

2011

Cuarto Informe

Anual de Calidad del Aire

GRAN AREA METROPOLITANA DE COSTA RICA



Cuarto Informe Anual de Calidad del Aire

GRAN ÁREA METROPOLITANA DE
COSTA RICA

UNIVERSIDAD NACIONAL

MINISTERIO DE AMBIENTE, ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES

MINISTERIO DE SALUD

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES

MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ

ING. RENE CASTRO SALAZAR

MINISTRO DE AMBIENTE, ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES

DRA. DAISY CORRALES DÍAZ

MINISTRA DE SALUD

ING. PEDRO CASTRO FERNÁNDEZ

MINISTRO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES

LIC. SANDRA LEÓN COTO

RECTORA UNIVERSIDAD NACIONAL

ING. JOHNNY ARAYA MONGE

ALCALDE MUNICIPALIDAD DE SAN JOSE

ELABORACIÓN

DR. JORGE HERRERA MURILLO

COORDINADOR LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL, UNIVERSIDAD NACIONAL

COLABORACIÓN

BQ. VICTOR HUGO BEITA GUERRERO

BQ. DAVID SOLÓRZANO ARIAS

BQ. HAZEL ARGÜELLO MIRANDA

BQ. MARIA CHAVES VILLALOBOS

BQ. MARIA ELIANA VALVERDE RODRÍGUEZ

INVESTIGADORES LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL, UNIVERSIDAD NACIONAL

PRESENTACIÓN

El aire es un bien común al cual todos los habitantes tenemos derecho, sin embargo, es un recurso compartido que tenemos la obligación de cuidar y preservar. Por esta razón, la Universidad Nacional, el Ministerio de Salud, el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y la Municipalidad de San José vienen realizando en los últimos años, la tarea de no sólo vigilar el estado de la calidad del aire en el gran área metropolitana de Costa Rica, sino también la de mantener informada a la población sobre su condición y los riesgos de su deterioro. El trabajo realizado sin duda contribuye a la protección de la salud pública, garantiza el derecho a la información y permite generar indicadores de estado que son el punto de partida para la evaluación de la efectividad de las políticas públicas, que en materia de gestión de la calidad del aire, se están desarrollando en el país.

El monitoreo atmosférico, desarrollado en una extensión suficiente permite conocer las tendencias de los principales contaminantes y profundizar en el estudio de las causas que la determinan. Es por esto que nos complace presentar el Informe Anual de Calidad del Aire para el gran área metropolitana de Costa Rica correspondiente al año 2011, el cual contiene información sobre el estado que guarda la calidad del aire en los parámetros evaluados, el nivel de cumplimiento de la normatividad nacional e internacional, las tendencias actualizadas de los principales contaminantes del aire e información detallada sobre algunos de los impactos que la contaminación atmosférica genera en esta región del país. Esperamos que la información aquí contenida sea de utilidad para los tomadores de decisiones y todas aquellas personas que de una u otra forma tienen una participación activa en la gestión de la calidad del aire del gran área metropolitana de Costa Rica.

Dr. Jorge Herrera Murillo

Coordinador Laboratorio de Análisis Ambiental, UNA

Índice

	PÁGINA
Presentación	5
Índice	6
Monitoreo de calidad del aire	7
Resultados	13
Conclusiones	49
Referencias	50

Monitoreo de Calidad del Aire

Por definición, el monitoreo es una actividad consistente en observar una situación para detectar los cambios que ocurran con el tiempo. De esta manera, el monitoreo de la calidad del aire se debe llevar a cabo de una manera continua para poder observar los cambios en las concentraciones de los contaminantes con el tiempo. Esto lo hace diferente al muestreo y análisis de contaminantes. El monitoreo, junto con los modelos de predicción y los inventarios de emisiones, son parte integral de la gestión de la calidad del aire. Ésta se encuentra directamente vinculada con el cumplimiento de objetivos económicos, de evaluación y de regulación.

Durante el desarrollo de un plan efectivo de gestión de la calidad del aire en primer lugar es necesario obtener información confiable relacionada con los niveles de contaminación en el aire a través del monitoreo. El propósito más importante del monitoreo atmosférico es el de proveer la información necesaria a los científicos, legisladores y planificadores para que éstos tomen las decisiones adecuadas para propósitos de gestión y mejora del ambiente. El monitoreo juega un papel regulador en este proceso proporcionando la base científica para el desarrollo de las políticas y estrategias, en el establecimiento de objetivos durante la evaluación del cumplimiento de las metas y en la ejecución de las acciones.

Una estación de monitoreo consiste en una infraestructura que contiene diversos instrumentos destinados a monitorear las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y, por lo general, algunos parámetros meteorológicos. Los criterios de localización de las estaciones son diferentes según los objetivos de monitoreo que hayan sido establecidos. Sin embargo, en cualquier caso es necesario que el lugar cuente con una fuente adecuada de energía, con seguridad y que esté debidamente protegido de los elementos. Es común que las estaciones de monitoreo se encuentren agrupadas en redes que pueden cubrir grandes extensiones geográficas. Un Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire es el conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos empleados para el monitoreo de la calidad del aire en una región dada. Estos sistemas deben responder en forma eficiente y confiable a los objetivos del monitoreo y a las necesidades de información establecidas por las normas nacionales vigentes en materia de calidad del aire. Dentro de sus actividades se encuentran la medición, registro y procesamiento de los datos de calidad del aire. Sus principales productos en cuanto a calidad del aire son las bases de datos, así como los informes y el pronóstico de la contaminación atmosférica. La infraestructura del sistema debe permitir el cumplimiento de los siguientes objetivos: evaluar la observancia de las normas de calidad del aire, conocer los niveles de contaminación prevalecientes en corto tiempo, informar a la población sobre los niveles de contaminación, verificar los efectos de las medidas de control en la contaminación atmosférica y promover la gestión ambiental para evitar el deterioro de la atmósfera debido a las actividades humanas.

Los datos de monitoreo de la calidad del aire pueden ser influenciados por variados factores, como la presencia de contaminantes in situ, el transporte de contaminantes desde otras zonas, las condiciones de estabilidad atmosférica, la presencia de radiación solar, los procesos de formación y destrucción de dichas sustancias en la atmósfera, etc. Por lo tanto, el valor de la medición representa el aporte de los diversos componentes sobre el volumen de aire monitoreado en ese instante en ese lugar, y es por ello deducible que muchas de las estaciones de monitoreo, especialmente aquellas ubicadas en zonas urbanas, estén midiendo no sólo el impacto de una fuente en particular, sino que de varias otras actividades, tales como tránsito vehicular, quema de combustibles en el ámbito comercial o doméstico, uso de solventes o compuestos volátiles, etc. La emisión atmosférica, en cambio, es la descarga directa o indirecta de sustancias al aire, y se mide o estima, para cada fuente o actividad en particular, siendo atribuible a un responsable o un emisor. Existe el monitoreo de emisiones, pero no debe confundirse con el monitoreo de la calidad del aire.

Legislación Costarricense aplicada al monitoreo de calidad del aire

En los últimos 15 años se ha producido un avance en la investigación científica sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud y en la actualidad es ampliamente aceptado que la exposición a la contaminación del aire urbano está asociada con una amplia gama de efectos agudos y crónicos, que van desde leves perturbaciones fisiológicas hasta la muerte prematura por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Cohen *et al.*, 2004).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que a nivel mundial alrededor de 1500 millones de personas viven en áreas con niveles peligrosamente elevados de contaminación del aire (Chelala, 1999). Más de dos millones de muertes prematuras se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados, y más de la mitad ocurre en poblaciones de países en desarrollo (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Dependiendo de la edad, género, estado de salud, condición física y nivel socioeconómico, los efectos negativos de la contaminación del aire en la salud humana pueden ser evidentes o asintomáticos, aun en condiciones en las que aparentemente no existen molestias puede existir un daño subclínico. La evidencia científica indica que los aumentos menores de algunos contaminantes pueden provocar incrementos pequeños, pero cuantificables, en las visitas a salas de emergencia, en admisiones hospitalarias y casos de muerte. Los daños por la exposición a la contaminación del aire normalmente se definen con base en la susceptibilidad individual de las personas. Los grupos sensibles suelen ser la población infantil, los adultos mayores y las personas con enfermedades crónicas. Sin embargo, la susceptibilidad no sólo se determina por características como la edad, el estado de salud, la alimentación y la genética, sino también por

factores ambientales, incluyendo las características de la exposición, las condiciones de vivienda y el medio ambiente de zonas económicamente desfavorecidas (Organización Mundial de la Salud, 2006). Las zonas urbanas se caracterizan por la presencia de contaminación atmosférica vinculada al uso de vehículos, a la actividad industrial, a los servicios y en menor escala a las actividades domésticas. La alta densidad de población provoca que un gran número de personas estén potencialmente expuestas y por lo tanto, el número de individuos en riesgo de desarrollar efectos leves es mayor.

Las normas de calidad del aire fijan valores máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el propósito de proteger la salud de la población en general y de los grupos de mayor susceptibilidad en particular, para lo cual se incluye un margen adecuado de seguridad. En nuestro país, no existen los recursos ni la infraestructura para realizar estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, ni en animales ni en seres humanos, por lo que las normas se establecieron fundamentalmente tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo. Las normas vigentes de calidad del aire fueron dictadas por el Ministerio de Salud en el decreto 30221-SALUD publicado en el Diario Oficial la Gaceta el 21 de marzo de 2002 (Cuadro 1), sin que hasta la fecha se haya realizado una revisión rigurosa de los estándares que esta contempla.

Cuadro 1. Valores máximos de inmisiones de contaminantes atmosféricos normados en Costa Rica según el decreto 30221-SALUD.

Contaminante	Valor de Referencia	Método de cálculo	Método de muestreo
Partículas Suspendedas Totales	90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético anual	Alto Volumen
	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético de 24 horas	
Partículas menores o iguales a 10 μm (PM_{10})	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético anual	Alto Volumen
	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético de 24 horas	
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético anual	Absorción manual o instrumental
	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético de una hora	
Dióxido de Azufre (SO_2)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético anual	Absorción manual o instrumental
	365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético de 24 horas	
	1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético de 3 horas	
Monóxido de Carbono (CO)	10 mg/m^3	Promedio aritmético de 8 horas	Instrumental
	40 mg/m^3	Promedio aritmético de 1 hora	
Ozono (O_3)	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético de 1 hora	Instrumental
Plomo (Pb)	0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio aritmético anual	Alto Volumen

Contaminantes monitoreados

Toda sustancia que aparece en el aire y que no se encuentra normalmente ahí o que se halla a concentraciones mayores que las usuales, es un contaminante del aire. Estas sustancias pueden afectar la salud de plantas y animales (incluyendo al hombre) o bien pueden reducir la visibilidad. Los contaminantes atmosféricos se generan en procesos naturales o en las actividades humanas. La importancia relativa de los contaminantes se debe tanto a la frecuencia con que se presentan en el aire ambiente como a las concentraciones en que se hallan. Las dos categorías básicas de contaminantes son la de contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio son los contaminantes sobre los que se tiene la mayor cantidad de información (plasmada originalmente en los llamados *documentos criterio*) y para los cuales se han establecido concentraciones límite (normas de calidad del aire) como línea divisoria entre una calidad de aire aceptable y una mala calidad. Los contaminantes criterio son: monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, las partículas (PST y PM_{10}) y el plomo. Todos los demás contaminantes se consideran como *no criterio*. Entre ellos destacan los gases con efecto invernadero y los contaminantes tóxicos.

Los contaminantes que se emiten al aire directamente desde una fuente emisora, como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, algunas partículas y el plomo se consideran como contaminantes primarios mientras que los contaminantes secundarios no son emitidos por ninguna fuente sino que se forman en el aire por reacciones entre contaminantes primarios y los componentes del aire. El ejemplo más importante lo constituye el ozono.

Óxidos de nitrógeno (NO_2 y NO):

El término óxido de nitrógeno puede referirse a alguno de los siguientes compuestos: NO (óxido nítrico); NO_2 (dióxido de nitrógeno); N_2O (óxido nitroso); N_2O_3 (trióxido de dinitrógeno); N_2O_4 (tetraóxido de dinitrógeno) y N_2O_5 (pentóxido de dinitrógeno). Desde el punto de vista de la contaminación del aire sólo los dos primeros tienen importancia y sólo el dióxido (NO_2) es un contaminante criterio. Por lo general, los óxidos de nitrógeno, NO_x , son la mezcla de NO y NO_2 . Estos gases tienen en común que ambos son reactivos, tienen un solo átomo de nitrógeno y son generados en procesos de combustión (sobre todo a altas temperaturas). A temperatura ambiente, el nitrógeno (N_2) del aire no puede combinarse con el oxígeno debido a la gran estabilidad del triple enlace de su molécula, pero éste se rompe cuando hay suficiente energía, lo que se manifiesta por el aumento de la temperatura y entonces los átomos de nitrógeno ya pueden reaccionar con el oxígeno dando, sobre todo, NO el cual, en presencia de un exceso de

oxígeno se oxida produciendo NO_2 . En áreas de mucho tránsito vehicular, como es el caso en las grandes ciudades, las emisiones de NO_x son muy importantes. El monóxido de nitrógeno, óxido nítrico u óxido de nitrógeno NO es un gas incoloro y poco soluble en agua. Se le considera un agente tóxico.

El NO_2 es un gas tóxico e irritante de color marrón amarillento. Además de los efectos que produce en la salud, el dióxido de nitrógeno puede absorber parte de la radiación solar y junto con las partículas suspendidas es responsable de la disminución de la visibilidad, es precursor de la lluvia ácida y también juega un papel importante en el cambio climático global. Junto con el óxido nítrico es un regulador de las capacidades oxidativas en la tropósfera al controlar el desarrollo y destino de los radicales, incluyendo el radical hidroxilo.

La principal ruta de exposición en los seres humanos es durante la respiración. Una gran parte del dióxido de nitrógeno se remueve en la nasofaringe, sin embargo, durante la realización de ejercicio puede alcanzar regiones más bajas del sistema respiratorio. Algunos estudios han demostrado que el dióxido de nitrógeno o algunos de sus derivados químicos, pueden permanecer dentro de los pulmones por períodos prolongados de tiempo. Se ha observado también la presencia de óxido nítrico y nitroso o sus sales en la sangre u orina después de una exposición al dióxido de nitrógeno.

En varios estudios experimentales de toxicología humana de corta duración, se han observado efectos agudos tras la exposición a concentraciones de dióxido de nitrógeno mayores a $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,339 ppm) durante una hora. El nivel más bajo de exposición a dióxido de nitrógeno que ha mostrado un efecto directo en la función pulmonar de los asmáticos es de $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,380 ppm), no obstante, los estudios realizados sobre la capacidad de respuesta bronquial en los asmáticos parecen indicar que aumenta con niveles superiores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ equivalente a 0,136 ppm (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Partículas:

Las partículas, también conocidas como aerosoles, pueden ser sólidas o líquidas (gotitas). Su tamaño es muy variable, desde 0,01 hasta unos 100 μm . Las partículas de diámetro mayor a 100 μm no pueden mantenerse en suspensión y se depositan (partículas sedimentables). Las partículas pueden ser antropogénicas o naturales. Algunas ocurren naturalmente originándose en volcanes, tormentas de polvo (tolvaneras), incendios forestales o rocío marino. Las actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles, también generan partículas. Considerando todas las emisiones globales, las partículas antropogénicas constituyen alrededor del 10 por ciento de todos los aerosoles en la atmósfera.

