6

2013-2015

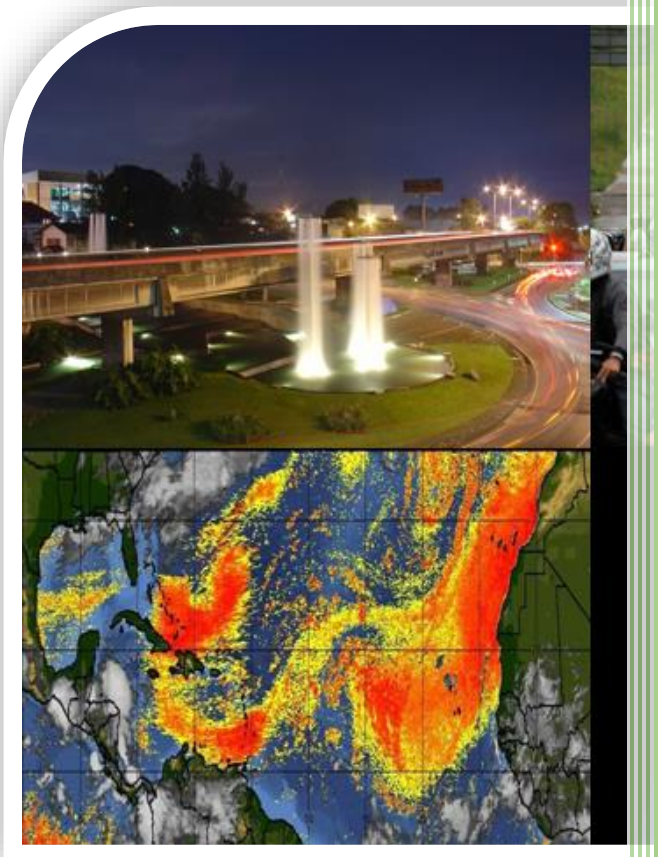
Informe de Calidad del Aire

ÁREA METROPOLITANA DE COSTA RICA

mopt
Ministerio de
Obras Públicas y Transportes

MINISTERIO DE SALUD
COSTA RICA
BIENESTAR Y SALUD PARA TODOS

minae



AD MELIORA
MUNICIPALIDAD
DE SAN JOSÉ

LABORATORIO DE ANÁLISI
UNIVERSIDAD NACIO

La UNA por la
MADRE TIERRA 2016

6

Informe de Calidad del Aire

ÁREA METROPOLITANA DE COSTA RICA

2013 - 2015

UNIVERSIDAD NACIONAL
MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA
MINISTERIO DE SALUD
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES
MUNICIPALIDAD DE SAN JOSÉ

DR. EDGAR GUTIÉRREZ E.

MINISTRO DE AMBIENTE Y ENERGÍA

DR FERNANDO LLORCA CASTRO

MINISTRO DE SALUD

ING. CARLOS VILLALTA VILLEGAS

MINISTRO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES

DR. ALBERTO SALOM ECHEVERRIA

RECTOR UNIVERSIDAD NACIONAL

ING. JONNY ARAYA MONGE

ALCALDE MUNICIPALIDAD DE SAN JOSE

ELABORACIÓN DEL INFORME

BQ. JEFF BRICEÑO CASTILLO

DR. JORGE HERRERA MURILLO

BQ. DAVID SOLÓRZANO ARIAS

BQ. VICTOR HUGO BEITA GUERRERO

LIC. JOSÉ FELIX ROJAS MARIN

LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL, UNIVERSIDAD NACIONAL

COLABORADORES EN LA OPERACIÓN DE LA RED DE MONITOREO

ING. EDUARDO RAMIREZ

LIC. CARLOS MURILLO

LIC. ELIZABETH GONZALEZ

DIRECCIÓN DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE HUMANO, MINISTERIO DE SALUD

AGRADECIMIENTOS

El monitoreo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Costa Rica se realiza gracias al financiamiento aportado por la Universidad Nacional, el Ministerio de Ambiente y Energía, el Ministerio de Salud y la Municipalidad de San José.

Se agradece al Observatorio Ambiental de la Municipalidad de Belén por el aporte de la información de la calidad del aire de dicho cantón para ser incluida en el presente informe.

De igual forma se reconoce el valioso aporte de las Municipalidades de Escazú y Alajuela al brindar la información de sus respectivos cantones para la inclusión en esta iniciativa.

La generación de resultados implica el análisis químico de los filtros de partículas PM_{10}, $PM_{2,5}$ y tubos de muestreo pasivo de dióxido de nitrógeno realizado por los siguientes profesionales del Laboratorio de Análisis Ambiental:
B.Q. Rodrigo Chinchilla M.,
Licda. Irene Sánchez V.,
B.L.Q. Eliana Valverde R.,
Licda. Hazel Argüello M.
MSc. María Chaves Villalobos

Se agradece a Los siguientes funcionarios del Ministerio de Salud y la Municipalidad de San José por el apoyo brindado en la recolección de muestras:
Ing. Eduardo Ramírez
Lic. Carlos Murillo
Lic. Elizabeth González
Lic. Edgar Herrera
Lic. Luis Fernando Fonseca

Las siguientes instituciones y empresas colaboraron con la custodia de los equipos de muestreo de alto volumen y el suministro eléctrico de los mismos:

Compañía Nacional de Fuerza y Luz (La Uruca),
Catedral Metropolitana,
Municipalidad de San José,
Registro Nacional,
Municipalidad de Escazú,
Centro Comercial La Ribera,
INCOFER (Ferrocarril Cartago),
MATRA, Santa Ana,
Universidad Técnica Nacional, Alajuela
Parque Industrial de Cartago,
EATON, Moravia.

PRESENTACIÓN

Las necesidades de desarrollo de infraestructura, los patrones de movilización en centros de población, la creciente actividad económica y la falta de planificación urbana son solo algunos de los factores de presión que están originando la emisión de importantes cantidades de contaminantes al aire en aquellos países que se encuentran en vías de desarrollo. El estado de la calidad del aire en un determinado centro urbano es resultado de una serie de factores tales como el relieve, las condiciones meteorológicas, la estabilidad atmosférica, las emisiones derivadas de los usos y costumbres de la población, el tipo de actividades económicas desarrolladas y la tecnología utilizada en ellas.

