rebasaron la concentración límite permisible de 45 µg/m^3 de exposición de la población en 24 horas, que describe la NOM-025-SSA1-2014.

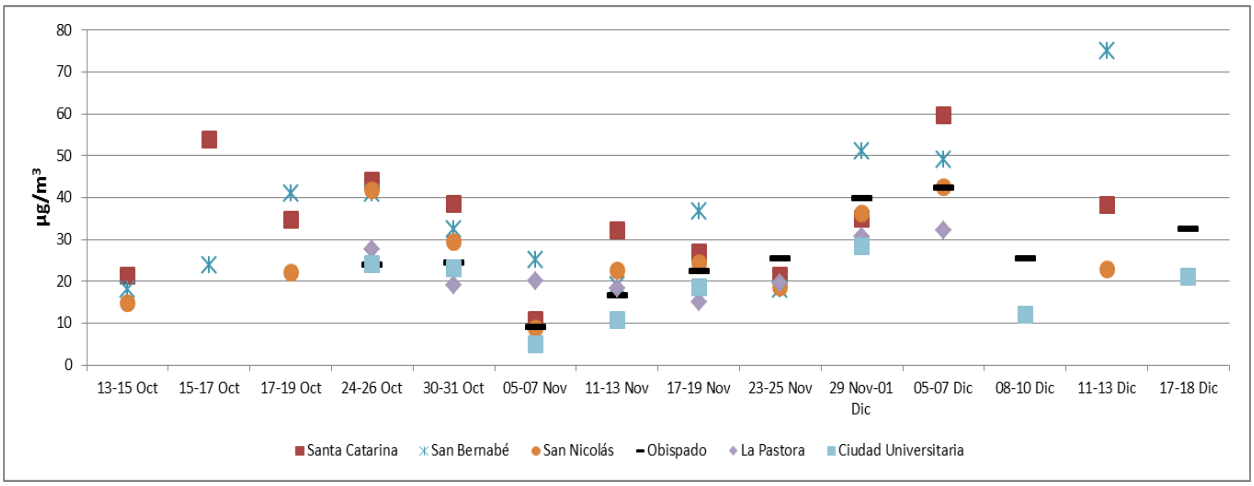

Figura 4. Distribución espacial de la concentración de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey.

La composición elemental del contenido de partículas evaluado por fluorescencia de rayos X de las muestras obtenidas por Minivol, se comparó con la composición promedio de la corteza terrestre, obteniendo los factores de enriquecimiento para cada elemento, metodología que ayuda a discernir la medida en que un elemento está enriquecido con respecto a la composición promedio natural de las partículas suspendidas [Martínez et al., 2012].

En la comparación de los resultados con otros estudios [Aldape, 1999; Martínez et al., 2012; Badillo, 2012], de la concentración de la composición elemental de las muestras analizadas se observa que con excepción de los niveles de Fe en el ambiente que se incrementaron de manera significativa a partir de 2007, los elementos crustales o del suelo no se han modificado, se destaca que la contribución de elementos del suelo en la contaminación del aire se da principalmente en las zonas cercanas a las colinas de roca caliza (Santa Catarina, San Bernabé) (Tabla 2).

En cuanto a metales pesados, se denota que las zonas de Obispado y la Pastora tienen influencia de la quema de combustibles pesados como diésel por la presencia de mayor níquel y vanadio. Otros metales como el Cu, Zn, Pb y el bromo se encuentran en mayor concentración en las zonas de San Bernabé y San Nicolás, el Zn adicionalmente está en mayor concentración también en Obispado. En Santa Catarina prevalecen en mayor concentración Cr y Mn. En el tiempo resalta la reducción de vanadio y níquel de 1997 a 2007 probablemente por la sustitución de combustibles con menor contenido de estos metales, sin embargo los demás metales pesados prevalecen con ligeros incrementos en el tiempo (Tabla 3).

Tabla 2. Comparación de la composición elemental de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en diversas investigaciones, de elementos mayoritarios.