La composición de las partículas depende de su origen. Los polvos transportados por el viento generalmente están constituidos por óxidos minerales y otros materiales presentes en la corteza terrestre. La sal marina es el segundo aerosol en importancia por la cantidad emitida. Consiste

sobre todo de cloruro de sodio, de magnesio, sulfatos, calcio y potasio originados en el rocío marino que también puede contener compuestos orgánicos. Otro componente que se encuentra con frecuencia en las partículas es el carbón elemental (hollín) que es emitido directamente en las fuentes de combustión. Es una de las especies más absorbentes de radiación. En general, todos los aerosoles absorben y dispersan la radiación solar y la radiación terrestre modificando el balance energético de la tierra.

Las partículas, también conocidas como PM por sus siglas en inglés, “particulate matter”, contienen un gran número de componentes, según su origen: ácidos, sulfatos y nitratos, compuestos orgánicos, metales, suelos y polvo. La composición química de las partículas es determinante en su grado de peligrosidad pero esto sólo cuando ya entran al organismo. Es su tamaño el que está ligado directamente a su potencial para causar problemas de salud. Las partículas de diámetro igual o inferior a $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}) son las que, por lo general, pasan a través de la nariz y la garganta y llegan hasta los pulmones. Las $\text{PM}_{2.5}$ tienden a penetrar a las regiones del pulmón donde se efectúa el intercambio de gases y las partículas muy finas (< 100 nanómetros) pueden pasar a través de los pulmones afectando otros órganos. Una vez inhaladas, las partículas pueden afectar el corazón y los pulmones y causar graves problemas de salud. La USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) ha clasificado estas partículas en dos grupos:

- partículas gruesas inhalables, cuyo diámetro es menor a $10\text{ }\mu\text{m}$ pero mayor a $2,5\text{ }\mu\text{m}$; éstas se encuentran cerca de las carreteras y en industrias polvosas y las
- partículas finas, de diámetro igual o inferior a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ que pueden emitirse directamente desde alguna fuente (como incendios forestales) o formarse en la atmósfera a partir de reacciones entre gases emitidos en plantas termoeléctricas, industrias o automóviles.

Dependiendo de su tamaño y su densidad, las partículas se clasifican en:

- Partículas suspendidas totales o PST. Éstas incluyen las partículas de todos tamaños que son capaces de mantenerse en suspensión y se muestrean por el método de altos volúmenes. El muestreador empleado (muestreador de altos volúmenes) por su diseño, sólo permite el depósito de partículas de diámetro inferior a $100\text{ }\mu\text{m}$ en el filtro.
- Partículas con un diámetro máximo de $10\text{ }\mu\text{m}$ o PM_{10} . Para muestrear estas partículas puede emplearse un muestreador de alto o de bajo volumen equipado con un cabezal adecuado selectivo de tamaño o bien algún impactador. Estas partículas también pueden ser monitoreadas (de manera realmente continua) con un monitor TEOM (Microbalanza oscilante de elemento cónico por sus siglas en inglés) equipado con un dispositivo selectivo (impactador) de entrada.

- Partículas con un diámetro máximo de 2,5 µm o PM_{2,5}. Estas partículas se pueden muestrear empleando un dispositivo selectivo de tamaño a bajo o alto volumen o pueden determinarse con un monitor TEOM equipado con un selector de entrada (impactador o ciclón)

RESULTADOS

1. Partículas PM₁₀

1.1. Muestreo:

Para realizar el muestreo de partículas PM₁₀, se seleccionaron catorce sitios de monitoreo, representativos de zonas comerciales, industriales y residenciales, ubicados en varios municipios del gran área metropolitana de Costa Rica. Los sitios determinados se caracterizan por ser categoría B de acuerdo con la clasificación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1997). La categoría B se asigna a aquellos sitios donde se presenta alta concentración de contaminantes con bajo potencial de acumulación, ubicado de 3 a 15 metros de una arteria del alto flujo vehicular con buena ventilación natural. En el cuadro 2 se muestra la distribución espacial de los sitios de muestreo.

Cuadro 2. Descripción de la ubicación de las estaciones utilizadas para el monitoreo de partículas PM₁₀.

Código del sitio	Ubicación	Representatividad del sitio de monitoreo
SJ-01	Catedral Metropolitana, San José	Comercial
SJ-02	Plantel del MOPT, San José	Comercial
SJ-03	Centro de Reciclaje de la Municipalidad de San José en Hatillo, San José	Transición Comercial-Residencial
SJ-04	Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca	Comercial
SJ-05	Registro Nacional, Zapote	Comercial
ES-01	Municipalidad de Escazú	Comercial
BE-01	La Asunción, Belén	Industrial
BE-02	La Ribera, Belén	Transición Comercial-Residencial
HE-01	Rectoría de la Universidad Nacional, Heredia	Comercial
SA-01	Lindora, Santa Ana	Comercial
CA-01	Parque Industrial, Cartago	Industrial
MO-01	Instalaciones de la empresa Eaton, Moravia	Residencial
SD-01	Oficina del Ministerio de Salud de Santo Domingo	Comercial
AL-01	Campus de la Universidad Técnica Nacional, Alajuela	Comercial

Para la colección de las muestras se utilizaron muestreadores de aire de alto volumen marca Thermo Andersen modelo MFC, en donde el aire ambiente es aspirado en forma simétrica (independientemente de la dirección del viento), durante 24 ± 1 horas a un caudal de $1,13 \pm 10\%$ $\text{m}^3\text{min}^{-1}$. Una vez cada tres muestreos, se realizó una curva de calibración del flujo de cada uno de los muestreadores de aire, comparando las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado (VARIFLO modelo 454), con respecto a las indicaciones del equipo. En la colección de las partículas, se utilizaron filtros de fibra de vidrio (marca Whatman CAT No 1829-932), dos veces por semana y filtros de cuarzo (Whatman CAT 1851-865), para el análisis posterior de metales en al menos una ocasión a la semana. Para el análisis de iones inorgánicos se utilizaron tanto las muestras colectadas en filtros de fibra de vidrio como en cuarzo, para un total de tres muestras semanales, mientras que para el análisis de metales, únicamente se emplearon los filtros de cuarzo (una muestra semanal). Dichos filtros se acondicionaron al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura 15-30°C y humedad menor al 40%, antes de ser pesados en balanza analítica, al inicio y después de cada uno de los muestreos.

1.2. Resultados:

De acuerdo a los resultados obtenidos durante el año 2011 (cuadro 3), únicamente el sitio de muestreo BE-01 ubicado en La Asunción de Belén, presenta un valor promedio anual mayor al establecido como valor de referencia para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en el decreto 30221-S “Límites de Inmisión de Contaminantes Atmosféricos en Costa Rica”. Los promedios de concentración de partículas PM_{10} , para los meses de muestreo, resultaron ser mayores para los sitios ubicados en zonas de alto flujo vehicular e industrial ($32\text{-}54 \mu\text{g}/\text{m}^3$), que para aquellos sitios de transición entre zonas comerciales y residenciales ($20\text{-}26 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Es importante señalar que para ninguno de los sitios de monitoreo se supera el valor de referencia para mediciones de 24 horas.

Tal como se puede observar en la figura 1, para la mayoría de los sitios de monitoreo las mayores concentraciones de partículas, en 24 horas de monitoreo, se presentan en los meses de marzo y abril durante la época seca. Esta observación resulta interesante, en el tanto que la tendencia de años anteriores señalaba a los meses de agosto y setiembre como los valores con los mayores registros de este contaminante. La única excepción de este comportamiento lo constituye el sitio HE-01 en donde se registran valores elevados también en los meses de la época lluviosa. Para tratar de explicar esta observación, se debe analizar los patrones de vientos y lluvias que se presentaron en el gran área metropolitana de Costa Rica durante la época lluviosa y comparar con respecto a los años anteriores.

Cuadro 3. Promedios anuales de partículas PM₁₀ obtenidos durante el año 2011 en los sitios de monitoreo ubicados en el gran área metropolitana de Costa Rica.

Sitio de Monitoreo	Promedio aritmético anual (µg/m ³)	Valor Máximo registrado en 24 horas (µg/m ³)	Valor Mínimo registrado en 24 horas (µg/m ³)	Desviación Estándar de los datos (µg/m ³)	Número de datos válidos
SJ-01	24	83	10	11	78
SJ-02	26	126	11	15	59
SJ-03	32	144	10	21	106
SJ-04	32	79	14	10	120
SJ-05	22	46	10	7	114
ES-01	23	63	10	8	110
BE-01	54	124	23	19	104
BE-02	33	117	11	13	124
HE-01	45	96	10	20	91
SA-01	26	84	11	11	125
CA-01	28	78	15	10	119
MO-01	20	46	10	6	122
SD-01	21	43	10	6	117
AL-01	26	50	16	6	99

Valores máximos permisibles según decreto 30221-S: Promedio aritmético anual: 50 µg/m³ y Valor máximo para 24h de muestreo: 150 µg/m³

Si se compara el promedio anual de partículas PM₁₀ para el año 2011, en cada uno de los sitios de muestreo, con el valor obtenido para el año 2010 (cuadro 4) se puede observar que en un 50% de los sitios de monitoreo se presentan descensos en los valores, sin embargo solo en tres casos (HE-01, SJ-03 y SJ-05) esta disminución es significativa con respecto a la incertidumbre de los datos.

En los cuadros 5 y 6 se muestra un análisis de los principales constituyentes químicos de las partículas PM₁₀ en donde sobresale el sulfato y el fosfato como iones predominantes, mientras que el aluminio y el manganeso constituyen los metales mayoritarios. La concentración de estas especies varía en forma significativa con el sitio de muestreo, ya que las mayores concentraciones de iones secundarios como sulfato, formiato y oxalato se presentan en sitios ubicados en la salida de vientos del gran área metropolitana (BE-01 y BE-02). Adicionalmente, se presentan concentraciones mayores de metales asociados a actividades antropogénicas en sitios ubicados en zonas con alta densidad de flujo vehicular y actividad industrial, especialmente en el caso del Ni, Cu y Mn.

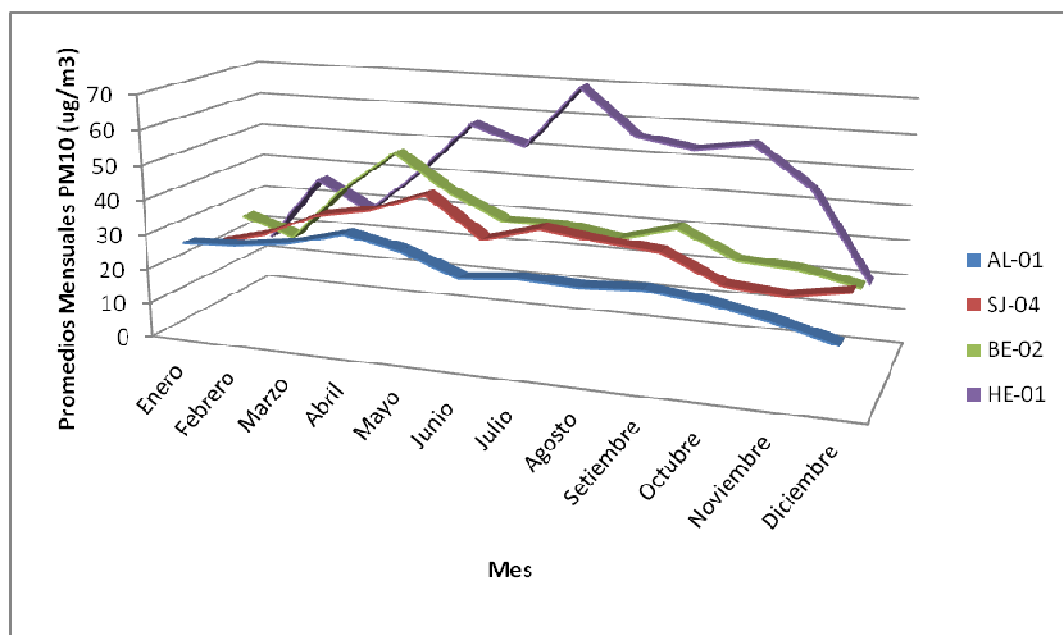


Figura 1. Variación mensual de los promedios de partículas PM₁₀ para algunos sitios de muestreo en el gran área metropolitana de Costa Rica durante el año 2011.