En Costa Rica las principales actividades comerciales e industriales se concentran en el Área Metropolitana (GAM). Dicha región cubre apenas el 3,8% del territorio nacional, sin embargo alberga 70% de la flota vehicular, 60% de la población y 85% de la industria, según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Esta zona se ha caracterizado por un crecimiento de tipo radial, el cual ha dado paso a la conurbación de las cuatro ciudades principales, Alajuela, Heredia, San José y Cartago (Herrera, 2010).

Actualmente el sector transporte consume 57% de la energía que dispone el país. Las fuentes móviles (automotores) son la primer fuente de contaminación en el país producen alrededor del 56% de las emisiones contaminantes sobre el aire, las cuales se incrementan día a día ya que la tasa de crecimiento anual es del 7,4% (Mata, 2011). En segunda instancia está el sector industrial que produce el 23% de la contaminación atmosférica, esta se concentra en el centro y oeste de la región (Barrientos, 2010).

Según el Inventario de Emisiones Contaminantes de Costa Rica del año 2011, en la GAM se generaron, durante este período 418 663 toneladas de monóxido de carbono (CO), 64 640 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y 6 149 de PM_{10} siendo los vehículos de carga liviana quienes generan más de la mitad de las partículas PM_{10}, mientras que los autos particulares son los mayores generadores de NO_x y CO (Herrera, 2014).

La contaminación atmosférica en las grandes ciudades se debe cuantificar para determinar el grado del problema y tomar acciones en el campo de la gestión de la calidad del aire. Existen diferentes herramientas metodológicas las cuales permiten calcular la presencia de contaminantes en el ambiente como los sistemas de monitoreo e inventarios de emisiones. Adicionalmente, las mismas sirven de insumo técnico para generar estudios correlacionales, empleando técnicas de modelación y de esta manera plantear alternativas para la reducción de la contaminación.

Para conocer y dimensionar este problema, el Ministerio de Salud, el Ministerio de Ambiente y Energía, el Ministerio de Obras Públicas y Transporte y la Municipalidad de San José, con la colaboración técnica del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, han venido consolidando una Red de Monitoreo de Calidad del Aire para el Área Metropolitana de Costa Rica, con el objetivo de generar información cuantitativa confiable sobre el estado progresivo de la calidad del aire. Como cada año desde 2004, dichas instituciones presentan su informe anual para esta región. El propósito de este documento es el de ofrecer a la población un análisis objetivo sobre las tendencias que guarda la calidad del aire, en un contexto actual e histórico. Con esta y otras medidas tanto los gobiernos locales como el central, de la mano con la academia, trabajan permanentemente para garantizar a sus habitantes el derecho a gozar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. Además de la coordinación con otras dependencias, es una convicción del grupo de trabajo, el fomentar entre los habitantes su participación en la solución de los problemas que ambientalmente los aquejan y con ello mejorar la calidad de vida.

Dr. Jorge Herrera Murillo
B.Q. Jeff Briceño Castillo
Laboratorio de Análisis Ambiental
UNIVERSIDAD NACIONAL

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS iii

PRESENTACIÓN v

TABLA DE CONTENIDOS vii

MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE 1

Contaminantes primarios y secundarios atmosféricos 1

Contaminantes criterio 3

Contaminantes tóxicos peligrosos 5

Gases efecto invernadero 6

Monitoreo de calidad del aire: 6

Métodos pasivos 7

Requerimientos de un sistema de muestreo 8

Red de monitoreo 8

Monitoreo en Costa Rica 10

LEGISLACIÓN COSTARRICENSE ASOCIADA A LA CALIDAD DEL AIRE 14

CONTAMINANTES MONITOREADOS (PM_x y NO_x) 16

Material Particulado 16

Óxidos de Nitrógeno 20

METEOROLOGÍA 20

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA: DEPOSICIÓN HÚMEDA Y SECA 21

Deposición seca 21

Deposición húmeda 21

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 24

Partículas PM_{10} 24

Ubicación y concentraciones 24
Distribución de los datos 29
Análisis estacional 29
Evolución temporal 33
Iones 40
Metales 44
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) 49
Evento Polvos del Sahara 53
Partículas $PM_{2.5}$ 56
Dióxido de Nitrógeno 57
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61
REFERENCIAS 63

MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

La Ley General de Salud de Costa Rica define la contaminación atmosférica como el deterioro de su pureza por la presencia de agentes de contaminación, tales como partículas sólidas, polvo, humo, vapor, gases, materias radioactivas y otros, que el Ministerio de Salud defina como tales, en concentraciones superiores a las permitidas por las normas de calidad del aire aceptadas internacionalmente y declaradas oficiales.

Los contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en diferentes categorías, así por ejemplo, si se toma en cuenta el método de ingreso de ellos a la atmósfera, estos se clasifican en primarios y secundarios.

Por otro lado, si se analiza la naturaleza o afectación a la salud de los contaminantes, se pueden clasificar en: contaminantes criterio, tóxicos peligrosos, gases efecto invernadero (GEI) y agotadores de la capa de ozono.

Contaminantes primarios y secundarios atmosféricos

A pesar de que Shumake-Guillemot afirma un orden prioritario de monitoreo de contaminantes es necesario que se conozca que, a nivel mundial, las normas de calidad del aire han basado su estudio en el establecimiento de contaminantes primarios, los cuales son: SO_2, CO, NO, PM_{10}, $PM_{2.5}$ y compuestos orgánicos (incluidos los HAPs, hidrocarburos aromáticos policíclicos). En esta lista se incluye también el Pb; todos ellos emitidos de forma directa, por lo cual se hacen llamar primarios. Las fuentes de estos contaminantes pueden ser antropogénicas, biogénicas, geogénicas o combinaciones entre ellas. Una vez que estos contaminantes son liberados a la atmósfera son dispersados y transportados por efecto de la meteorología del sitio de emisión; además, en forma simultánea, sufren transformaciones fisicoquímicas para dar origen a contaminantes secundarios en fase gaseosa o particulada (aerosoles). Estos son aquellos que resultan de las reacciones químicas de los contaminantes primarios. Ambos contaminantes (primarios y secundarios), son removidos en la superficie terrestre vía deposición

húmeda o seca durante los procesos de transporte, transformación y deposición, impactando así gran variedad de receptores como por ejemplo los seres humanos, animales, ecosistemas acuáticos, entre otros. La figura 1 muestra un diagrama del sistema completo y el rol que juegan los contaminantes atmosféricos en el ambiente (Finlayson-Pitts y Pitts 2000).