	Aldape, 1999		Martínez et al., 2012		Badillo, 2012		Este estudio					
N	24	26	30	28	50	50	12	12	11	10	8	16
Sitio	Noroeste	Noroeste	Escobedo	Sta Catarina	Centro	SO-Sta Catarina	Santa Catarina	San Bernabé	San Nicolás	Obispado	La Pastora	Ciudad Universitaria
Periodo	Dic 1996-Enero 1997, 6 - 18 h	Dic 1996-Enero 1997, 18 - 6 h	Nov-Dic 2007	Nov-Dic 2008	Mar 2008-Feb 2009	Mar 2008-Feb 2009	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Feb. 2014
Al	----	----	0.2510	0.1240	----	----	**0.1891**	**0.1639**	**0.1639**	0.0978	0.1086	0.0833
Si	----	----	0.5200	0.4430	----	----	**0.5254**	**0.4255**	**0.4255**	0.2785	0.2530	0.1938
Ca	1.4900	1.2210	1.6960	1.5420	----	----	**1.1570**	**1.3692**	**1.3692**	0.5588	0.5150	0.3591
Fe	0.1630	0.1700	0.4930	0.4660	0.2248	0.2699	**0.4307**	0.3402	0.3402	0.3354	0.3050	0.2049
Ti	0.0080	0.0120	0.0210	0.0180	----	----	**0.0578**	**0.0106**	**0.0106**	0.0075	0.0093	0.0064
S	2.1390	2.0380	1.5070	1.6740	----	----	**1.9179**	**2.2780**	**2.2780**	1.8349	1.9060	1.6929
K	0.2640	0.4030	0.3790	0.3170	-----	-----	**0.3065**	**0.3668**	**0.3668**	0.2589	0.2583	0.2343

Tabla 3. Comparación de la composición elemental de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en diversas investigaciones, de elementos de metales pesados y bromo.

	Aldape, 1999		Martínez et al., 2012		Badillo, 2012		Este estudio					
n	24	26	30	28	50	50	12	12	11	10	8	16
Sitio	Noroeste	Noroeste	Escobedo	Sta Catarina	Centro	SO-Sta Catarina	Santa Catarina	San Bernabé	San Nicolás	Obispado	La Pastora	Ciudad Universitaria
Periodo	Dic 1996-Enero 1997, 6 - 18 h	Dic 1996-Enero 1997, 18 - 6 h	Nov-Dic 2007	Nov-Dic 2008	Mar 2008-Feb 2009	Mar 2008-Feb 2009	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Dic. 2014	Oct. 2014-Feb. 2014
V	0.0250	0.0250	0.0060	0.0050	----	----	0.0033	0.0039	0.0039	**0.0062**	**0.0046**	0.0021
Ni	0.0040	0.0040	0.0020	0.0010	0.0007	0.0007	0.0009	0.0003	0.0003	**0.0017**	**0.0021**	0.0013
Cr	----	----	0.0020	0.0040	----	----	**0.0063**	**0.0036**	**0.0036**	0.0017	0.0031	0.0019
Mn	0.0080	0.0080	0.0360	0.0270	0.0123	0.0241	**0.0281**	0.0173	0.0173	0.0182	0.0139	0.0119
Cu	0.0080	0.0070	0.0130	0.0160	-----	-----	**0.0218**	**0.0248**	**0.0248**	0.0154	0.0152	0.0113
Zn	0.1290	0.1310	0.1890	0.1300	-----	-----	0.1831	**0.2924**	**0.2924**	**0.3431**	0.2075	0.1406
Br	----	----	0.0260	0.0090	----	----	0.0082	**0.0123**	**0.0123**	0.0062	0.0069	0.0034
Pb	0.1070	0.1150	0.0720	0.0830	0.0256	0.0565	0.0689	**0.1108**	**0.1108**	0.0533	0.0520	0.0451