Cuadro 4. Evolución de los promedios aritméticos anuales de partículas PM₁₀ en el gran área metropolitana de Costa Rica, 2010-2011

Año	SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04	SJ-05	ES-01	BE-01	BE-02	HE-01	SA-01	CA-01	MO-01	SD-01	AL-01
2011	24	26	32	32	22	23	33	54	45	26	28	20	21	26
2010	28		37	35	29	22	34	52	56	26	28	20	22	25

Todos los datos poseen una incertidumbre de $\pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 5. Composición iónica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de las partículas PM_{10} colectadas en el gran área metropolitana de Costa Rica, 2011

	F⁻	Cl⁻	NO₂⁻	Br⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻	SO₄²⁻	NH₄⁺	Acetato	Oxalato	Formiato
SJ-01	0,34 (0,44)	1,07 (0,61)	0,38 (0,11)	0,27 (0,12)	0,88 (0,45)	1,23 (0,81)	3,51 (2,13)	0,47 (0,41)	nd	0,06 (0,08)	0,13 (0,03)
SJ-02	0,35 (0,30)	1,52 (0,79)	0,49 (0,19)	0,35 (0,21)	1,17 (0,38)	1,38 (0,75)	5,29 (2,83)	0,45 (0,32)	nd	0,12 (0,05)	0,14 (0,03)
SJ-03	0,30 (0,35)	1,26 (0,84)	0,40 (0,22)	0,28 (0,10)	0,94 (0,49)	1,37 (1,00)	3,95 (2,59)	0,40 (0,34)	nd	0,07 (0,04)	0,13 (0,05)
SJ-04	0,22 (0,32)	1,22 (0,78)	0,25 (0,11)	0,19 (0,06)	0,79 (0,53)	1,30 (1,13)	4,20 (2,77)	0,78 (0,57)	0,38 (0,03)	0,09 (0,05)	0,13 (0,05)
SJ-05	0,15 (0,14)	1,01 (0,72)	0,26 (0,16)	0,38 (0,28)	0,82 (0,55)	1,31 (1,00)	4,04 (3,92)	0,82 (0,78)	0,42 (0,11)	0,20 (0,11)	0,22 (0,21)
ES-01	0,23 (0,55)	1,02 (0,75)	0,21 (0,07)	0,19 (0,27)	0,59 (0,31)	0,95 (0,97)	2,83 (2,37)	1,20 (1,96)	0,53 (0,35)	0,17 (0,30)	0,53 (0,87)
BE-01	0,12 (0,06)	0,89 (0,12)	0,14 (0,06)	nd	0,78 (0,33)	0,71 (0,35)	4,70 (1,40)	0,81 (0,18)	0,51 (0,24)	0,13 (0,15)	0,66 (0,45)
BE-02	0,10 (0,07)	1,09 (0,76)	0,19 (0,07)	0,51 (0,08)	0,73 (0,40)	1,13 (0,73)	4,64 (3,60)	0,89 (1,44)	0,49 (0,33)	0,14 (0,12)	0,42 (0,70)
HE-01	0,11 (0,09)	1,08 (0,77)	0,24 (0,17)	0,14 (0,11)	0,82 (0,51)	2,16 (1,70)	3,78 (3,39)	0,77 (0,46)	0,44 (0,29)	0,19 (0,11)	0,16 (0,29)
SA-01	0,12 (0,12)	1,11 (0,87)	0,18 (0,07)	0,12 (0,03)	0,70 (0,38)	1,78 (1,76)	3,79 (2,91)	0,97 (1,37)	0,53 (0,35)	0,20 (0,28)	0,69 (1,10)
CA-01	0,15 (0,24)	1,25 (0,77)	0,13 (0,07)	0,11 (0,01)	0,57 (0,30)	1,43 (0,71)	2,48 (2,08)	0,67 (0,49)	0,35 (0,02)	0,16 (0,15)	1,09 (1,26)
MO-01	0,38 (0,49)	1,17 (0,77)	0,16 (0,08)	0,10 (0,01)	0,73 (0,60)	0,92 (0,95)	3,52 (3,01)	0,93 (0,98)	0,64 (0,23)	0,11 (0,15)	0,97 (1,18)
SD-01	0,25 (0,41)	1,40 (0,87)	0,17 (0,06)	0,11 (0,05)	0,67 (0,45)	0,99 (0,89)	3,54 (3,56)	1,27 (0,89)	0,60 (0,16)	0,12 (0,11)	1,00 (1,14)
AL-01	0,28 (0,42)	0,77 (0,47)	0,15 (0,05)	0,09 (0,01)	0,75 (0,47)	0,74 (0,89)	4,11 (3,19)	1,34 (0,73)	0,52 (0,17)	0,12 (0,13)	0,35 (0,41)

El dato colocado entre paréntesis corresponde a la desviación estándar del parámetro

Cuadro 6. Concentración de especies metálicas (ng/m³) presentes en las partículas PM₁₀ colectadas en el gran área metropolitana de Costa Rica, 2011

	Pb	Cu	Ni	Cr	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	V
SJ-01	6,82 (4,71)	7,65 (3,15)	2,86 (4,02)	12,2 (10,9)	2139 (1100)	141 (50)	636 (1218)	347 (586)	98 (53)	19,8 (13,5)	27,2 (56,1)	2,27 (0,98)
SJ-02	14,7 (11,1)	31,2 (27,5)	3,52 (3,68)	17,4 (24,9)	3693 (2189)	258 (447)	506 (748)	304 (400)	464 (833)	210 (200)	242 (98)	1,55 (0,17)
SJ-03	10,0 (6,9)	13,9 (4,1)	3,63 (3,51)	6,76 (3,83)	2851 (1117)	234 (319)	521 (821)	185 (78)	540 (209)	41 (23)	253 (164)	2,21 (0,70)
SJ-04	5,66 (4,52)	6,65 (5,62)	7,70 (8,31)	9,18 (9,33)	2653 (1189)	262 (86)	270 (101)	169 (83)	1192 (1232)	27,0 (8,1)	413 (175)	2,54 (0,92)
SJ-05	8,75 (8,02)	172 (186)	5,36 (6,99)	6,50 (6,10)	1628 (308)	257 (145)	240 (72)	133 (67)	427 (139)	14,3 (6,1)	232 (132)	1,71 (0,48)
ES-01	3,93 (1,74)	13,8 (4,6)	8,14 (6,92)	16 (45)	2234 (1282)	240 (416)	389 (520)	171 (232)	446 (468)	34,5 (17,3)	136 (194)	1,17 (0,44)
BE-01	5,25 (4,38)	86 (43)	7,55 (5,95)	5,37 (0,85)	1897 (1207)	176 (64)	646 (418)	202 (65)	1317 (802)	39 (16)	517 (240)	3,14 (0,60)
BE-02	3,75 (1,32)	157 (59)	9,48 (8,69)	3,03 (2,60)	2017 (1051)	189 (195)	359 (188)	122 (73)	515 (114)	377 (785)	228 (120)	4,93 (1,76)
HE-01	3,86 (1,64)	17,1 (7,8)	6,61 (6,47)	3,64 (2,86)	1905 (1113)	334 (280)	461 (374)	99 (96)	1070 (1992)	78 (28)	290 (187)	2,52 (0,49)
SA-01	2,87 (1,28)	68 (49)	3,42 (5,08)	6,13 (13,9)	1457 (762)	326 (47)	301 (102)	69 (54)	860 (783)	85 (58)	154 (100)	2,58 (0,41)
CA-01	4,65 (1,71)	122 (167)	5,93 (9,20)	21 (30)	1348 (682)	243 (241)	511 (179)	97 (70)	307 (151)	102 (46)	331 (135)	1,03 (0,91)
MO-01	3,89 (2,09)	12,5 (4,5)	2,12 (3,37)	16 (22)	1663 (1037)	286 (256)	339 (236)	74 (38)	213 (147)	96 (42)	152 (66)	1,30 (0,56)
SD-01	3,54 (1,46)	10,8 (3,3)	4,31 (7,72)	17,8 (16,7)	2213 (1101)	332 (251)	312 (241)	138 (70)	165 (128)	83 (36)	150 (90)	1,96 (1,20)
AL-01	3,09 (1,20)	13,8 (6,0)	6,23 (5,46)	15,4 (14,7)	2808 (1363)	298 (40)	265 (186)	195 (226)	324 (159)	196 (69)	344 (168)	5,36 (1,44)

El dato colocado entre paréntesis corresponde a la desviación estándar del parámetro

2. Partículas PM_{2,5}

2.1. Muestreo:

Para realizar el muestreo de partículas PM_{2,5}, se seleccionaron cinco sitios de monitoreo, representativos de zonas comerciales, industriales y residenciales, ubicados en los municipios de San José, Heredia, Moravia y Belén, todos pertenecientes al gran gran área metropolitana de Costa Rica (cuadro 7).

Cuadro 7. Descripción de los sitios de muestreo para la colección de partículas PM_{2,5} en el gran área metropolitana de Costa Rica.

Código de identificación	Provincia	Cantón	Localización	Descripción sitio de muestreo
REC-HE	Heredia	Central	Balcón del Edificio de la Rectoría de la Universidad Nacional	-Zona Comercial de alto flujo vehicular -5,5 m de la carretera y 6 m sobre el nivel del suelo
AS-BE	Heredia	Belén	Instalaciones de la empresa Intermodal	-Zona Industrial, salida de vientos de la GAM -6 m de la carretera y 3 m sobre el nivel del suelo.
LU-SJ	San José	San José	Instalaciones de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca	-Zona Industrial, 7m de la carretera y 3 m sobre el nivel del suelo
MSJ-SJ	San José	San José	Edificio "José Figueres Ferrer", Municipalidad de San José	-Zona Comercial de alto flujo vehicular -10 m de la carretera y 3 m sobre el nivel del suelo
ZR-MO	San José	Moravia	Instalaciones de la compañía EATON, San Vicente de Moravia	-Zona Residencial de bajo flujo vehicular -7 m de la carretera y 3 m sobre el nivel del suelo

Para la colección de las muestras se utilizaron dos tipos de equipos, los cuales se describen a continuación:

-Muestreadores de aire de alto volumen:

Equipos marca Tisch MFC, en donde el aire ambiente es aspirado en forma simétrica (independientemente de la dirección del viento), durante 24 ± 1 horas, a través de la abertura circunferencial ubicada en la parte superior del cabezal. Una vez dentro del cabezal de muestreo, el flujo de aire se acelera a través de boquillas impactadoras a una velocidad de $1,13 \pm 10\%$ $\text{m}^3\text{min}^{-1}$, para después ser dirigido hacia la superficie de impactación. Debido a su momento, aquellas partículas que poseen diámetros aerodinámicos mayores a $2,5 \mu\text{m}$, quedan retenidas en la superficie de la cámara, mientras que las restantes poseen la suficiente inercia como para continuar a través de un sistema de boquillas de diámetro específico, hacia un filtro colector. El equipo cuenta con una bomba de vacío, la cual se encuentra conectada a un sensor de masa, que permite no sólo seleccionar el flujo de aire al cual se realiza el muestreo, sino que también regula la potencia de la bomba para mantenerlo constante a través de todo el período de muestreo. Además, el muestreador tiene incorporado un cronómetro con el fin de contabilizar el tiempo total de muestreo. Muestreadores de aire de alto volumen se ubicaron en las estaciones MSJ-SJ y AS-BE.

-Muestreadores de aire de bajo volumen:

Adicionalmente, se utilizaron equipos portátiles (Minivol, marca Air Metrics) autónomos con batería que operan a un flujo de 5 litros por minuto. La separación de la fracción de $\text{PM}_{2.5}$ se realiza mediante un cabezal tipo impactor. La duración de cada muestreo es de 24 ± 2 horas. La calibración del flujo se realizó con un calibrador primario marca BIOS al inicio y finalización del muestreo. Para cada uno de los muestreos se tomaron registros de las condiciones de temperatura y presión atmosférica con la ayuda de un anemómetro (marca KESTREL modelo 5000), para posteriormente realizar las correcciones de volumen, a 1 atm de presión y 25°C de temperatura. Los muestreadores de bajo volumen se ubicaron en las estaciones ZR-MO, LU-SJ y REC-HE.

En la colección de las partículas con muestreadores de alto volumen, se utilizaron filtros de fibra de vidrio (marca Whatman CAT No 1829-932), dos veces por semana y filtros de cuarzo (Whatman CAT 1851-865), para el análisis posterior de metales en al menos una ocasión a la semana. Para el análisis de iones inorgánicos se utilizaron tanto las muestras colectadas en filtros de fibra de vidrio como en cuarzo, para un total de tres muestras semanales, mientras que para el análisis de metales, únicamente se emplearon los filtros de cuarzo (una muestra semanal).

Para el caso de los equipos de bajo volumen, dos veces a la semana se utilizaron filtros de membrana de teflón de 47 mm (tamaño nominal de poro de 2 μm) (Pall Corporation, Ann Arbor, MI, USA) para el análisis gravimétrico y una vez a la semana se colocaron filtros de cuarzo de 47-mm (Pallflex TYPE:Tissuquartz 2500QAT-UP, Clifton, NJ, USA) para el análisis de iones y metales pesados.

Todos los filtros (tanto para equipos de alto como de bajo volumen) se acondicionaron al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura 15-30°C y humedad menor al 40%, antes de ser pesados en balanza analítica, al inicio y después de cada uno de los muestreos.

El transporte de los filtros para equipos de alto volumen, al campo, se realizó en bolsas de plástico con cierre hermético, rotuladas con una etiqueta con el código asignado en el laboratorio, una vez acondicionado antes del muestreo. En el caso de los filtros para equipo de bajo volumen se utilizaron cajas petri Millipore como portafiltros. Los filtros fueron manipulados con guantes de nalgono, tanto durante el muestreo como en su análisis en el laboratorio.

Cada seis muestreos o cada cambio de caja de filtros, se traslado al campo un filtro acondicionado como blanco, dentro de una bolsa con cierre hermético, la cual fue abierta, el tiempo promedio que dura el muestreador en instalar el filtro, para la colección de las partículas y posteriormente fue trasladado de nuevo al laboratorio para su análisis. Lo anterior con el fin de evaluar posibles fuentes de contaminación del filtro durante el muestreo y así realizar las correcciones necesarias si fuese pertinente, restando las concentraciones de los blancos a las muestras.

Adicionalmente en cada sitio de muestreo, una vez a la semana, se colocaron filtros de cuarzo pretratados a 900°C durante al menos 5 horas antes de ser usados y guardados en caja petri Millipore (bajo volumen) o bolsas de cierre hermético (alto volumen), según corresponda, las cuales posteriormente se envolvieron en plástico adhesivo y papel aluminio. Antes y después del muestreo, estos filtros fueron transportados al laboratorio en hieleras a temperaturas menores a 4°C, para el posterior análisis del contenido de carbono presente en las partículas $\text{PM}_{2.5}$.

2.2. Caracterización química de partículas $\text{PM}_{2.5}$:

En los cuadros 8 y 9 se presentan las concentraciones medias, máximas y mínimas de los diferentes componentes mayoritarios y traza analizados en las muestras de partículas $\text{PM}_{2.5}$ colectadas en los diferentes sitios de muestreo ubicados en el gran área metropolitana de Costa Rica. Destacan las mayores concentraciones de partículas $\text{PM}_{2.5}$ en la zona industrial (AS-BE: 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) frente a los niveles muy inferiores registrados en la zona residencial (ZR-MO: 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, cuatro de los sitios de muestreo incumplen la norma anual de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y de México de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para este

contaminante. Cabe mencionar que la comparación se realiza con normativa internacional ya que el país no cuenta con norma para este contaminante dentro del decreto 30221-S.

Con el fin de realizar la reconstrucción de la masa de las partículas $PM_{2,5}$ en cada sitio de muestreo, se asumió que las partículas se pueden clasificar en 6 grandes grupos: iones secundarios, material crustal, carbono elemental, materia orgánica, aerosol marino y metales traza. Para realizar la reconstrucción de masa, se siguió el procedimiento recomendado por Chan et al. (1997). La suma de la concentración de sulfato, nitrato y amonio permitió calcular la fracción de iones secundarios. La materia orgánica se puede obtener multiplicando la concentración de carbono orgánico por 1,4. Este factor asume que la masa de materia orgánica contiene un 71% de carbono en peso y se utiliza para considerar el hidrógeno y el oxígeno no incluido durante el análisis de carbono.