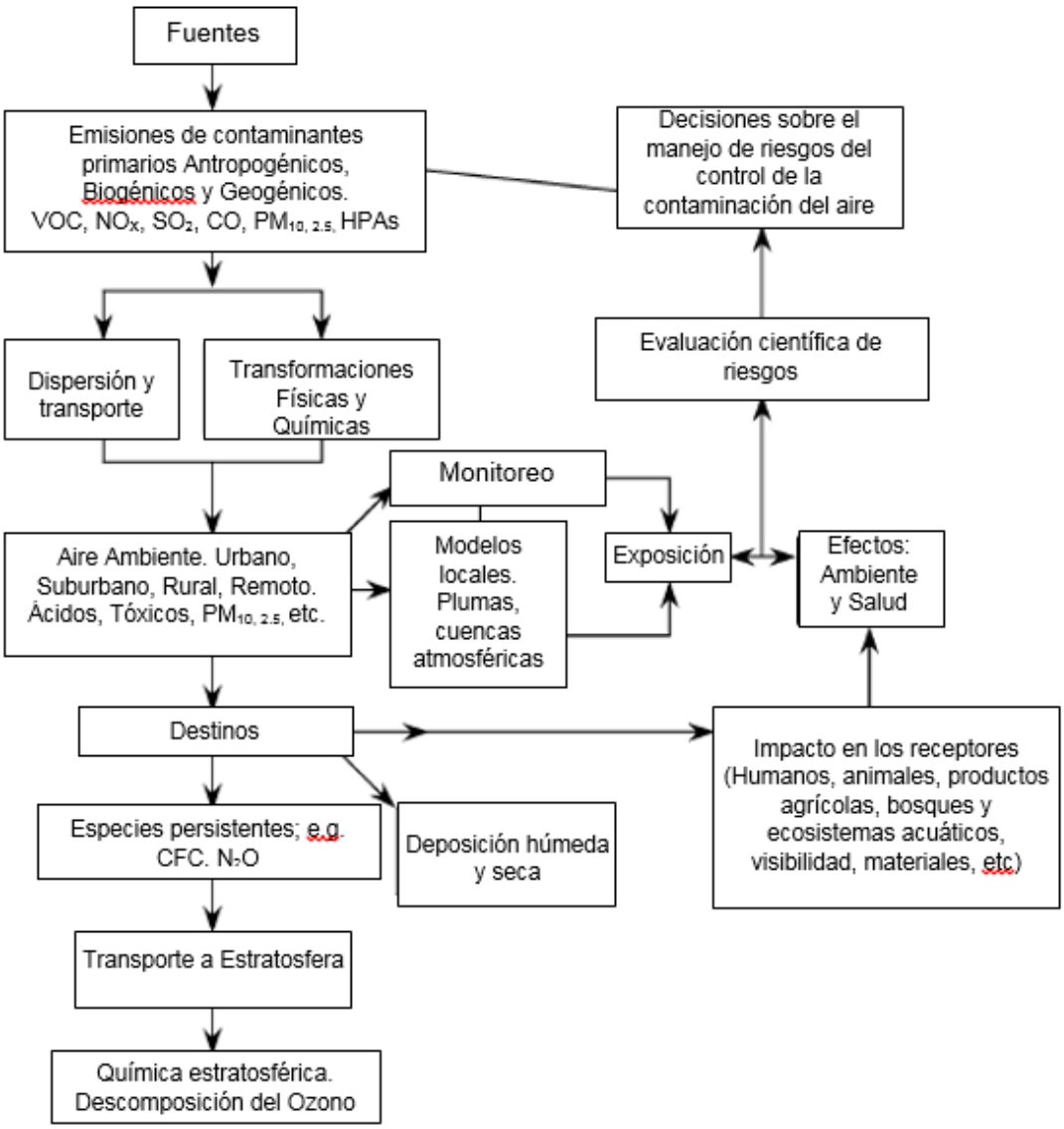


Figura 1. Sistema de contaminación atmosférica. Fuente: Finlayson-Pitts y Pitts 2000.

Contaminantes criterio

Gran cantidad de zonas urbanas alrededor del mundo son caracterizadas, bajo la temática de la contaminación del aire, por la formación de ozono y otros oxidantes en lugar del dióxido de azufre (SO_2), partículas y el ácido sulfúrico. En estas regiones, los contaminantes primarios son NO_x (NO principalmente), y compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés), los cuales conducen a la formación de contaminantes secundarios por efecto de reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar. Estos contaminantes se conceptualizan como contaminantes criterio; además, funcionan como estándares de calidad del aire. Algunos de ellos son el O_3, SO_2, CO, NO_2, PM_{10} y $PM_{2.5}$. Otros contaminantes llamados "traza" se consideran contaminantes no criterio, por ejemplo el peroxiacetilnitrato (PAN), ácido nítrico, formaldehído, ácido fórmico, entre otros. Los contaminantes criterio se encuentran documentados como nocivos y con efectos negativos a las personas, plantas y animales (Finlayson-Pitts y Pitts 2000).

En el cuadro 1 se resumen los efectos que tienen los contaminantes criterio a la salud, los ecosistemas y el clima en general.

Cuadro 1. Contaminantes criterio, fuentes y efectos más importantes a la salud, ecosistemas y el clima.