4.2 Resultados de la campaña con el muestreador Slit Jet Air Sampler (Diciembre 2014 – Marzo 2015)

4.2.1 Composición Química

De los muestreos realizados por el equipo dicótomo Slit Jet Air Sampler, con capacidad de colectar la fracción gruesa y fina respirable, instalado en el Centro de Monterrey, en la estación Obispado se obtuvo, que cuatro veces se rebasó el límite permisible de $PM_{2.5}$ y dos de PM_{10}, de 45 y 75 µg/m^3, respectivamente que establece la NOM-025-SSA1-2014 sobre la exposición de la población en 24 horas a partículas suspendidas. El promedio de PM_{10} fue de 44 µg/m^3 y de $PM_{2.5}$ fue de 30 µg/m^3. En promedio la fracción fina constituye el 70% en promedio de la fracción respirable total (Figura 5).

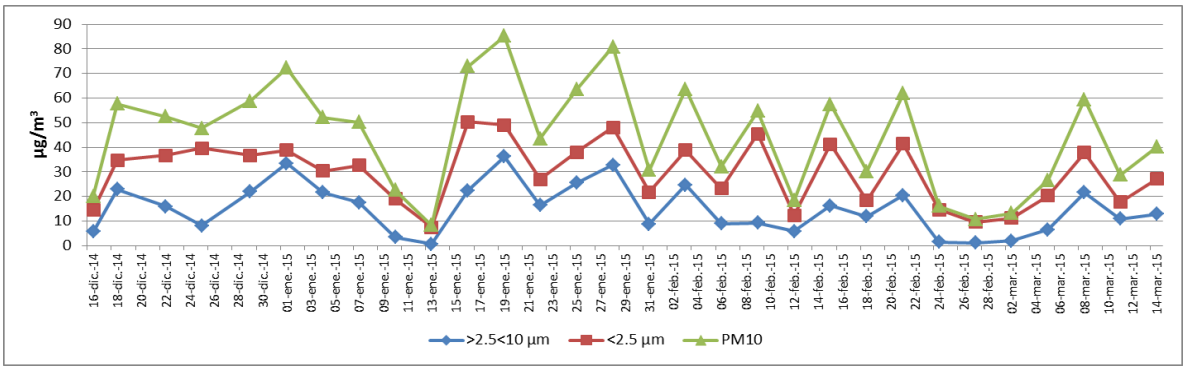

Figura 5. Tendencias de PM_{10} y $PM_{2.5}$ colectados con equipo Slit Jet Air Sampler de mediano flujo, colocado en el Centro de Monterrey, del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015.

En ambas fracciones se les determinaron la composición elemental que se muestra en la Figura 6, en donde claramente se observa que en $PM_{2.5}$ se encuentran todos los elementos en el intervalo del Al al Pb, tanto de origen del suelo (Al, Si, Ca, Fe, Ti, K) como aquellos derivados de emisiones vehiculares e industriales, destacan como excepciones solamente los elementos del suelo Ca y Ti y aquellas partículas enriquecidas de hierro, que se encuentran de forma casi equivalente tanto en la fracción gruesa como en la fina de las partículas respirables PM_{10}, así mismo los elementos Pb, Br, V, K, Cl, S y Al se encuentran en mayor proporción en $PM_{2.5}$ más allá del 80%.