La masa de material crustal se estima con base a las contribuciones de los óxidos de Al, Ca, Fe, Si, Ti, Mg y K de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Material crustal} = (1,89\text{Al} + 1,21\text{K} + 1,43\text{Ca} + 1,66\text{Mg} + 1,7\text{Ti} + 2,14\text{Si})$$

El silicio elemental se estimó multiplicando la concentración de Al por 3,41. El aporte del aerosol marino se determinó a partir de la suma de Cl⁻ y las fracciones de SO_4^{2-} , Na, Ca, K y Mg de origen marino. Estas fracciones se calcularon de la siguiente forma: $\text{Na}_{am} = 0,566\text{Cl}^-$, $\text{Ca}_{am} = 0,038 \text{Na}_{am}$, $\text{Mg}_{am} = 0,12 \text{Na}_{am}$, $\text{K}_{am} = 0,036 \text{Na}_{am}$, $\text{SO}_4^{2-}\text{am} = 0,252 \text{Na}_{am}$. Por último los metales traza se consideraron en forma de sus respectivos óxidos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Metales traza} = 1,47[\text{V}] + 1,29[\text{Mn}] + 1,27[\text{Ni}] + 1,25[\text{Cu}] + 1,08[\text{Pb}] + 1,31[\text{Cr}]$$

El aporte crustal a las partículas $PM_{2,5}$ incrementa desde 13-14% en zonas industriales y de alto flujo vehicular hasta 28% en la zona residencial (figura 2), lo anterior se puede deber a la existencia de una mayor proporción de terrenos no urbanizados en estas regiones, los cuales están sujetos a los procesos de resuspensión por acción del viento. El aporte del aerosol marino varía entre 2,5 a 5% para los sitios de muestreo presentando un comportamiento bastante regular. Lo anterior, evidencia que la contribución de este componente obedece más a fenómenos de escala regional. Los niveles de materia orgánica y carbono elemental (OM+EC) son máximos en REC-HE y AS-BE representando entre 53 y 56% de la masa total de partículas $PM_{2,5}$. Estos resultados muestran la importancia del aporte de los procesos de combustión a la composición de las partículas finas. Los metales traza representan la contribución más pequeña para todos los sitios de monitoreo.

Si se comparan los datos de $PM_{2,5}$ obtenidos con las mediciones simultáneas de PM_{10} de la red de monitoreo de la calidad del aire del gran área metropolitana de Costa Rica, en al menos cuatro de los sitios de monitoreo, se puede observar que las partículas $PM_{2,5}$ representan entre el 59 al

79% de las PM_{10} . Sin embargo al analizar los distintos componentes (figura 3) se puede observar que en el caso del sulfato, más del 90% de las partículas de este ion secundario son finas. Adicionalmente, los elementos metálicos traza como el vanadio y el níquel, presentan también granulometría básicamente fina, especialmente en zonas industriales y comerciales de alto flujo vehicular, ya que estos son emitidos en su mayoría por fuentes antrópicas como tráfico rodado, actividades industriales, procesos de combustión en fuentes fijas, etc.

En el caso del aluminio, el calcio y otros componentes mayoritarios asociados al material crustal, se encontraron principalmente granulometrías gruesas, con ratios $PM_{2,5}/PM_{10}$ inferiores o próximos a 0,50.

El análisis de $PM_{2,5}$ en las dos épocas (seca y lluviosa) permite conocer las variaciones estacionales de los diferentes componentes analizados. En la figura 4 se puede apreciar que las concentración de las partículas $PM_{2,5}$ resultan ser menores durante época seca (enero-abril) incrementando sus valores durante la época de lluvias (mayo-noviembre). Durante la época seca, la velocidad promedio de los vientos en el gran área metropolitana de Costa Rica aumenta como producto del incremento de los vientos alisios procedentes del Mar Caribe, situación que causa un ascenso en el potencial de remoción de contaminantes en la zona de estudio.

Cuadro 8. Concentraciones medias anuales, máximas y mínimas de los componentes mayoritarios en $PM_{2,5}$ en el gran área metropolitana de Costa Rica, año 2011.

$\mu g/m^3$	Heredia (REC-HE)			Belén (AS-BE)			Moravia (ZR-MO)			San José (LU-SJ)			San José (MSJ-SJ)		
	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min
N	66			70			68			75			64		
PM	30	90	7	31	99	14	11	37	6	28	58	7	24	42	13
OC	8,0	20,2	2,66	11,5	12,7	3,23	3,45	11,6	1,56	5,73	12,0	3,23	7,81	13,2	2,91
EC	6,29	14,6	0,40	4,32	3,48	1,28	1,37	3,96	0,35	4,5	7,35	1,78	2,77	2,61	1,24
F⁻	0,06	0,08	0,03	0,08	0,10	0,04	0,05	0,07	nd	0,04	0,07	0,03	0,07	0,10	0,04
Cl⁻	0,46	0,61	0,37	0,57	0,73	0,26	0,51	0,73	0,26	0,52	0,78	0,34	0,48	0,69	0,25
NO₂⁻	0,18	0,25	0,11	0,14	0,22	0,09	0,14	0,22	0,09	0,15	0,27	0,11	0,23	0,32	0,16
NO₃⁻	0,74	0,92	0,39	0,6	0,86	0,24	0,58	0,71	0,34	0,63	0,84	0,29	0,83	0,95	0,44

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Heredia (REC-HE)			Belén (AS-BE)			Moravia (ZR-MO)			San José (LU-SJ)			San José (MSJ-SJ)		
	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min	$\bar{y}$	Max	Min
PO_4^{3-}	0,4	0,51	0,19	0,53	0,68	0,21	0,24	0,38	0,11	0,31	0,45	0,16	0,54	0,67	0,26
SO_4^{2-}	3,52	4,89	1,55	3,81	4,24	1,30	3,15	4,07	1,30	3,34	4,76	1,42	3,82	4,72	1,61
NH_4^+	1,71	2,04	0,58	1,55	1,93	0,49	1,46	1,93	0,49	1,59	2,35	0,72	1,83	2,11	0,77
Ca	0,15	0,31	0,07	0,23	0,57	0,09	0,18	0,41	0,07	0,21	0,45	0,13	0,15	0,22	0,09
Mg	0,03	0,055	0,021	0,055	0,068	0,034	0,041	0,072	0,026	0,047	0,060	0,034	0,052	0,065	0,033
Na	0,67	0,76	0,30	0,66	0,81	0,40	0,55	0,84	0,27	0,61	0,74	0,40	0,57	0,69	0,34
K	0,45	0,60	0,34	0,39	0,71	0,18	0,43	0,65	0,29	0,36	0,53	0,27	0,4	0,65	0,17
Al	0,27	0,42	0,18	0,35	0,46	0,22	0,38	0,50	0,11	0,33	0,48	0,26	0,3	0,48	0,11
Fe	0,19	0,27	0,09	0,21	0,35	0,10	0,14	0,37	0,08	0,25	0,38	0,14	0,17	0,30	0,08

Valor máximo permisible USEPA: Promedio aritmético anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 9. Concentraciones medias anuales, máximas y mínimas de los componentes minoritarios en $\text{PM}_{2.5}$ en el Gran área metropolitana de Costa Rica, año 2011.

ng/m^3	Heredia (REC-HE)			Belén (AS-BE)			Moravia (ZR-MO)			San José (LU-SJ)			San José (MSJ-SJ)		
	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min
V	2,1	3,3	0,8	3,6	4,9	1,5	0,9	1,9	0,5	2,9	4,1	1,0	2,7	5,4	1,9
Cr	6,7	10,5	5,1	7,9	9,2	4,4	5,1	7,8	2,2	7,0	9,2	3,8	7,3	11,1	3,5
Cu	62	94	39	96	129	52	57	88	34	43	75	20	60	105	27
Ni	1,74	2,58	1,17	5,87	7,92	2,30	2,94	3,59	1,08	3,86	5,07	2,84	4,05	5,27	3,58
Pb	8,75	11,7	2,0	9,86	12,6	4,81	7,29	9,45	5,17	7,61	9,93	4,15	8,42	12,4	4,77
Mn	67	81	49	58	74	31	44	74	28	61	94	32	65	117	21

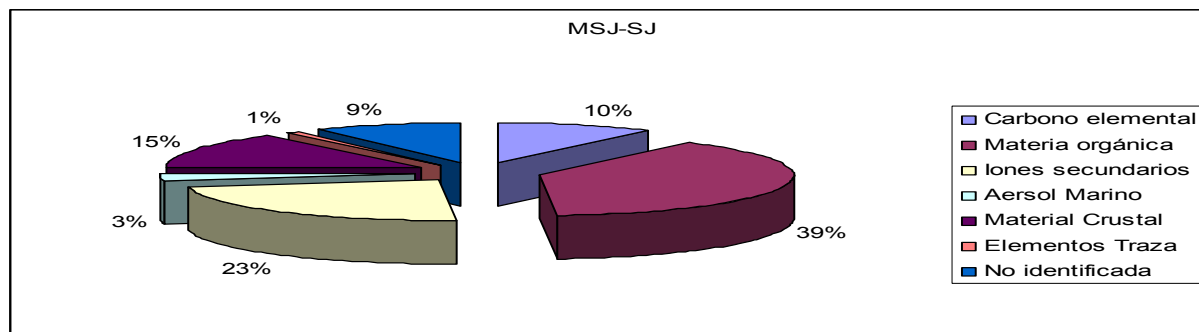
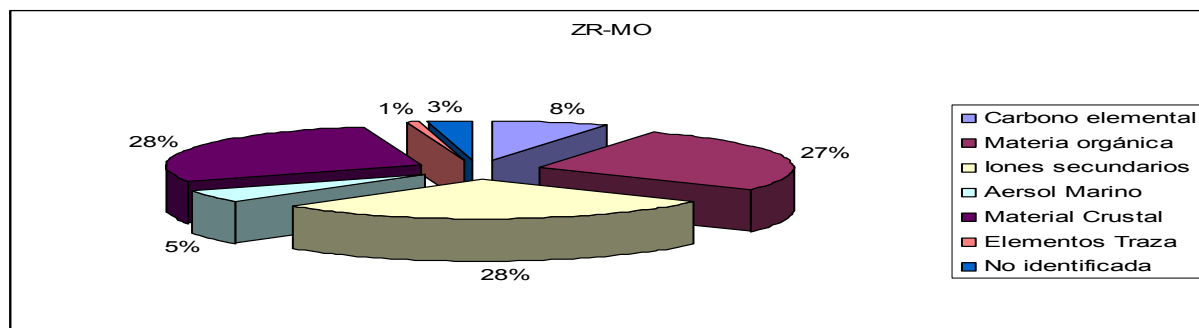
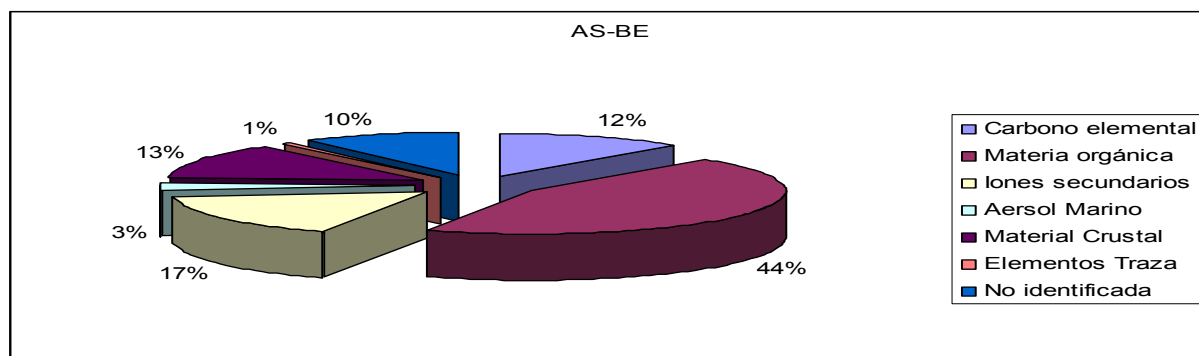
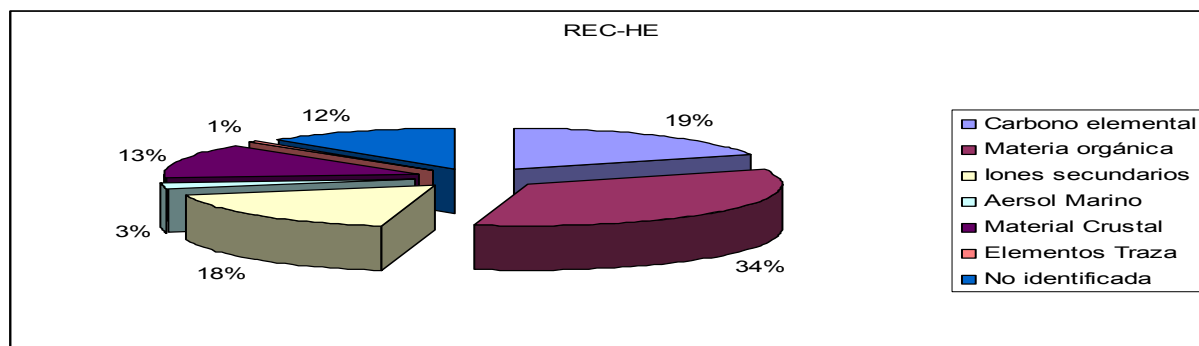


Figura 2. Composición media de las partículas $PM_{2.5}$ en cuatro sitios de monitoreo del gran área metropolitana de Costa Rica, 2011

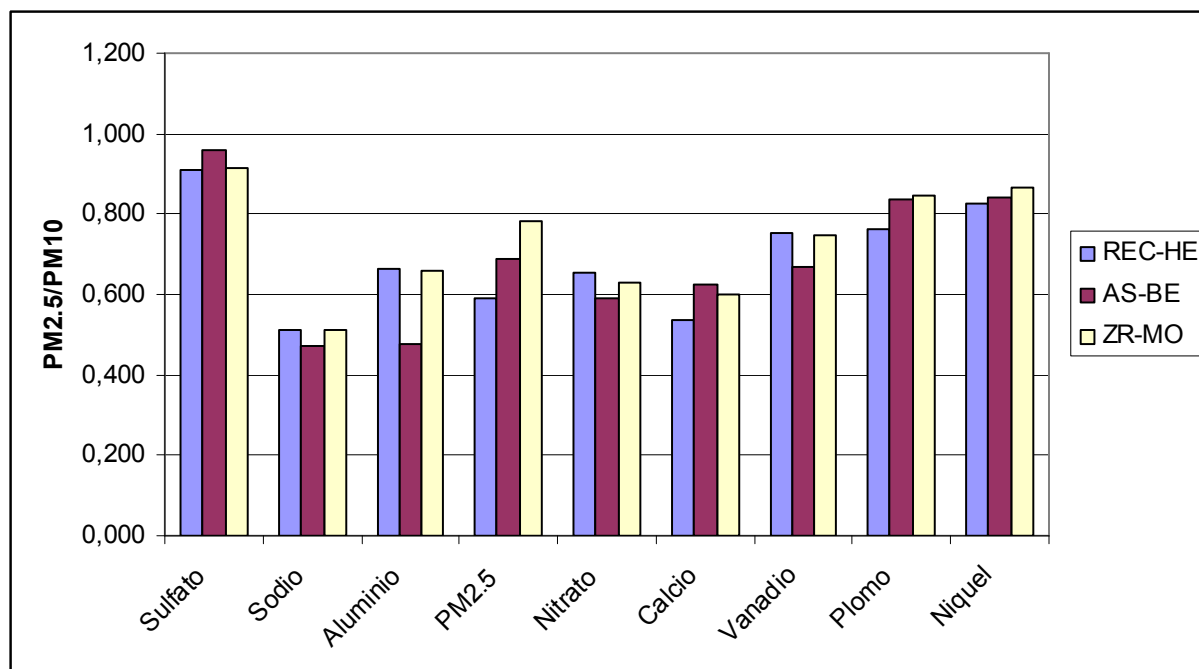


Figura 3. Ratios medios $PM_{2,5}/PM_{10}$ obtenidos para diferentes componentes mayoritarios y minoritarios en tres sitios de monitoreo del gran área metropolitana de Costa Rica

Durante la época lluviosa, los vientos alisios disminuyen su intensidad, y permiten el ingreso al área metropolitana de brisas del Pacífico (responsables de la generación de lluvias), causando un descenso en la velocidad del viento cercano al 38% con respecto a la época seca, desfavoreciendo el transporte de contaminantes a otras regiones. Se han seleccionado cuatro grupos de componentes con el fin de profundizar el análisis de la variación estacional de los distintos componentes de las $PM_{2,5}$: elementos asociados al material crustal (Al, Ca, Mg); componentes del aerosol marino (Na y Cl); compuestos inorgánicos secundarios (Sulfato, nitrato y amonio) y componentes asociados al tráfico rodado y/o procesos de combustión (OM + EC, V, Cr, Ni). Durante la época lluviosa, los vientos alisios disminuyen su intensidad, y permiten el ingreso al área metropolitana de brisas del Pacífico (responsables de la generación de lluvias), causando un descenso en la velocidad del viento cercano al 38% con respecto a la época seca, desfavoreciendo el transporte de contaminantes a otras regiones. Se han seleccionado cuatro grupos de componentes con el fin de profundizar el análisis de la variación estacional de los distintos componentes de las $PM_{2,5}$: elementos asociados al material crustal (Al, Ca, Mg); componentes del aerosol marino (Na y Cl); compuestos inorgánicos secundarios (Sulfato, nitrato y amonio) y componentes asociados al tráfico rodado y/o procesos de combustión (OM + EC, V, Cr, Ni).