Contaminante	Fuentes	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
Partículas (PM)	Quema de combustibles fósiles (flujo vehicular, generación de energía, etc.) Volcanes Polvo mineral Caminos pavimentados y no pavimentados Erosión de suelos y zonas de cultivo	Pueden causar o agravar enfermedades cardiovasculares y pulmonares, afectar el sistema nervioso central, sistema reproductivo y provocar cáncer. Como resultado muerte prematura.	Afectan a los animales de forma similar que a los humanos. Afectan el crecimiento de plantas y procesos en ecosistemas. Pueden causar daños a edificios y visibilidad reducida.	Los efectos en el clima varían dependiendo del tamaño de partícula y su composición: algunas pueden enfriar y otras calentar. Afectan los patrones de lluvias. Su deposición cambia el albedo superficial.

Contaminante	Fuentes	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
Óxidos de Nitrógeno	Quema de combustibles fósiles a muy altas temperaturas (automotores, industrias, etc.)	El NO_2 puede afectar el hígado, pulmón, bazo y sangre. Pueden agravar enfermedades pulmonares causando males respiratorios y aumentando la susceptibilidad a infecciones.	Contribuyen a la acidificación y eutrofización del suelo y el agua, provocando cambios en la diversidad de especies. Es un precursor de O_3 y PM. Puede dañar edificios.	Contribuye a la formación de O_3 y PM, efectos climáticos asociados.
Monóxido de Carbono	El CO se forma cuando el carbono de los combustibles se quema, debe existir una pequeña cantidad de oxígeno y una alta temperatura. La causa principal son los vehículos en ralentí y la desaceleración de los mismos.	Provoca enfermedades del corazón y daños al sistema nervioso y causa dolor de cabeza, mareos y fatiga.	Pueden afectar a los animales de forma similar que a los humanos.	Contribuye a la formación de GEI como CO_2 y O_3.
Plomo	Tráfico vehicular. Las concentraciones dependerán de la cantidad de plomo que contengan los combustibles utilizados.	Afecta casi a cada órgano y sistema del cuerpo, especialmente el nervioso. Puede causar nacimientos prematuros, desarrollo mental disminuido y crecimiento reducido.	Se bioacumula e impacta adversamente tanto a sistemas terrestres como acuáticos. En la vida animal incluyen problemas reproductivos y cambios en la apariencia o comportamiento.	Sin efectos específicos.
Óxidos de Azufre (SOX)	Quema de combustibles fósiles (principalmente bunker y diésel) La fuente natural más importante son los volcanes	Agrava el asma y puede reducir la función pulmonar e inflamar el tracto respiratorio. Puede causar dolor de cabeza, malestar general y ansiedad.	Contribuye a la acidificación del suelo y aguas superficiales. Causa daños a la vegetación y pérdidas de especies locales en sistemas acuáticos y terrestres. Contribuye a	Contribuye a la formación de partículas con sulfato, enfriando la atmósfera.

Contaminante	Fuentes	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
			la formación de PM con efectos ambientales asociados. Daños a edificios.	
Ozono	Este es un contaminante secundario que se forma por la reacción química entre el dióxido de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz solar. Los niveles más altos se encuentran en áreas rurales viento debajo de áreas urbanas con zonas industriales.	Puede disminuir la función pulmonar, agravar el asma y otras enfermedades pulmonares. Puede provocar mortalidad prematura.	Daños a la vegetación, afecta la reproducción de plantas y su crecimiento, además de disminuir el rendimiento de las cosechas. Puede alterar la estructura del ecosistema, reducir la biodiversidad y disminuir la absorción de CO_2.	El ozono superficial es un GEI que contribuye al calentamiento de la atmósfera.

Contaminantes tóxicos peligrosos

Los contaminantes peligrosos son conocidos como contaminantes tóxicos del aire. Estos se sospecha que causan enfermedades serias como lo es el cáncer. Se incluyen en la lista de los responsables de efectos adversos durante la reproducción y desarrollo embrionario, como también en defectos de nacimiento. Además, son asociados a los efectos desfavorables a la ecología y el ambiente en general. Algunos ejemplos de estos contaminantes peligrosos incluyen el benceno, el cual se encuentra en la gasolina; el percloroetileno que es emitido por algunas instalaciones de limpieza (*dry cleaning*); el cloruro de metileno, el cual es usado como un separador de disolvente y pintura en diferentes industrias. La mayoría de los compuestos tóxicos son originados por acción humana, incluidas fuentes móviles y fijas, similar a las fuentes de los contaminantes criterio discutidos anteriormente; muchos de estos contaminantes predominan en ambientes internos (Vallero, 2008).

Gases efecto invernadero

La interacción entre la materia atmosférica y solar, junto con la radiación terrestre, juegan un rol importante en las condiciones superficiales de la Tierra. El ozono estratosférico filtra la radiación ultravioleta que proviene del Sol; especies gaseosas como el vapor de agua, el metano, y el dióxido de carbono, absorben la radiación proveniente de la superficie terrestre (radiación infrarroja) mediante el proceso natural conocido como efecto invernadero. Este proceso permite que la superficie terrestre mantenga una temperatura del aire mayor a los 0°C, de lo contrario, la Tierra sería un “planeta blanco” (Sportisse, 2008).

De manera general, el estado de la atmósfera es determinado por su tasa de energía, la cual comprende los flujos de radiación (solar y terrestre) y los flujos de calor latente y sensible. Las propiedades radiativas y las concentraciones de las especias traza determinan el comportamiento general de la atmósfera. Algunas especies emitidas por actividades antropogénicas, juegan un rol determinante en el aumento del efecto invernadero, o dicho de otra manera, generan un decrecimiento en la filtración de la radiación ultravioleta (Sportisse, 2008).

Monitoreo de calidad del aire:

Cuando se realizan mediciones de agentes contaminantes en la atmósfera y se establece un monitoreo estacionario, es importante definir ciertas variables espaciales y temporales que influyen directamente en el tipo de conclusiones que se puedan extraer de estas mediciones.

Inicialmente se debe conocer que el principal requerimiento de un sistema de muestreo es obtener una muestra representativa de la atmósfera en un lugar y tiempo determinado que pueda ser evaluada como concentración en masa o volumen. El sistema de muestreo no debe alterar las características físicas ni químicas del contaminante en los casos que no sea deseable. En algunos otros casos se variarán las características de forma deseada con una finalidad justificada.