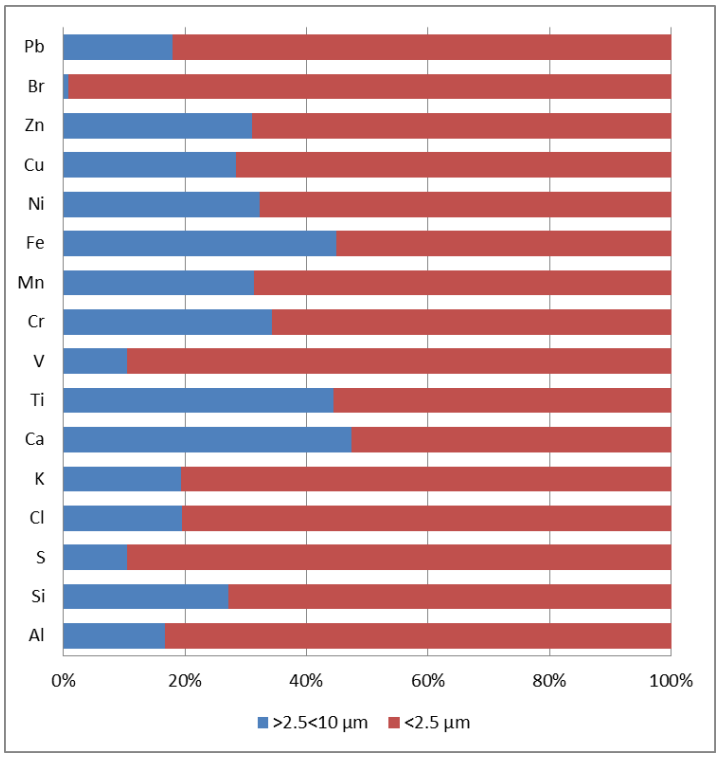

Figura 6. Composición elemental de las fracciones gruesa (>2.5<10 µm) y fina (<2.5 µm) de los muestreos de PM_{10} con equipo Slit Jet Air Sampler, localizado en Obispado del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015.

4.3 Reconstrucción de masa

Del análisis integrado de la composición química de las partículas colectadas, se llevaron a cabo análisis de reconstrucción de masa con base en la composición típica de los óxidos metálicos del suelo, la conversión de gas a partícula de NO_2 y SO_2 hacia nitratos y sulfatos de amonio, cloruro de amonio, carbono elemental o carbono negro, cuantificación de material orgánico particulado, emisiones de quema de biomasa a través del indicador de potasio de origen distinto al suelo, sales minerales y partículas enriquecidas de hierro y otros metales traza.

Los resultados obtenidos del equipo Slit Jet Air sampler tuvieron recuperación de masa adecuada como punto de partida. En la Figura 7 se muestran la composición de la fracción fina y gruesa del promedio de muestras obtenidas de diciembre de 2014 a marzo de 2015 para la estación Obispado, cuyo promedio de $PM_{2.5}$ fue de 29.5 µg/m^3 y de la fracción gruesa de PM_{10} de 14.9 µg/m^3.

La composición de la fracción fina muestra un 26% correspondiente a material del suelo (aportes de la erosión, resuspensión del suelo y de actividades mineras a cielo abierto). La suma de nitrato y material orgánico proporcionaron el 36% atribuible a la quema de combustibles, principalmente por automotores, la quema de combustibles pesados de la industria y diésel de transporte de carga; otro 30% se obtuvo por carbono negro y sulfatos.

Los metales pesados incluido hierro (provenientes de la industria metalúrgica) aportan un 3%, mientras que las sales minerales y la biomasa aportan un 2% y 1%, respectivamente. La fracción gruesa está compuesta en su mayoría en 60% de partículas orgánicas y de aquellas derivadas del suelo.