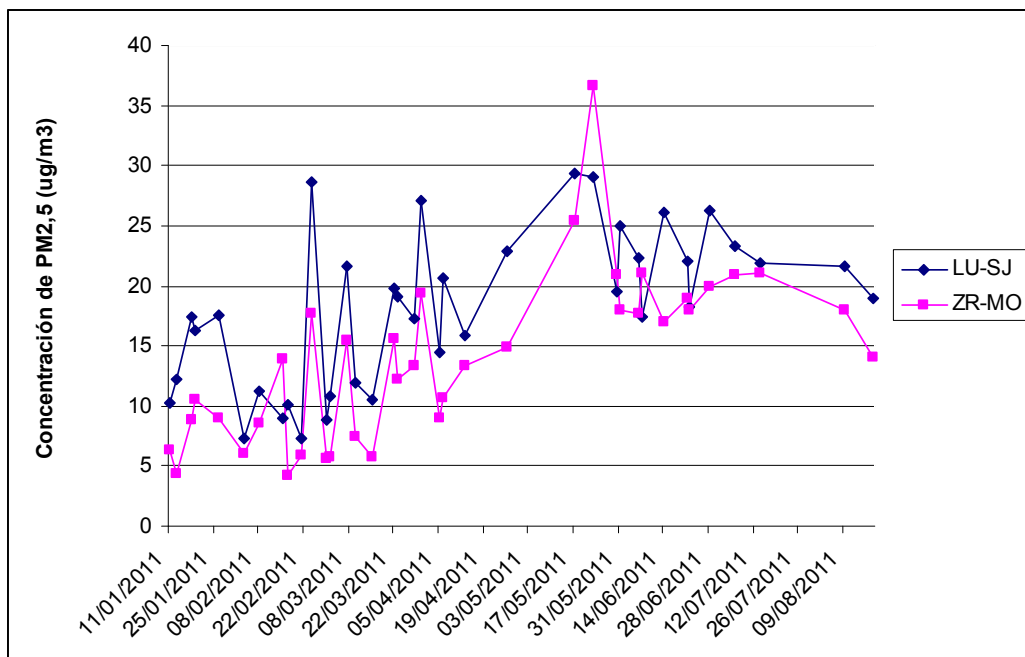


Figura 4. Variación estacional de la concentración de $PM_{2,5}$ registradas en las estaciones de monitoreo LU-SJ y ZR-MO de enero-agosto 2011.

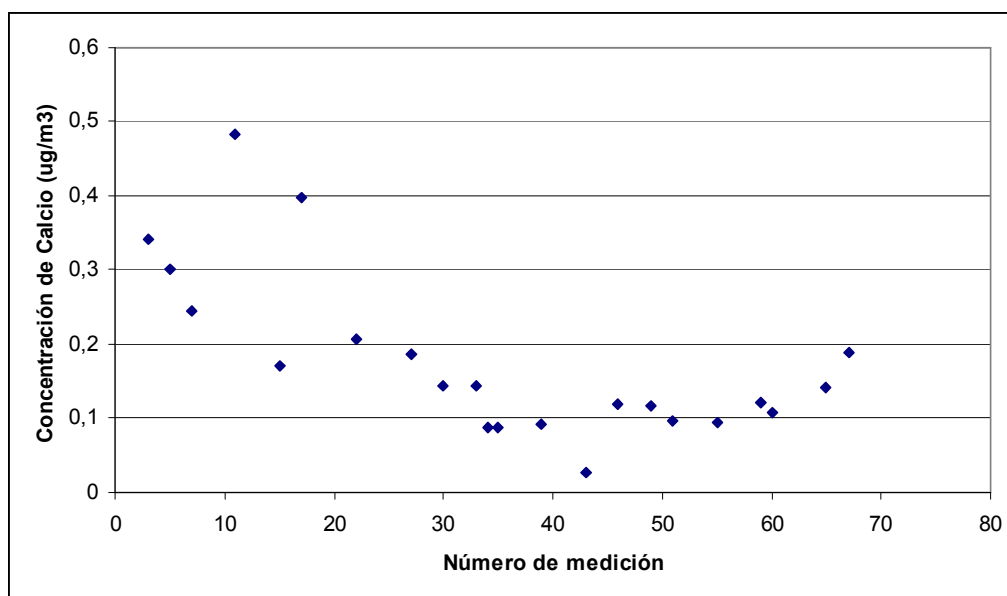


Figura 6. Variación temporal de la concentración de Calcio en partículas $PM_{2,5}$ colectadas en el sitio de muestreo REC-HE (enero-agosto 2011)

Material crustal: se han considerado el Al y Ca como los componentes más representativos de esta categoría. En la figura 5 se muestra la variación de la concentración de estos dos componentes durante enero – agosto 2011. Al analizar la tendencia presentada, se puede inferir que durante época seca existen mayores concentraciones debido al incremento en los procesos de resuspensión desde el suelo como consecuencia de la ausencia de precipitaciones, la reducción de la cobertura vegetal, la mayor insolación y la presencia de vientos alisios provenientes del Mar Caribe.

Aerosol marino: En general se observan concentraciones de Na y Cl mayores durante la época seca (enero-abril) (figura 6). Estos máximos niveles podrían relacionarse con la mayor intensidad y frecuencia de vientos en esta época del año, los cuales pueden penetrar a una mayor distancia hacia el interior en el Área Metropolitana, transportando consigo aerosoles de origen marino.

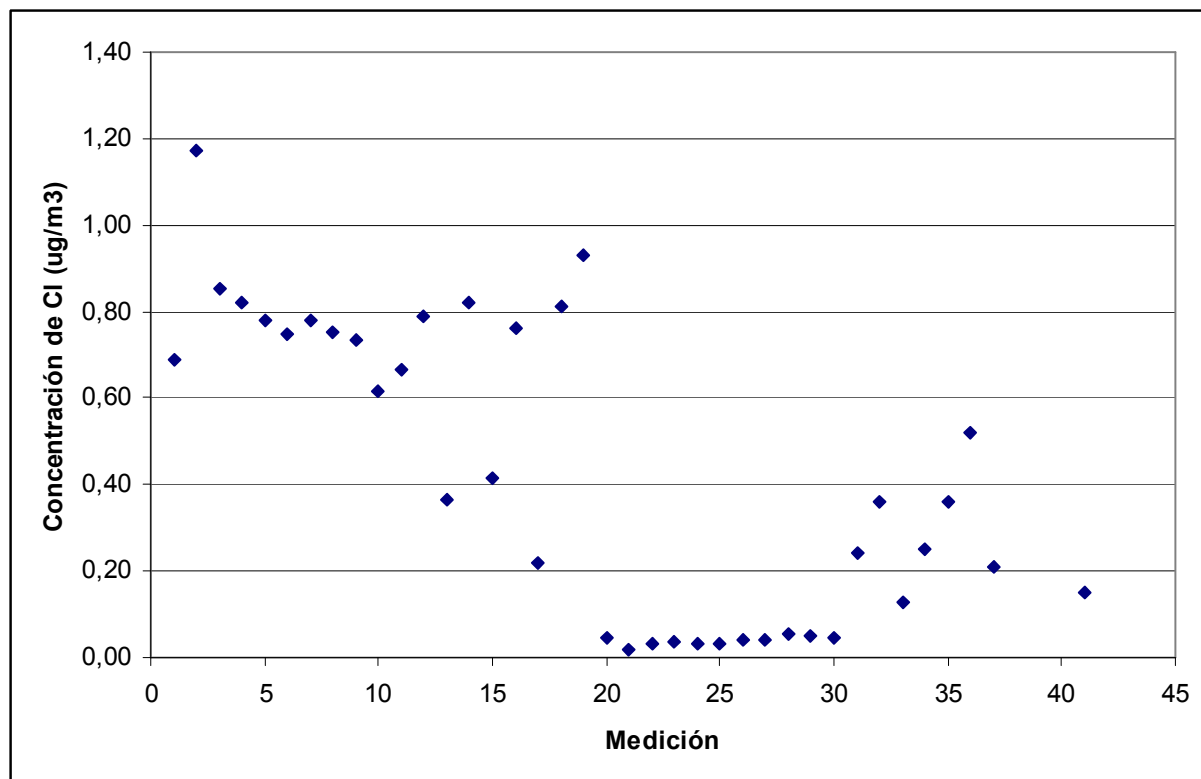


Figura 6. Variación temporal de la concentración de Cloruro en partículas $PM_{2.5}$ colectadas en el sitio de muestreo REC-HE (enero-agosto 2011)

Compuestos inorgánicos secundarios: Los niveles de sulfato presentes en partículas $PM_{2,5}$ muestran picos de concentración durante época seca (figura 7), los cuales se deben posiblemente a la mayor velocidad de transformación fotoquímica del SO_2 a SO_4^{2-} generada por la presencia de mayores niveles de radiación solar. Sin embargo, no se presentan una diferencia significativa con respecto a la época lluviosa, debido en mayor medida a la menor renovación de la atmósfera a escala regional, en estos meses.

El nitrato presenta un comportamiento bien definido, donde no se cumple la tendencia esperada de bajos niveles en época seca provocados por la inestabilidad termodinámica del NH_4NO_3 , lo que hace presumir que una buena parte del nitrato se encuentra formando $Ca(NO_3)_2$ y $NaNO_3$, ya que tanto las concentraciones de Ca y Na son mayores en esta época del año.

Componentes asociados al tráfico rodado y a otros procesos de combustión: el OM+EC en entornos urbanos procede mayoritariamente del tráfico rodado (Allen et al., 2001; Sternbeck et al., 2002), pero se relaciona también con otros procesos de combustión (industria, producción de energía, quema de biomasa, etc) y emisiones residenciales y domésticas.

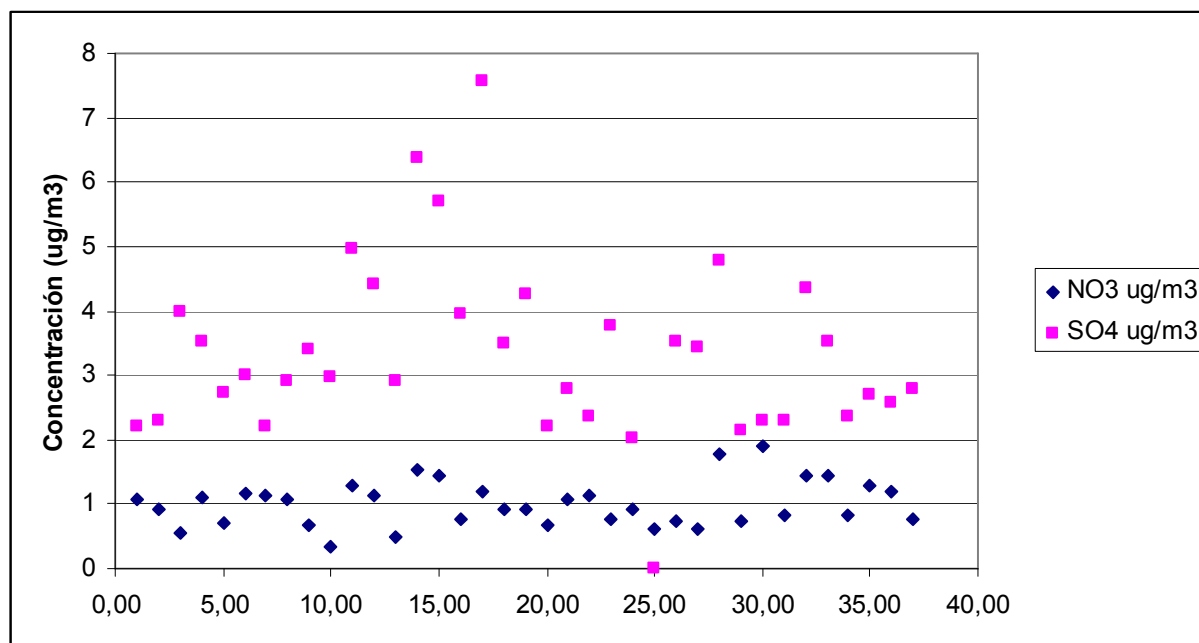


Figura 7. Variación temporal de la concentración de sulfato y nitrato en partículas $PM_{2,5}$ colectadas en el sitio de muestreo REC-HE (enero-agosto 2011)

El Cr y V pueden estar contenidos como impurezas en el bunker, y por lo tanto relacionarse con la combustión de esta sustancia (Harrison et al., 1996), aunque el Cr se asocia también a procesos industriales y elementos de desgaste mecánico en los vehículos, y por tanto su origen en entornos urbanos se relaciona principalmente con el tráfico rodado. La tendencia estacional que presenta el OM+EC (figura 8) registra picos durante época seca debido a la ocurrencia de mayores temperaturas que incrementan las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, en estado gaseoso que pueden participar en procesos de conversión de gas-partícula y que contribuyen a la fracción de OM. Adicionalmente se presentan otros picos, cercanos al mes de Julio, donde se da la ocurrencia de un período importante de ausencia de lluvias e incremento de temperaturas.

En el caso del Cr, se presentan niveles mayores en época lluviosa generados por el descenso en la velocidad de los vientos en el Área Metropolitana, la cual reduce la capacidad de remoción de los contaminantes generados por fuentes móviles en este período.