Según Vallero (2008), el muestreo de gases en la atmósfera puede ser de dos tipos:

- Muestreo de extracción: en este caso se utiliza una especie química con afinidad por el contaminante de interés en el que este se pueda absorber para ser analizado en el laboratorio mediante una técnica de extracción y cuantificación. Este método tiene la ventaja de ser portable y de bajo costo. Una de sus desventajas es que requiere de manipulación muy cuidadosa y un alto grado de habilidad para garantizar que los resultados son de calidad.

- Muestreo y análisis *in situ:* la técnica analítica es incorporada en un monitoreo continuo en el lugar de muestreo. Por lo general los equipos que usan esta técnica se utilizan dentro de una estación con condiciones de climatización controlada. Los fabricantes han desarrollado equipos continuos de medición *in situ* para contaminantes como el SO_2, NO, NO_2, O_3 y CO. Además, los compuestos orgánicos también se pueden medir mediante esta técnica con cromatógrafos que miden en tiempo real.

La técnica para medir material particulado se debe estudiar por aparte; la medición de este contaminante tiene tres variables que son de importancia: concentración, tamaño de partícula, y composición de la misma. Esta información tiene un valor agregado debido a que permite la definición de los efectos sobre la salud humana, identificación de fuentes de emisión, y el entendimiento de los procesos de remoción (Vallero, 2008).

Métodos pasivos

Los sistemas de muestreo pasivos (o estáticos) son aquellos que no utilizan un componente activo de movimiento de aire, como lo es una bomba que succiona la muestra de aire para la colección del contaminante. Este tipo de sistemas sufre la inhabilidad de cuantificar cantidades de contaminante presente en un periodo corto de tiempo (menos de una semana). La ventaja de este método recae en su portabilidad, confianza y bajo costo. Los sistemas de este tipo son poco pesados y pueden transportarse sin ningún problema mayor.

Requerimientos de un sistema de muestreo

La selección de un sitio de muestreo es dependiente del propósito o uso que se le vaya a dar a los resultados del programa de monitoreo. Las actividades del muestreo se realizan normalmente para determinar la calidad del aire ambiente para el cumplimiento de las normas de calidad del aire, el apoyo a los instrumentos de ordenamiento territorial mediante la evaluación del impacto de una nueva fuente de contaminación del aire durante la fase previa a la construcción, la evaluación de riesgos asociados a derrames accidentales de productos químicos, para el monitoreo de la exposición humana, y para la investigación sobre los procesos físicos y químicos atmosféricos. Los resultados del monitoreo del aire ambiente se puede utilizar para juzgar la eficiencia del enfoque de gestión de la calidad del aire a los problemas de contaminación del aire. La razón fundamental para el control de las fuentes de contaminación del aire es la de limitar la acumulación de contaminantes en la atmósfera de manera que no se observen efectos adversos. Todo esto sugiere que los sitios de muestreo deben ser seleccionados para medir los niveles de contaminación cercanos o representativos de las poblaciones expuestas, las plantas, materiales, estructuras, etc. Generalmente, los sitios de muestreo de una red de calidad del aire se encuentran al nivel del suelo (cercano a los 3 m sobre el suelo), y no se encuentran dominados indebidamente por fuentes cercanas como lo es una carretera muy transitada o una industria que refleje resultados excesivos. Los sitios de muestreo requieren energía eléctrica y protección adecuada.

Red de monitoreo

Para establecer el cumplimiento de los estándares de la calidad del aire, un gobierno estatal o local debe hacer mediciones reales. Estas mediciones se obtienen a partir del establecimiento de redes de monitoreo fijas, con la instrumentación que cumpla con las especificaciones federales. Los resultados de estas mediciones determinan si en un determinado lugar se está violando la norma de calidad del aire asociada. Las redes de monitoreo fijas también se operan con la finalidad de determinar el impacto de las nuevas fuentes de emisión. Como parte de la declaración de un

impacto ambiental y la prevención de procesos de deterioro significativo, el impacto previsto de una nueva fuente debe ser evaluada. Un monitoreo de la calidad del aire es uno de los medios para hacer este tipo de evaluación. Una red de vigilancia se establece al menos unos 12 meses antes de la construcción del proyecto para determinar la calidad del aire antes. Una vez que se ha completado la instalación y el funcionamiento, los datos de la red determinan el impacto real de la nueva fuente.

Una red de monitoreo estacionaria debe tener ciertas características importantes:

- Niveles de concentración de fondo (comúnmente llamado *background*).
- Niveles de concentración máximos.
- Un sitio de medición que represente niveles de concentración en áreas de alta densidad o alto impacto.
- Impacto relativo de fuentes naturales y antropogénicas.

La escala espacial de una red de monitoreo es determinada mediante objetivos, las escalas espaciales pueden ser: personal (1 m, sobre una persona), microescala (1 – 100 m), escala media (100 m – 0,5 Km), escala “distrital” (0,5 – 4,0 Km), escala urbana (4 – 50 Km), y escala regional (decenas a cientos de Km).

La muestreadores dentro de una red de monitoreo deben cumplir con las limitaciones de cada sitio y tener una relación lógica de todos los sitios entre sí. El enfoque general para la selección de sitios de muestreo consiste en definir el propósito de los datos recogidos, ubicar los sitios basados en limitaciones químicas y meteorológicas, y determinar los sitios finales basados en los requerimientos del muestreo y objetos que estén alrededor.

Algunas de las herramientas necesarias para la selección del sitio de muestreo son los datos climatológicos, la topografía, los datos de población, los datos de inventarios de emisiones y el modelado de difusión. Los patrones climatológicos estacionales de vientos y frecuencia de inversiones imperantes influyen en la ubicación de las estaciones de muestreo. Varios tipos de mapas son útiles para

establecer topografía, densidad de la población, y ubicación de las fuentes de diversos contaminantes. Rosas de vientos sobrepuestos con fuentes de emisión y la densidad de la población ayudan a localizar áreas generales para la ubicación de los muestreadores. Varios tipos de modelos de dispersión se pueden utilizar para definir patrones de emisión. Por último, es importante tener en cuenta la disponibilidad del espacio para el sitio de muestreo, como también la energía eléctrica, seguridad contra el vandalismo, ausencia de estructuras cercanas, entre otros detalles.