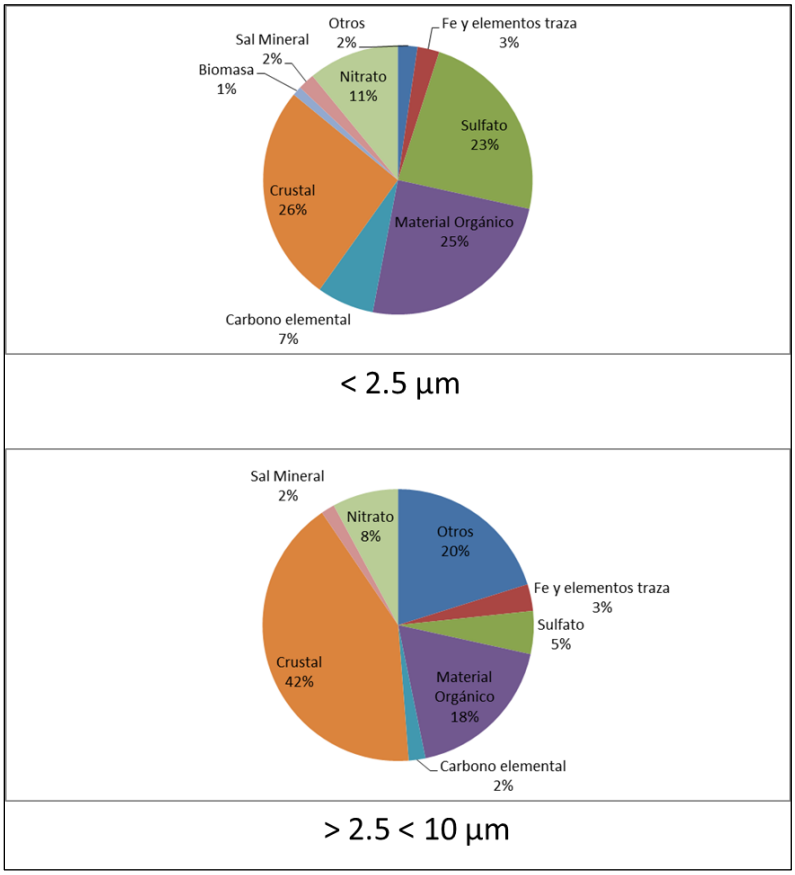

Figura 7. Masa reconstruida de la composición química de las partículas finas respirables colectadas con equipo Slit Jet Air Sampler, en Obispado del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015.

La masa reconstruida de la composición de las partículas de la fracción $PM_{2.5}$, para el periodo de octubre a diciembre de 2014, permitió observar que hay un perfil generalizado a nivel regional.

Así, el sulfato de amonio constituye una de las fracciones principales de las $PM_{2.5}$ con un 27 al 40%, seguido por el material orgánico con un 27 a 36%. El material de la corteza terrestre aporta del 8 al 14%, el carbono negro un 5 a 11%, el nitrato de amonio del 7 al 9%, los metales traza así como las sales minerales contribuyen con 1 al 4%, respectivamente, y la biomasa con el 1 al 2% (Figura 10).

Estos resultados son parecidos a los reportados por Martínez et al., 2012 cuyos sitios de estudio fueron Escobedo y Santa Catarina. Estos autores encontraron que el carbono orgánico fue el componente más abundante (42%), seguido por el sulfato y nitrato de amonio con un 36%. El material de la corteza constituye un 11% de las $PM_{2.5}$, mientras que las sales el 3%. El carbono elemental está presente en únicamente el 7%, las sales en 3% y los elementos traza en 1%.

Los resultados obtenidos sugieren como fuentes de las $PM_{2.5}$, la quema de combustibles por automotores que aporta el material orgánico así como el nitrato de amonio. Por otra parte, la quema de combustibles en la industria así como el diésel usado por el transporte pesado que contribuye con el sulfato de amonio y carbono negro. La erosión y resuspensión del suelo y actividades extractivas como las fuentes del material del suelo que se encuentra en las partículas, mientras que la industria metalúrgica aporta a los elementos traza.

Con respeto a la reconstrucción de masa de la composición química de los muestreos obtenidos con bajo volumen, resalta la mayor contribución del material crustal en las zonas de Santa Catarina y San Bernabé, sitios próximos a las colinas en donde se realizan actividades extractivas. Así mismo los sitios San Bernabé, San Nicolás y Ciudad Universitaria tienen mayor influencia directa de las emisiones de procesos de la industria metalúrgica que se ve reflejado en la mayor proporción de elementos traza (Figura 8).