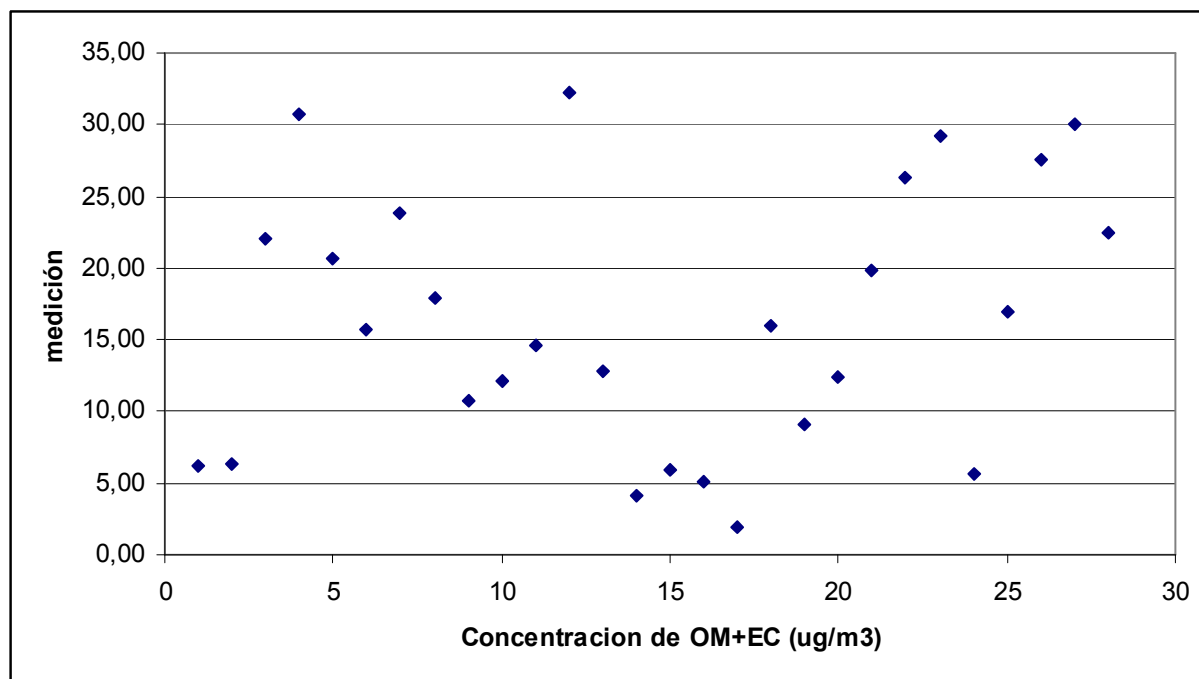


Figura 8. Variación temporal de la concentración de OM+EC en partículas PM_{2,5} colectadas en el sitio de muestreo REC-HE (enero-agosto 2011)

2.3. Carbono Orgánico y Elemental:

Tal como se puede observar en el cuadro 8, las máximas concentraciones de carbono orgánico y elemental se presentan en el sitio de muestreo AS-BE, el cual se ubica en una zona industrial que adicionalmente posee un importante flujo vehicular. Concentraciones medianamente altas se obtuvieron en zonas comerciales de alto flujo vehicular como es el caso de REC-HE y MSJ-SJ.

Del contenido total de carbono presente en las partículas, el carbono elemental representa entre el 21% para el caso de la zonas residenciales (ZR-MO) hasta un 48% en las zonas industriales y comerciales (LU-MSJ y AS-BE), esto evidencia el impacto de flujo vehicular en estos últimos sitios, ya que el carbono elemental es considerado un trazador de las emisiones primarias generadas a partir de fuentes móviles (Turpin and Huntzicker, 1995; Salma et al., 2004).

De acuerdo con el protocolo IMPROVE utilizado en el análisis de OC y EC, el contenido de carbono en muestras de partículas puede ser separado térmicamente en 7 fracciones (OC1, OC2, OC3, OC4, EC1, EC2, EC3) más una fracción de carbono pirolizado (OP) la cual se detecta en forma óptica. El protocolo IMPROVE define OC como $OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC$ y EC como $EC1 + EC2 + EC3 - OPC$. Los porcentajes de las ocho fracciones presentes en las muestras de partículas PM_{2,5} colectadas en el Gran área metropolitana de Costa Rica se presentan en la figura 9. Tal como se puede observar en dicha figura, el porcentaje más alto de OC1 se encuentra en el sitio localizado en la zona industrial (AS-BE), ya que esta fracción esta asociada al aporte de emisiones importantes de compuestos orgánicos volátiles.

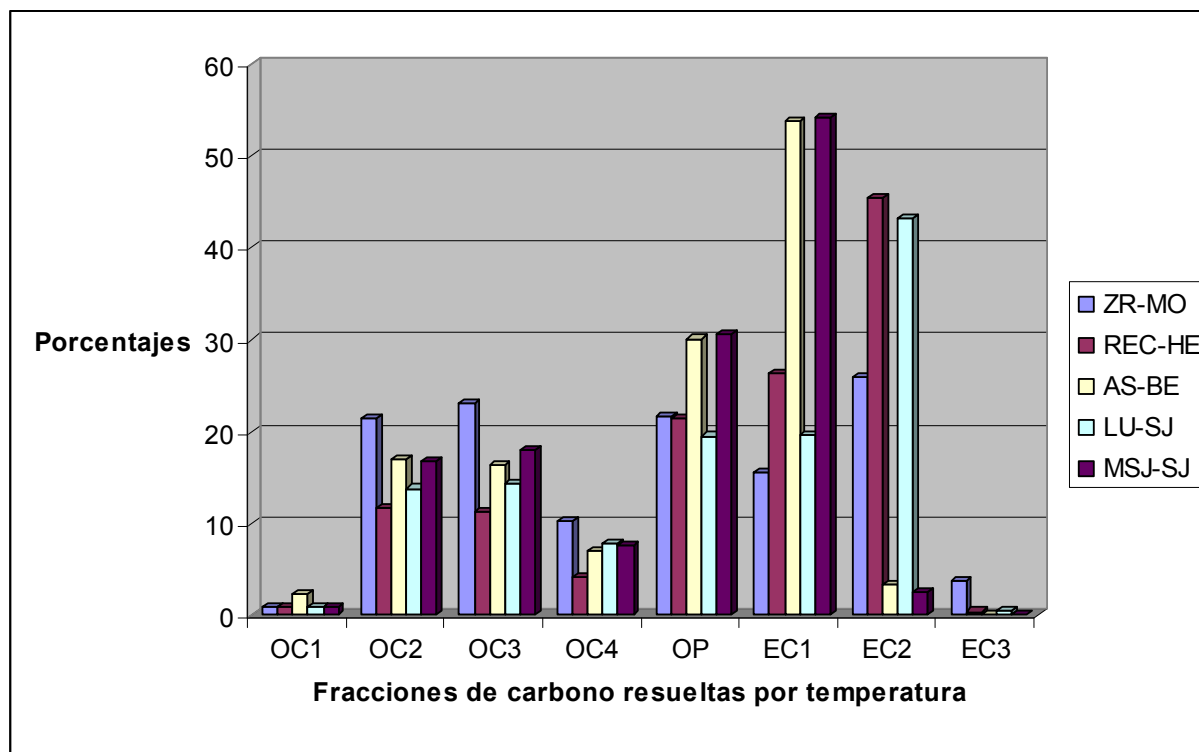


Figura 9. Abundancias relativas de las fracciones térmicas de carbono en las partículas PM_{2,5} colectadas en el Gran área metropolitana de Costa Rica.

Es posible definir una clara diferencia entre el sitio ubicado en la zona residencial (ZR-MO) con el resto de los sitios de muestreo, ya que en este prevalecen altas fracciones de OC2, OC3, EC1 y EC2, patrón que está asociado a las emisiones generadas por vehículos que operan tanto con gasolina como diesel de acuerdo con Cao et al., 2005.

Para los restantes sitios, las fracciones OC3, EC1 y EC2 presentan los mayores porcentajes de contribución al carbono total, indicando la influencia tanto de emisiones vehiculares como las generadas por la quema de combustible pesados como bunker en fuentes fijas. La presencia en todos los sitios de monitoreo de porcentajes altos de la fracción OP señala la importancia de la contribución de las especies de carbono solubles en agua como indicador de una importante ocurrencia de procesos secundarios de formación de partículas (Watson, 2002).

Debido a su carácter predominantemente primario, el carbono elemental puede ser utilizado como un trazador primario de carbono orgánico en partículas PM_{2,5}, si se conoce la relación entre el

OC/EC para cada una de las fuentes de emisión y la contribución de cada una de ellas en la zona de estudio.

El origen de las partículas carbonáceas puede ser estimado en base a la relación entre OC y EC. Relaciones de OC/EC que presenten valores mayores a 2 han sido utilizadas para identificar la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOC) (Chow et al., 1993). El cuadro 10 muestra que el promedio de las relaciones OC/EC obtenidos para los cinco sitios de muestreo en el Área Metropolitana se encuentran comprendidos entre 1,29-2,84, donde únicamente para REC-HE se puede hablar de que no se presentan procesos importantes de formación de aerosoles orgánicos secundarios.

Cuadro 10. Niveles de SOC y SOA en las partículas PM_{2.5} del Gran área metropolitana de Costa Rica.

Sitio de muestreo	Relación OC/EC	SOC (µg/m ³)	POC (µg/m ³)	SOA (µg/m ³)
REC-HE	1,29	2,21	5,88	3,54
ZR-MO	2,52	1,78	1,67	2,84
LU-SJ	2,21	3,42	3,31	5,47
MSJ-SJ	2,84	4,57	3,24	7,31
AS-BE	2,60	6,98	4,52	11,17

La importancia de los aerosoles orgánicos secundarios ha sido reconocida por décadas por su contribución en relación con afectaciones a la visibilidad, el clima y la salud humana. Sin embargo, todavía existen dificultades para determinar que porción del carbono orgánico tiene un origen secundario. Un método indirecto para estimar la concentración de carbono orgánico secundario, ha

sido utilizar el carbono elemental como un trazador de carbono orgánico primario, debido a que el EC es esencialmente emitido por fuentes de combustión (Turpin and Huntzicker, 1995), mediante la siguiente ecuación:

$$SOC = TOC - EC \times (OC/EC)_{\text{primario}}$$

Donde (OC/EC) primario es la relación para las fuentes primarias que contribuyen a la concentración ambiental de material particulado. Sin embargo, la relación primaria de OC/EC en la mayoría de las ocasiones es difícil de conocer ya que es afectada por muchos factores como el tipo de fuente de emisión así como la variación temporal y espacial en las emisiones de la misma, temperatura ambiental, método empleado para la medición de la concentración de carbono, etc. Debido a lo anterior se suele utilizar una aproximación de $(OC/EC)_{\text{primario}}$ como el mínimo valor de $((OC/EC)_{\text{min}})$ obtenido en las muestras ambientales analizadas de acuerdo con lo sugerido por Castro et al. (1999).

El promedio de las concentraciones SOC en las muestras de partículas $PM_{2.5}$ fueron mayores para la zona industrial (AS-BE) y las zonas urbanas de alto flujo vehicular representando más del 50% de la concentración total de carbono orgánico.

2.4. Contribución de las fuentes:

La identificación de las diferentes fuentes de emisión que contribuyen a incrementar los niveles de $PM_{2.5}$ es uno de los principales objetivos derivados del estudio de la composición química de las partículas. En este caso se han aplicado dos técnicas basadas en modelos de receptores: PCA y PMF, a la matriz de resultados experimentales, que han permitido identificar las principales fuentes de material particulado en cada uno de los emplazamientos de estudio. Algunos de los componentes analizados no se han introducido en el análisis de componentes principales debido a que la

concentración media diaria que registran en muchas ocasiones es próxima o inferior al límite de detección del método.

Los diferentes factores identificados mediante la aplicación del análisis de componentes principales a las matrices de datos experimentales y los factor loadings asociados a cada uno de los componentes químicos se presentan en el cuadro 11.

Cuadro 11. Factores identificados en PM_{2,5} mediante PCA en AS-BE, mostrando los factor loadings asociados a cada componente químico para cada uno de los factores y el porcentaje de varianza explicado.

	Crustal	Industrial	Marino	Combustión de Búnker	Tráfico Vehicular y polvo resuspendido	Partículas secundarias
OC	0,217	0,551	0,007	0,347	0,621	0,587
EC	0,134	0,034	0,032	0,199	0,764	0,116
SO₄²⁻	0,084	0,129	-0,001	0,087	0,388	0,647
NO₃⁻	0,102	0,227	0,112	0,110	0,263	0,782
NH₄⁺	0,055	0,083	0,066	0,077	0,146	0,675
Cl⁻	0,201	-0,001	0,937	0,001	0,011	0,001
Na	0,023	0,007	0,856	-0,023	-0,023	-0,042
K	0,127	0,013	0,734	0,019	0,000	0,132
Ca	0,874	0,047	0,604	0,105	0,039	0,098

	Crustal	Industrial	Marino	Combustión de Búnker	Tráfico Vehicular y polvo resuspendido	Partículas secundarias
Mg	0,796	0,101	0,620	0,088	0,306	0,032
Al	0,881	0,173	0,023	0,208	0,105	0,198
Fe	0,835	0,087	0,110	-0,077	0,697	0,103
V	0,011	0,122	0,000	0,744	0,109	0,001
Ni	-0,127	0,698	0,016	0,916	0,233	0,032
Cr	-0,085	0,783	0,097	0,805	0,421	0,026
Cu	0,003	0,201	0,023	0,397	0,702	-0,087
Mn	0,456	0,139	0,139	0,042	0,338	0,132
Pb	0,122	0,653	0,011	0,340	0,200	0,034
%	11,5	10,1	9,7	18,5	21,2	15,6

El primer factor identificado corresponde al aporte crustal, determinado por la presencia de Al, Ca, Mg y Fe. Este factor representa los aportes crustales de origen natural (resuspensión de polvo) y de origen antrópico (resuspensión de polvo de carretera ocasionada por el tráfico rodado, material mineral procedente de trabajos de construcción demolición, descarga de materiales en construcciones, etc). La varianza que representa este factor alcanza 11,5% en zonas industriales, 14,5 y 16% en zonas residenciales y comerciales de alto flujo vehicular del área metropolitana, respectivamente.

El segundo factor corresponde al aerosol marino reconocido por sus trazadores más importantes Na y Cl. La varianza explicada por este componente se mantiene más o menos constante en las tres diferentes clases de zonas, con aportes entre 9,7 y 11%.

Un tercer factor consiste principalmente de la contribución de aerosoles secundarios de sulfato, nitrato y amonio, incluyendo una importante participación de aerosol secundario. El porcentaje de varianza explicado por este factor se hace más importante en zonas comerciales y residenciales donde alcanza valores superiores a 24%

El Factor tráfico se encuentra definido por componentes relacionados con emisiones primarias (OC+EC), partículas secundarias formadas a partir de los precursores gaseosos emitidos y el desgaste mecánico de elementos como frenos. Este factor presenta, un mayor porcentaje de varianza explicada en las zonas residenciales y comerciales, alcanzando 24 y 27% respectivamente.