Monitoreo en Costa Rica

En Costa Rica existe un historial de mediciones de material particulado PM_{10} desde inicios del año 2004. Estos datos se han obtenido mediante el establecimiento de una red de monitoreo con muestreadores de alto volumen (mediciones manuales de 24 horas ejecutadas 3 veces por semana), en varios puntos de la GAM. Al tratarse de mediciones manuales y con escalas de tiempo de 24 horas no se conoce aún el comportamiento de ciclo diurno de estos contaminantes. Sin embargo, se ha hecho de esta forma por la ventaja que se tiene de recolección de la muestra de partículas para su posterior análisis físico-químico. El filtro que se recolecta, producto de estos muestreos, permiten el análisis de cationes, aniones, metales pesados (incluido el Pb), carbono negro (elemental y orgánico), HPAS, además de su análisis gravimétrico que genera datos de concentración de partículas con tamaños definidos. Todos los puntos de medición siguen los procedimientos estandarizados, en cuanto a muestreo y posteriores análisis, definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Por otro lado, se ha venido monitoreando concentración de dióxido de nitrógeno por difusión pasiva en diferentes sitios de la GAM.

Todos los procedimientos que se han utilizado para los métodos descritos anteriormente están acreditados bajo la Norma de Calidad ISO 17025:2005, lo que demuestra calidad y competitividad técnica de todos los procedimientos que se siguen. Los resultados de este y todo contaminante atmosférico se corrigen a condiciones estándares (temperatura y presión atmosférica de 25°C y 1 atm respectivamente). La red cuenta con sitios en zonas comerciales, industriales,

residenciales según lo establece la USEPA para este tipo de monitoreos. La figura 2 muestra uno de los muestreadores de alto volumen que se utiliza en la red actual. Costa Rica tiene información valiosa en cuanto a material particulado se refiere; no obstante, se tiene deficiencia en cuanto a monitoreo de los demás contaminantes primarios gaseosos. Existen múltiples mediciones de todos estos contaminantes; sin embargo, no existe una red de monitoreo formal para ellos. Solo se tienen estudios con escalas de tiempo y espacio aisladas.

Figura 2. Muestreador de alto volumen para partículas PM_{10}.

Las figuras 3 y 4 ilustran de forma resumida el proceso de monitoreo de partículas y óxidos de nitrógeno en la GAM de Costa Rica.

Figura 3. Diagrama ilustrativo del muestreo manual de partículas y sus respectivos análisis químicos.

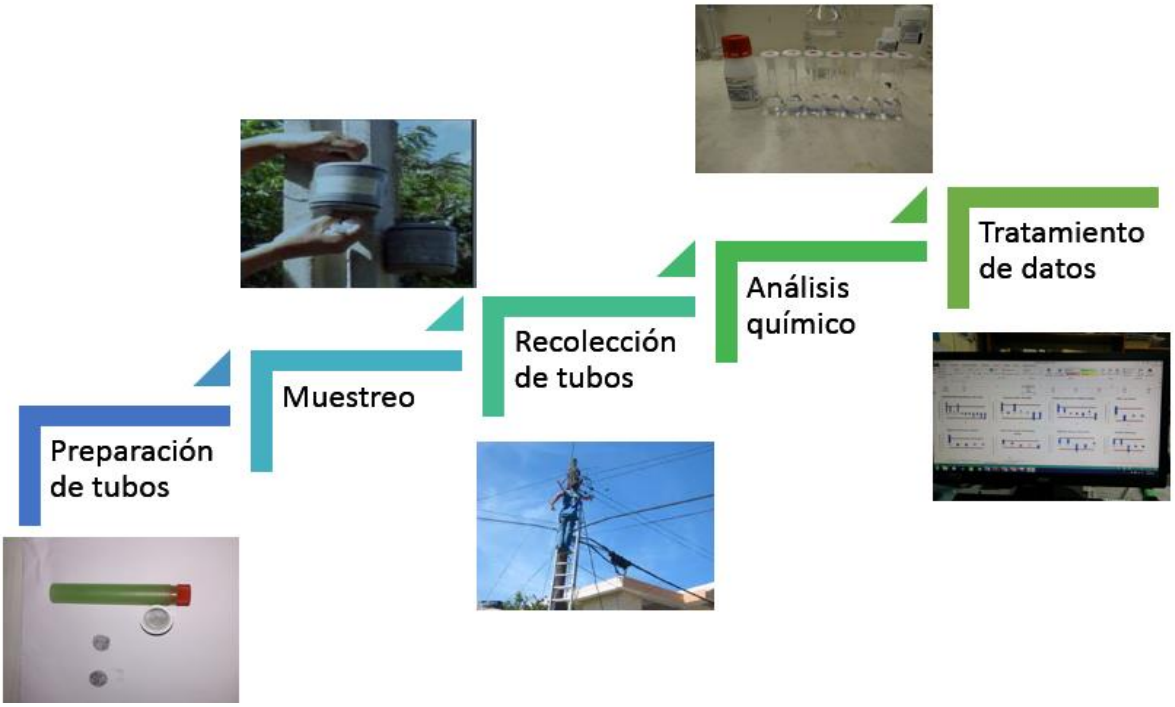


Figura 4. Diagrama ilustrativo del muestreo manual de NO_2 mediante método pasivo.

LEGISLACIÓN COSTARRICENSE ASOCIADA A LA CALIDAD DEL AIRE

"La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire los países pueden reducir la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma. Cuanto más bajos sean los niveles de contaminación del aire mejor será la salud cardiovascular y respiratoria de la población, tanto a largo como a corto plazo."

Organización Mundial de la Salud, OMS

En varios estudios se ha comprobado la relación que tienen los contaminantes atmosféricos con el aumento en diferentes enfermedades y padecimientos en la población alrededor del globo terrestre. La OMS hace un llamado a la disminución de los niveles de contaminación del aire para la reducción de la tasa de morbilidad debida a causantes ambientales, en este caso a contaminantes atmosféricos.