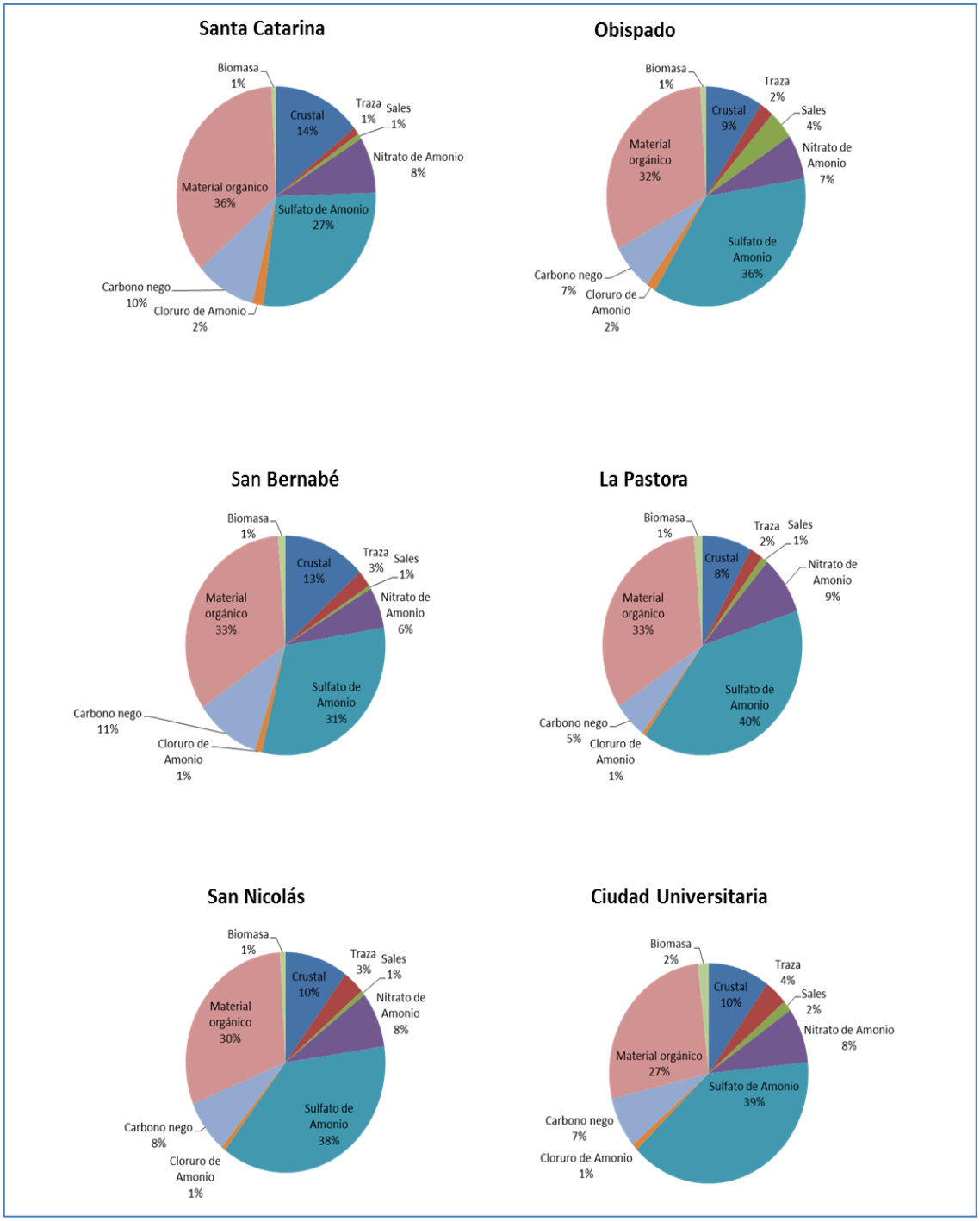

Figura 8. Reconstrucción de masa obtenidos de la composición de las partículas $PM_{2.5}$ de muestreos con Minivol de octubre a diciembre de 2014.

5. BIBLIOGRAFÍA

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

Alfaro-Barbosa, J.M. y Barajas-Herrera, D.I. 2008. Caracterización Quimiométrica del Material Particulado Suspendido en Zonas Impactadas en el Área Metropolitana de Monterrey. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 2: 60 -67.

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.

Benítez-García, S., Isao Kanda, Shinji Wakamatsu, Yukiyo Okazaki y Masahide Kawano. 2014. Analysis of Criteria Air Pollutant Trends in Three Mexican Metropolitan Areas. Atmophere 5: 806-829.