Del análisis de PCA, se logra identificar un factor que están presente únicamente en la zona industrial, definido por la presencia de Ni, Cr, Pb y carbono orgánico. Estos elementos reflejan el aporte de las emisiones de procesos metalúrgicos o de industria química especializada de acuerdo con varios estudios realizados (Viana, 2003).

Por último, el factor relacionado con la combustión de Bunker, donde se incluye al Ni y el V como trazadores, explica alrededor del 18,5% de la varianza de los datos para el sitio de muestreo ubicado en la zona industrial, sin embargo su contribución decrece en zonas comercial a casi un 9% y no aparece como resultado del análisis en zonas residenciales del Área Metropolitana.

Una vez identificados los distintos factores mediante la aplicación de un análisis de componentes principales, se ha realizado la regresión multilíneal a partir de los valores medios diarios de PM_{2,5}. Ello permite cuantificar la contribución media diaria de cada una de las fuentes identificadas. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 10.

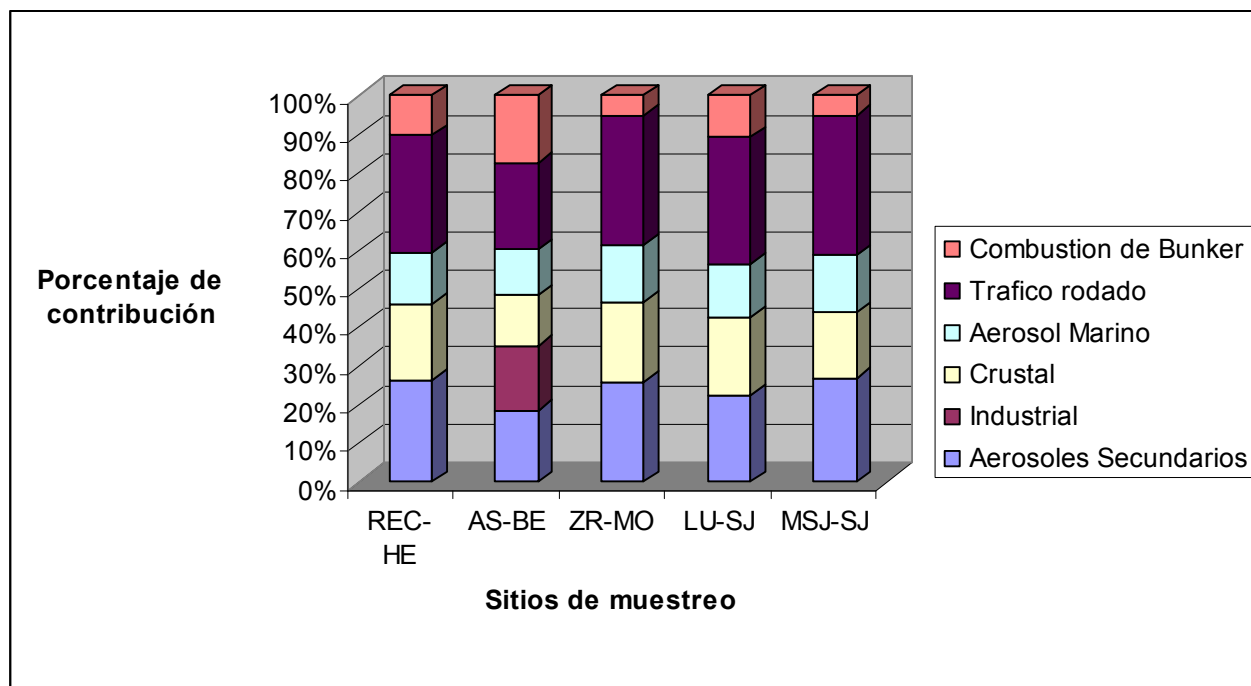


Figura 10. Contribución relativa de cada una de las fuentes identificadas que contribuyen a la composición química de las partículas PM 2,5 en el Gran área metropolitana de Costa Rica

3. Dióxido de Nitrógeno (NO₂):

3.1. Muestreo

Para el muestreo y análisis de las concentraciones de dióxido de nitrógeno en aire se utiliza el método pasivo, el cual tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas hasta repartirse uniformemente en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación. Debido a estos fenómenos, un dispositivo que responda al esquema representado en la figura 11, situado en un ambiente contaminado durante cierto tiempo, será capaz de incorporar sobre el material captador dispuesto en su interior una determinada cantidad del contaminante que será proporcional -entre otros factores- a la concentración ambiental del mismo (Ferm, 2001).

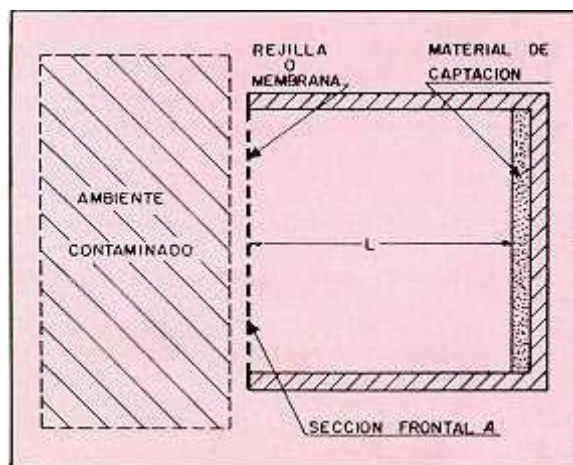
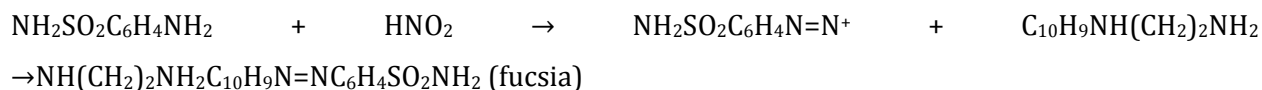


Figura 11. Esquema de un dispositivo para el muestreo pasivo de gases

Para la preparación de los colectores, se sumergen mallas de acero de 11 mm de diámetro (superficie de absorción) en una disolución formada a partir de la mezcla de trietanolamina con acetona (relación 1:8) durante al menos 24 horas. Una vez impregnadas con la disolución absorbente, las mallas se colocan en el interior de una tapa, la cual se acopla a un tubo colector de polipropileno (diámetro interno 9,5 mm y largo 7,4 cm) (figura 12). Los tubos se colocan en contenedores de PVC en grupos de 4 ó 6, con el fin de proteger los colectores. Los contenedores de PVC se ubican en postes del tendido eléctrico a una altura no menor a los 3 m con respecto al nivel del suelo. Los tubos se exponen en el sitio de muestreo por un plazo de 22 a 30 días para posteriormente ser trasladados al laboratorio para su análisis.

Una vez expuestos los tubos, se remueve la tapa y se colocan las mallas en un vial de vidrio 15 mL. Posteriormente se agregan 5 mL del reactivo de color (N- naftiletildiamina + sulfanilamida). Se tapa el frasco y se agita, dejando reposar un mínimo de 15 minutos. El dióxido de nitrógeno colectado en forma de NO_2^- , por medio de la reacción con la trietanolamina, reacciona con el reactivo de color de acuerdo con la siguiente ecuación química:



El producto de esta reacción es un compuesto coloreado fucsia cuya absorbancia es proporcional a la concentración. Tanto a las muestras como a una curva de calibración compuesta por seis disoluciones patrón de NO_2^- (0 a 1000 $\mu\text{g/L}$) preparadas a partir de la disolución madre de 1000

mg/l, se les mide la absorbancia a 542 nm. La masa de dióxido de nitrógeno colectada en cada tubo se determina por interpolación en la curva de calibración.

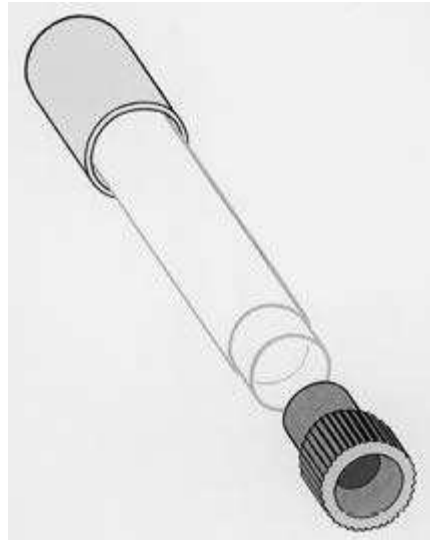


Figura 12. Diagrama de un tubo pasivo para el muestreo de Dióxido de Nitrógeno

3.2. Resultados

En el cuadro 12 se presentan los promedios anuales obtenidos para cada uno de los sitios de muestreo de dióxido de nitrógeno. Tal como se puede observar de los 25 sitios de monitoreo, al menos 9 presentan concentraciones superiores al criterio de la Organización Mundial de la Salud. Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo vehicular en donde se llegan a alcanzar excedencias de hasta un 45% con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 12 y 10% para sitios comerciales e industriales respectivamente. Es importante indicar que esta tasa es ligeramente menor a la registrada en años anteriores donde se registraban incrementos de hasta 15% para zonas comerciales de alto flujo vehicular.

Cuadro 12. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno (NO₂) registrados para los sitios de monitoreo ubicados en el Gran área metropolitana de Costa Rica, 2011.

	Cantón	Sitio de muestreo	Tipo de sitio	Promedio Anual (µg/m ³)
1	San José	Hospital San Juan de Dios	Comercial	55
2	San José	Catedral Metropolitana, Avenida Segunda	Comercial	43
3	San José	150 m norte de la Antigua Estación al Pacífico	Comercial	29
4	San José	Bomba La Castellana, Avenida 10	Comercial	42
5	San José	Barrio Lujan, Antigua Dos Pinos	Residencial	26
6	San José	MINAET, Barrio Francisco Peralta	Residencial	26
7	San José	Barrio La Cruz	Residencial	21
8	San José	Edificio de AyA sobre avenida 10	Comercial	29
9	San José	Costado Sur, Tribunal Supremo de Elecciones	Comercial	20
10	San José	Iglesia Santa Teresita	Comercial	23
11	San José	Edificio JAPDEVA	Comercial	40
12	San José	Barrio México	Comercial	26
13	San José	Parque El Salvador, Barrio Pithaya	Comercial	29

	Cantón	Sitio de muestreo	Tipo de sitio	Promedio Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
14	San José	Barrio Cuba	Industrial	41
15	Belén	Antiguo Hotel Herradura	Comercial	42
16	Belén	Costado sur plaza La Asunción	Comercial	44
17	Belén	Residencial Cariari	Residencial	19
18	Belén	Costado norte de la Firestone	Industrial	31
19	Belén	Frente al Hotel Marriot	Residencial	25
20	Belén	Frente Iglesia católica La Ribera	Residencial	24
21	Belén	Parque Recreativo Ojo de Agua	Comercial	28
22	Belén	Costado norte Municipalidad de Belén	Comercial	42
23	Belén	Polideportivo Belén	Residencial	20
24	Belén	Cruce Belén-Santa Ana	Comercial	40
25	Belén	Antigua Kimberly Clark	Residencial	19

4. Depositación Total

Los gases y partículas contaminantes que son emitidos a la atmósfera por fuentes de combustión, como las emisiones vehiculares y las emisiones industriales, inclusive los procesos naturales como las emisiones volcánicas e incendios forestales, contienen concentraciones importantes de óxidos de nitrógeno y azufre que al reaccionar con el agua atmosférica producen compuestos ácidos como

el ácido nítrico y el ácido sulfúrico. Estos compuestos pueden depositarse sobre la superficie de la tierra, ya sea por vía seca o húmeda.

En ausencia de lluvia, los compuestos ácidos pueden adherirse a las partículas de polvo o humo, para luego depositarse sobre el suelo, edificios, casas, automóviles y árboles. Estas partículas pueden ser removidas de estas superficies por la lluvia, y el agua del escurrimiento forma una mezcla aún más ácida.

La deposición húmeda ocurre cuando los contaminantes en el aire son arrastrados hasta áreas o regiones donde el clima es húmedo, los ácidos se disuelven en el agua presente en la atmósfera y son acarreados hacia el suelo por la lluvia, la nieve, la niebla o el rocío. Debido a que esta agua ácida se deposita en varios tipos de superficies, puede tener un impacto directo en la vegetación y los animales acuáticos. Los efectos que tiene en el medio ambiente dependen de factores como: el grado de acidez del agua, la cantidad de lluvia, la composición y capacidad amortiguadora de los suelos afectados.

En condiciones naturales el agua de lluvia tiene un pH de 5.6, lo que la hace ligeramente ácida debido a la presencia de pequeñas cantidades de dióxido de carbono existentes en la atmósfera que reaccionan con el agua formando ácido carbónico, ambos compuestos se encuentran en equilibrio químico en una reacción reversible. Cuando el agua de lluvia tiene un pH menor a este valor se le conoce como lluvia ácida. La lluvia ácida no tiene un impacto directo sobre la salud humana, sin embargo, si tiene un efecto grave en los ecosistemas al modificar la composición del suelo y el agua.

4.1. Muestreo:

Se seleccionaron un total de 8 sitios de muestreo distribuidos en tres municipios del área Metropolitana: San José, Heredia y Belén, los cuales se detallan en el cuadro 13. En los sitios seleccionados, el muestreo de la precipitación total se efectuó a través de un embudo de polietileno de 20 cm de diámetro, acoplado a una botella de polietileno de alta densidad de un litro mediante un orificio en la tapa, rellenando el espacio libre, entre el embudo y la tapa, con silicona caliente, para evitar la contaminación de la muestra (figura 13). El sistema de muestreo se encuentra sostenido por una base de metal de 1,25 m de altura, para prevenir la contaminación del sistema por salpicaduras. El colector utilizado cumple con las especificaciones recomendadas por Galloway et al. (1982) y permite captar la precipitación húmeda más algunos componentes introducidos al colector en forma seca.

Cuadro 13. Descripción de los sitios de muestreo para la colección de precipitación total en el Gran área metropolitana de Costa Rica.

Identificación del sitio de muestreo	Provincia	Cantón	Distrito	Descripción del sitio de muestreo
BN-SJ	San José	Central	Carmen	Biblioteca Nacional
MSP-SJ	San José	Central	Catedral	Ministerio de Seguridad Pública
SP-SJ	San José	Central	Hospital	Sección de Parques Municipalidad de San José
MSJ-SJ	San José	Central	Hospital	Edificio central Municipalidad de San José
ICE-SJ	San José	Central	Mata Redonda	Instituto Costarricense de Electricidad
REC-HE	Heredia	Central	Central	Rectoría, Universidad Nacional
ZI-BE	Heredia	Belén	Asunción	Zona Industrial
CCLR-BE	Heredia	Belén	La Ribera	Centro Comercial La Ribera

En cada sitio de muestreo se colocó un dispositivo para captura de precipitación. Tanto el embudo como la botella de colección para la precipitación total, utilizada en el análisis de iones, se lavaron con agua desionizada, entre muestreos. La colección de las muestras durante la campaña de muestreo se efectuó en períodos de 24 horas, durante los meses de mayo a noviembre del 2011. El número total de muestras colectadas fue de 495.