El avance en la investigación científica y el apoyo a la misma, en cuanto a calidad del aire se refiere, es de suma importancia para la disminución en los niveles de contaminación. La investigación permite conocer, evaluar y gestionar de manera más efectiva toda esta temática que aqueja la población, tanto humana, como vegetal y animal.

Las reglamentaciones a lo largo de los países juegan un rol importante en el aporte a la disminución constante de las concentraciones promedio de contaminantes criterio del aire. Es muy importante el constante monitoreo y modelación para poder simular y proyectar escenarios que colaboren con el objetivo de disminución de la contaminación ambiental. La USEPA, por ejemplo, tiene registros históricos del avance en reglamentación de los contaminantes criterio, esto desde el año 1971. El constante monitoreo ha permitido construir líneas base de concentración de contaminantes y ubicación de fuentes que permiten analizar y gestionar la calidad

del aire. La revisión de las leyes y la aplicación de normativa más estricta, vinculada a una gestión efectiva, potencia un adecuado avance en materia de contaminación atmosférica.

En Costa Rica, la Ley General de Salud establece en su artículo 295, la prohibición a toda persona, física o jurídica, sobre la descarga, emisión o emanación de contaminantes atmosféricos de naturaleza y en proporciones prohibidas, resultantes de sus actividades personales, domésticas, industriales, comerciales o de cualquier otra índole que cause o contribuya a la contaminación atmosférica. Adicionalmente, el país cuenta actualmente con el Reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos (Decreto N° 30221-S), este regula los contaminantes tanto primarios como secundarios categorizados como contaminantes criterio. El cuadro 2 muestra los límites máximos admisibles registrados en este decreto, como también las normativas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), la Comisión Europea y el criterio que tiene la OMS referente a estos contaminantes.

Cuadro 2. Estándares nacionales e internacionales de contaminantes criterio de calidad del aire

Contaminante	Escala temporal	[a]Norma Costa Rica	[b]Norma USEPA	[c]Norma Europea	[d]Criterio OMS
Partículas PM_{10}	24 horas	150 µg/m^3	150 µg/m^3	50 µg/m^3	50 µg/m^3
	Promedio anual	50 µg/m^3	-	40 µg/m^3	20 µg/m^3
Partículas $PM_{2.5}$	24 horas	No existe reglamentación	35 µg/m^3	-	25 µg/m^3
	Promedio anual		15 µg/m^3	25 µg/m^3	10 µg/m^3
Dióxido de nitrógeno NO_2	1 hora	400 µg/m^3	190 µg/m^3	200 µg/m^3	200 µg/m^3
	Promedio anual	100 µg/m^3	100 µg/m^3	40 µg/m^3	40 µg/m^3
	10 minutos	-	-	-	500 µg/m^3

Contaminante	Escala temporal	[a]Norma Costa Rica	[b]Norma USEPA	[c]Norma Europea	[d]Criterio OMS
Dióxido de azufre SO_2	1 hora	-	980 µg/m^3	350 µg/m^3	-
	3 horas	1500 µg/ m^3	650 µg/m^3	-	-
	24 horas	365 µg/ m^3	-	125 µg/m^3	20 µg/m^3
	Promedio anual	80 µg/ m^3	-	-	-
Monóxido de carbono CO	1 hora	40 µg/m^3	40 µg/m^3	-	-
	8 horas	10 mg/m^3	10 mg/m^3	10 mg/m^3	-
Ozono O_3	1 hora	160 µg/m^3	-		-
	8 horas	-	150 µg/m^3	120 µg/m^3	100 µg/m^3
Plomo Pb	3 meses	-	0,15 µg/m^3	-	-
	Promedio anual	0,5 µg/m^3	-	0,5 µg/m^3	-

[a] Reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos. Decreto N° 30221-S

[b] National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), USEPA.

[c] Air Quality Standards, European Commission.

[d] Guías de calidad del aire de la OMS, Actualización mundial 2005.

CONTAMINANTES MONITOREADOS (PM_x y NO_x)

Material Particulado

Hace treinta años los estándares de calidad del aire eran expresados por la USEPA en términos de la concentración de partículas suspendidas totales (PST); sin embargo, la constante investigación de los efectos a la salud por causa de la inhalación del material particulado, indican que las partículas más finas son las que verdaderamente tienen afección a los seres humanos. Antes del año 2006, las partículas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a los 10 µm (PM_{10}), eran normadas en periodos de 24 horas y anuales por la USEPA; no obstante, en la actualidad se ha invalidado este contaminante como estándar de calidad del aire para periodos de un año. Esto debido a la falta de evidencia en cuanto a su afección

a la salud a largo plazo. Actualmente, la USEPA mantiene este estándar únicamente para periodos de 24 horas (Vallero, 2008).

Por otro lado, las partículas con diámetros menores o iguales a los 2,5 µm han sido incluidas en los estándares de calidad del aire debido a la evidencia que se ha encontrado de afección a la salud humana. La figura 5 muestra la región en la cual entran las partículas al sistema respiratorio humano según su diámetro aerodinámico. Se puede observar que las partículas más finas logran entrar a la región alveolar.