Celo, V. y Dabek-Zlotorzynska, E. 2011. Concentration and source origin of trace metals in $PM_{2.5}$ collected at selected canadian sites within the Canadian National Air Pollution Surveillance Program, Dentro del compendio Urban Airborne Particulate Matter: origin, chemistry, fate and health impacts. Editores: Zereini, F. y Wiseman, C. L.S. XXIII, 656 pág.

CONAPO, 2014. Consejo Nacional de Población. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos Fecha de consulta: Agosto-2014.

Gallego Picó A., González Fernández, I., Sánchez Gimeno, B., Fernández Hernando, P., Garcinuño Martínez, R.M., Bravo Yagüe, J.C., Pradana Pérez, J.A., García Mayor, A. y Durand Alegría, J.S. 2012. Contaminación atmosférica. UNED, Madrid. 440 pp.

Garreaud, R. D., Rutllant, J. A., Merino, M., Gallardo, L., Leiva, M. A., Morales, L., Pérez, P., Gutiérrez, L., Jorquera H., Pérez-Correa, R., Palma, W., Oyarzún, M. y Morales Segura, R. 2006. Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Universitaria, Chile. 330 pp.

González-Santiago, O., Badillo-Castañeda, C.T., Kahl, J.D.W., Ramírez-Lara, E. y Balderas-Rentería, I. 2011. Temporal Analysis of PM_{10} in Metropolitan Monterrey, Mexico. Journal of the Air & Waste Management Association 61: 573-579.

Gutiérrez Jaimes, J.H., Quijano Vargas M.J., Quijano Parra, A. 2012. Monitoreo y caracterización fisicoquímica del material particulado $PM_{2.5}$ en Cúcuta-Norte de Santander-Colombia. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas. 10 (1):24-38

INECC, 2015. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. http://www.sinaica.ine.gob.mx/rama_mty.html. Fecha de consulta: Marzo-2015

INEGI, 2012. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010.

INEGI, 2014. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario Estadístico y Geográfico de Nuevo León 2014.

López, M.T. y Pérez, I.K. 2014. Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las $PM_{2.5}$ en tres zonas metropolitanas mexicanas. INECC, México. 51 pp.

Mancilla, Y., Mendoza, A., Herckes, P. y Fraser, M. 2014. Source Apportionment of $PM_{2.5}$ based on molecular organic marker in Monterrey, Mexico. En: A&WMA's 107th Annual Conference & Exhibition. 24-27 de Junio de 2014. California, Estados Unidos. Paper 33604.

Manzanares, L. Echániz, G., López, M.A., Pérez, I.K. y Garibay, V. 2011. Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$. INE, México. 103 pp.

Martínez Pontón, A.A. y Aldape Ugalde, F. Identificación de metales en partículas finas ($PM_{2.5}$) durante la época seca-fría en la ciudad de Toluca. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/098/40098256.pdf Fecha de consulta: junio 2015.

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.

Menchaca Torre, L. y Mendoza Domínguez, A. 2014. Relación de los niveles de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de Monterrey e identificación de fuentes. En: La interdisciplinariedad en la Ingeniería Química. Memorias del XXXV Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. 6-9 de mayo de 2014, Jalisco, México. Pp. 682-687.

Pöschl, U. 2005. Atmospheric Aerosols: Composition, transformation, Climate and Health effects. Angewandte Chemie International Edition 44: 7520-7540.

PROAIRE, 2008-2012. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012.

RETC, 2015. http://app1.semarnat.gob.mx/retc/retc/index.php. Fecha de consulta: abril 2015.

Tzintzun, M.G., López, M.T., Iniestra, R. y Echániz, G. 2011. Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). INE, México. 410 pp.

Tzintzun, M.G., Iniestra, R., Ramos, L.E., Pérez, I.K., Sánchez, V.M., Sánchez, C.A. 2014. Informe Nacional de Calidad del aire 2013, México. INECC. México. 176 pp.