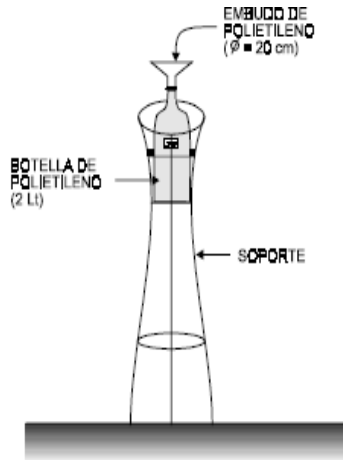


Figura 13. Diagrama del colector de precipitación total

4.2. Resultados:

En el cuadro 14 se muestran los resultados de la composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el área metropolitana durante el año 2011. Los valores presentados en dicho cuadro se encuentran ponderados por volumen utilizando los datos de precipitación diaria colectada.

Cuadro 14. Composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el Gran área metropolitana de Costa Rica, 2011.

	pH	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl- mg/l	F- mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l
San José	3,77	2,21	0,94	0,88	0,10	0,41
Heredia	3,82	2,32	0,75	1,12	0,08	0,49
Belén	3,95	2,11	0,83	0,93	0,08	0,44

Las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las muestras de precipitación total obedecen el siguiente orden: SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻. Los valores promedio ponderados por volumen de pH más ácidos, se registran en los sitios localizados en San José, los cuales se caracterizan por estar ubicados en zonas comerciales de alto flujo vehicular. Para estos cinco sitios

aproximadamente entre el 3-5% de los eventos presentan pH mayores a 5,6, que es el pH del agua de nube en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico (Charlson and Rodhe, 1982). Los sitios de muestreo localizados en zonas con menores tasas de flujo vehicular en la Ribera de Belén y Heredia presentan medias ponderadas de pH menos ácidas, en las cuales un 20-17% de los eventos mostraron valores mayores a 5,60.

Con el fin de estimar tanto la contribución marina como la procedente de otras fuentes a la composición química de la precipitación total, se calcularon varios cocientes como las fracciones de sal marina y los factores de enriquecimiento. Para poder calcular estas relaciones, se tomó el Na como elemento de referencia asumiendo que su origen es predominantemente marino (Kulshrestha et al., 1996).

El cuadro 15 muestra los cocientes de Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ y Ca^{2+} con respecto al Na^+ tanto para el agua de mar como la obtenida en las muestras de precipitación total, a partir del promedio de las muestras de todos los sitios de monitoreo. Solamente las relaciones con SO_4^{2-} y Ca^{2+} resultaron ser mayores que los cocientes reportados en la literatura, para el agua de mar. Estos valores mayores a lo esperado, pueden ser atribuidos a la contribución de fuentes antropogénicas y crustales. En forma similar, los valores elevados de los cocientes de estos componentes con respecto al Na^+ sugieren un origen diferente al marino.

Cuadro 15. Comparación de los cocientes de agua de mar con los componentes de la precipitación total.

	$\text{Cl}^- / \text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+$	K^+ / Na^+	$\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$
Cocientes en agua de mar	1,16	0,125	0,227	0,0218
Cocientes en precipitación total	0,057	0,255	0,049	0,182
Fracción proveniente de sal marina	100	46,2	100	14,1
Fracción proveniente de fuentes diferentes a la sal marina		53,8		85,9
Factor de enriquecimiento	0,05	2,04	0,23	6,75

Adicionalmente, se calcularon tanto la fracción de sal marina como la que no corresponde a ella, encontrando que solamente el K^+ y el Cl^- no presentan aportes de fuentes que no corresponden al

aerosol marino. Se determinaron los factores de enriquecimiento de las diferentes especies con respecto al Na utilizando la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{X / Na^{+} \text{ lluvia}}{X / Na^{+} \text{ agua de mar}},$$

donde X es el ion de interés.

CONCLUSIONES

1. Los valores de PM_{10} registrados en el Área Metropolitana tienden a estabilizarse con respecto a las concentraciones registradas en el año 2010, ya que sólo el 24% de los sitios de muestreo presentaron concentraciones significativamente menores con respecto al año anterior.
2. Los niveles de partículas $PM_{2,5}$ registrados en el Gran área metropolitana de Costa Rica, superan las normas anuales establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, mayoritariamente en sitios industriales y comerciales de alto flujo vehicular. En promedio este tipo de partículas esta representando entre el 65-70% de las partículas PM_{10} .
3. El carbono orgánico y elemental resultaron ser en la mayoría de sitios de medición, el principal contribuidor a la masa de $PM_{2,5}$. La mayoría de este carbono orgánico y elemental proviene mayoritariamente de emisiones vehiculares a partir de unidades con motores diesel y gasolina en zonas residenciales y comerciales, mientras que la combustión en fuentes fijas muestra una contribución importante para sitios industriales
4. En el Gran área metropolitana de Costa Rica, se presentan tasas importantes de formación de aerosoles orgánicos secundarios, de forma tal que de todo el carbono orgánico presente en las partículas menos del 40% corresponde a carbono orgánico primario.
5. Tanto las concentraciones másicas como la composición química de las partículas $PM_{2,5}$ presentan un patrón de variabilidad estacional bien definido, en donde los aportes crustales y de aerosol marino presentan sus máximos valores durante la época seca y disminuyen con la entrada de las brisas del Pacífico que son las encargadas de generar las lluvias durante los meses de mayo a noviembre.
6. Las principales fuentes que determinan la composición química de las partículas $PM_{2,5}$ son los aerosoles secundarios, el trafico rodado, el material cristal (polvo de suelo), aerosol marino, la quema de combustibles residuales y las actividades industriales. La contribución de cada uno de ellos varia dependiendo de la naturaleza del sitio de muestreo.
7. Existe una tendencia a incrementar el grado de acidificación de las muestras de precipitación total, ya que el número de eventos al año con pH inferior a 5,60 esta incrementado a una tasa de 16,5% anual en el período 2007-2011, razón por la cual se debe explorar más a fondo las causas de este fenómeno

8. Persiste el crecimiento en los niveles de dióxido de nitrógeno en sitios comerciales e industriales del Gran área metropolitana de Costa Rica, aunque la tasa de crecimiento para este año fue ligeramente menor en comparación con el período anterior

RECOMENDACIONES

Como producto del análisis de los resultados obtenidos se recomienda:

1. Desarrollar de políticas públicas relacionadas con el Transporte Público que incluyan entre otras:
 - Definición de estándares de eficiencia de combustión de las unidades de transporte público
 - Explorar la posibilidad de migración a otro tipo de combustibles que no sean el diesel
 - Definición de rutas o carriles de circulación en ciudades exclusivos para el Transporte Público de forma que se pueda incrementar las velocidades promedio de circulación
 - Capacitación a los choferes de unidades de transporte público en técnicas de conducción eficientes.
 - De acuerdo con la identificación de zonas con mayores concentraciones de contaminantes del aire se debe realizar un rediseño de rutas de circulación que permita descongestionar los sectores más problemáticos
2. Establecer un Programa Nacional de Mejora de Combustibles en donde se realice una calendarización de acciones a ejecutar para alcanzar metas de mejora sostenida en la calidad de combustibles como Búnker (contenido de azufre) y gasolinas (contenido de azufre, aromáticos, etc)
3. Revisar los máximos permisibles de contaminantes presentes en el aire incluidos en el decreto 30221-S, con el fin de incorporar valores de referencia para PM_{2,5} y readecuar los estándares para otros contaminantes como las partículas PM₁₀. Dichos cambios deben convertir el uso este decreto en una verdadera herramienta de planificación de la calidad del aire.
4. Fortalecer la red de monitoreo de calidad del aire de la GAM, con el fin de poder migrar de mediciones manuales de 24 horas a equipos de monitoreo automático que permitan analizar las variaciones temporales horarias en los niveles de concentración de contaminantes.
5. Actualizar el plan de gestión de calidad del aire de la GAM utilizando como punto de partida los resultados obtenidos en los monitoreos de calidad del aire y las actualizaciones de los inventarios de emisiones de contaminantes criterio de la GAM

6. Regular las importaciones de vehículos usados y favorecer fiscalmente el ingreso al país de unidades de alta eficiencia de combustión

REFERENCIAS

Arimoto R., R. A. Duce, D. L. Savoie, J. M. Prospero, R. Talbot, J. D. Cullen, U. Tomza, N. F. Lewis and B. J. Ray, 1996. Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during Pem-West A. *Journal Geophysical Research*, 101: 2011-2023.

Blando, J.D., Turpin, B.J., 2000. Secondary organic aerosol formation in cloud and fog droplets: a literature evaluation of plausibility. *Atmospheric Environment* 34, 1623–1632.

Brunekreef, B., Holgate, S.T., 2002. Air pollution and health. *Lancet* 360 (no. 9341), 1233-1242.

Chen. L.W.A.. Doddridge. B.G.. Dickerson. R.R.. Chow. J.C.. Henry. R.C.. 2002. Origins of fine aerosol mass in the Baltimore–Washington corridor: implications from observation. factor analysis. and ensemble air parcel back trajectories. *Atmospheric Environment* 36. 4541–4554

Cheng, M.T., Lin, Y.C., Chio, C.P., Wang, C.F., Kuo, C.Y., 2005. Characteristics of aerosols collected in central Taiwan during Asian dust event in spring 2000. *Chemosphere* 61, 1439–1450.

Chow, J. C., Watson, J. G., Kuhns, H. D., Etyemezian, V., Lowenthal, D. H., Crow, D. J. 2004. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational (BRAVO) study. *Chemosphere*, 54, 185–208.

Eberly S. 2005. EPA PMF 1.1 user's guide. Prepared by the U.S. Environmental Protection Agency. National Exposure Research Laboratory. Research Triangle Park. NC. June.

Frank, N.H., 2006. Retained nitrate, hydrated sulfates, and carbonaceous mass in Federal reference method fine particulate matter for six U.S. cities. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56, 500-511.

Fung, K.K., Chow, J.C., Watson, J.G., 2002. Evaluation of OC/EC speciation by thermal manganese dioxide oxidation and the IMPROVE method. *Journal of the Air & Waste Management Association* 52 (11), 1333-1341.

Henry, R.C., Norris, G.A., 2002. EPA UNMIX 2.3 User's Guide.

Hong, Y.M., Lee, B.K., Park, K.J., Kang, M.H., Jung, Y.R., Lee, D.S., Kim, M.G., 2002. Atmospheric nitrogen and sulfur containing compounds for three sites of South Korea. *Atmospheric Environment* 36, 3485-3494.

Jang, M., Czoschke, N.M., Lee, S., Kamens, R.M., 2002. Heterogeneous atmospheric aerosol production by acidcatalyzed particle-phase reactions. *Science* 298, 814-817.

Künzli, N., Mudway, I.S., Götschi, T., Tingming, S., Kelly, F.J., Cook, S., Burney, P., Forsberg, B., Gauderman, J.W., Hazenkamp, M.E., Heinrich, J., Jarvis, D., Norbäck, D., Losa, F.P., Poli, A., Sunyer, J., Borm, P.J.A., 2006. Comparison of oxidative properties, light absorbance, and total and elemental mass concentration of ambient PM_{2.5} collected at 20 European sites. *Environmental Health Perspective* 114 (5), 684-690.

Lewis, C.W., Norris, G.A., Conner, T.L., Henry, R.C., 2003. Source apportionment of Phoenix PM_{2.5} aerosol with the Unmix receptor model. *Journal of Air and Waste Management Association* 53, 325-338.

Lippmann, M., Chen, L.C., 2009. Health effects of concentrated ambient air particulate matter (CAPs) and its components. *Crit. Rev. Toxicol.* 39 (no. 10), 865-913.

Malm, W.C., Day, D.E., Carrico, C., Kredenweis, S.M., Collett, J.L., McMeeking, G., Lee, T., Carrillo, J., Schchtel, B., 2005. Intercomparison and closure calculations using measurements of aerosol species and optical properties during the Yosemite Aerosols characterization study. *Journal of Geophysical Research* 110.

Maykut. N.N.. Lewtas. J.. Kim. E.. Larson. T.V.. 2003. Source apportionment of PM_{2.5} at an urban IMPROVE site in Seattle. Washington. *Environmental Science and Technology* 37. 5135–5142

Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Salvador, P., Sánchez de la Campa, A., Artiñano, B., De la rosa, J., Gibbons, W., 2006. Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail. *Atmospheric Environment* 40, 6791–6803.

Paatero P. (1997) Least squares formulation of robust non-negative factor analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 37. 23-35.

Perrino, C., Canepari, S., Catrambone, M., Dalla Torre, S., Rantica, E., Sargolini, T., 2009. Influence of natural events on the concentration and the chemical composition of atmospheric particulate matter. *Atmospheric Environment* 43, 4766–47790

Polissar. A.V.. Hopke. P.K.. Poirot. R.L.. 2001. Atmospheric aerosol over vermont: chemical composition and sources. *Environmental Science and Technology* 35. 4604–4621

Pope 3rd. C.A.. Dockery. Douglas W.. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of Air & Waste Management Association* 56. 709–742.

Putaud, J.P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Herrmann, H., Hitzenberger, R., Hüglin, C., Jones, A.M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Kousa, A., Kuhlbusch, T.A.J., Löschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen, J., Perrino, C., Pitz, M., Pusbaum, H., Querol, X., Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Scheneider, J., Spindler, G., Ten Brink, H., Tursic, J., Viana, M., Wiedensohler, A., Raes, F., 2010. A European aerosol phenomenology-3: physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environment* 44, 1308–1320.

Ramadan, Z., Song, X.H., Hopke, P.K., 2000. Identification of sources of Phoenix aerosol by positive matrix factorization. *Journal of Air and Waste Management Association* 50, 1308–1320.

Seinfeld, J., Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New York.

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33, 241–265.

Shi Z., Shao, L., Jones T., & Lu S. 2005. Microscopy and mineralogy of airborne particles collected during severe dust storm episodes in Beijing, China. *Journal of Geophysical Research*. 110, D01303, doi:10.1029/2004JD005073.

Shi, Z., L. Shao, T. P. Jones, A. G. Whittaker, S. Lu, K. A. Berube, T. He, and R. J. Richards. 2003. Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air site in Beijing, *Atmospheric Environment*. 37, 4097– 4108

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33, 241–265.

Turpin, B. J., & Lim, H. J. (2001). Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol Science and Technology*, 35, 602–610.

Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Ballester, F., Llop, S., Esplugues, A., Fernandez-Patier, R., Garcia dos Santos, S., Herce, M.D., 2008. Characterizing exposure to PM aerosols for an epidemiological study. *Atmospheric Environment* 42. 1552–1568.

Watson, J.G., 2002. Visibility: science and regulation. *Journal of Air & Waste Management Association* 52. 628–713.