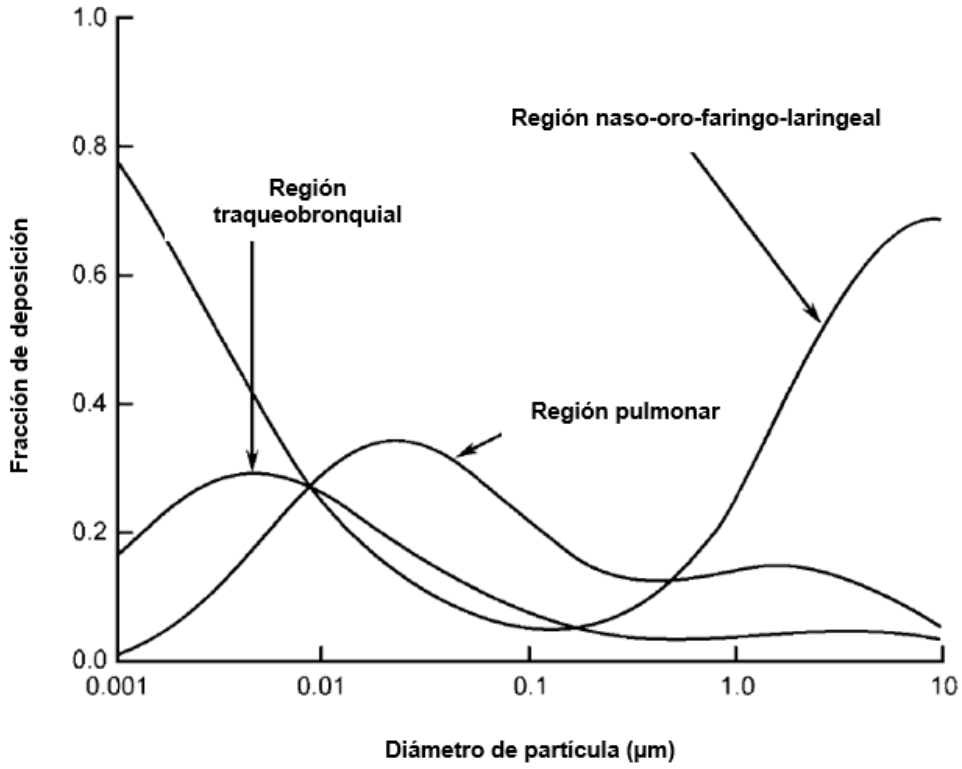


Figura 5. Deposición de las partículas en el sistema respiratorio humano según su tamaño. Fuente: (Finlayson-Pitts y Pitts 2000).

El material particulado tiene fuentes tanto naturales como antropogéncias, estas últimas se deben a las actividades realizadas por el ser humano. Entre la principal fuente antropogénica está la quema de combustibles fósiles. La composición de

este tipo de partículas difiere según su fuente de emisión. La figura 6 muestra un esquema de una partícula de hollín de diesel que consiste en una aglomeración de 0esferas de carbono elemental (0,01 a los 0,08 µm de diámetro aerodinámico). Su superficie está cubierta por absorción / adsorción de partículas orgánicas, incluyendo HAPs de 5 y 6 anillos como el benzopireno y benzoperileno respectivamente. Los orgánicos en fase gaseosa incluyen todos los HAPs muy volátiles de 2 anillos (por ejemplo, naftaleno y metil naftaleno). HAPs semivolátiles de 3 anillos (por ejemplo, fenantreno y ant raceno) y de 4 anillos (por ejemplo, pireno y fluoranteno se distribuyen entre las dos fases. Los sulfatos y otros iones también se asocian a las partículas de diesel (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000).

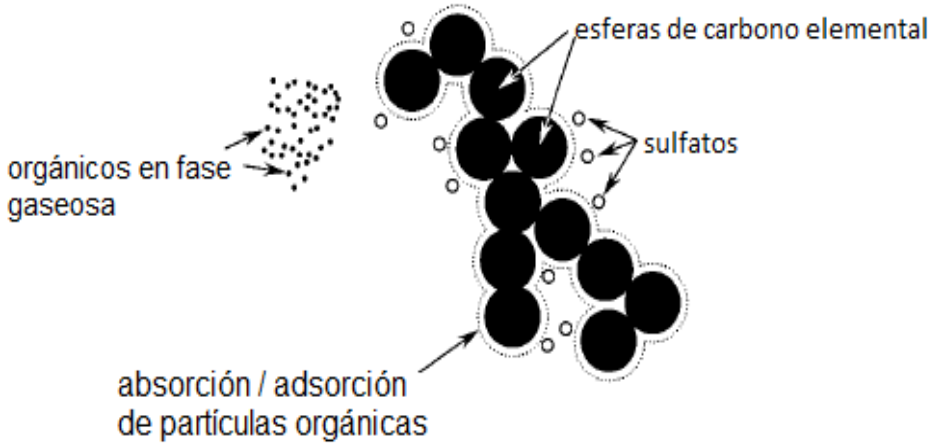


Figura 6. Esquema de una partícula de hollín de diesel (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000).

Es de suma importancia tener en cuenta que las partículas provenientes de la combustión de combustibles fósiles suelen ser más pequeñas que los 2,5 µm. Es decir, estas partículas pueden ingresar hasta la región alveolar, en donde no existe protección de la capa mucosa. Por esta razón es que estas partículas más finas toman mayor importancia en cuanto a efectos a la salud se refiere (Finlayson-Pitts y Pitts 2000).

Por otro lado, las fuentes naturales o biogénicas de material particulado pueden provenir de actividad volcánica, *spray* marino, erosión del suelo, polvos minerales,

y quema de biomasa (incendios forestales). El polvo del Sahara es la fuente natural más importante de material particulado a nivel global, produciendo cerca de unas 2 x 10^8 toneladas anuales de aerosoles, las cuales son transportadas hacia el Océano Atlántico, el Mar Mediterráneo y el Sur de Europa. (Kabatas el al 2014).

La trayectoria de estos polvos africanos hacia el Caribe ha sido bien estudiada por medio de isótopos radiogénicos que confirman que efectivamente los polvos que llegan a esta región son originarios del desierto del Sahara (Kumar et al, 2014). Isótopos del Sr, Nd y Pb resultan ser muy efectivos para este tipo de estudios de trayectorias (Grousset y Biscaye 2005).

Los polvos del Sahara están principalmente compuestos por minerales, cuarzo, carbonatos de calcio y magnesio; mientras que las partículas antropogénicas se caracterizan por compuestos de carbono, sulfatos y nitratos (Afeti and Resch, 2000; Rodriguez et al., 2001). Algunos trabajos como los de Goudie y Middleton en el año 2001, y Chudnovsky et al., en el 2009, afirman que el principal componente químico del polvo del Sahara es el SiO_2, el cual corresponde a aproximadamente un 60% de su composición total. Además, sus concentraciones de Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO son variadas.

A nivel mundial, el polvo mineral se considera una importante amenaza para la salud; pese a ello, en la Cuenca Atlántica ha habido poca investigación sobre los efectos a la salud. Las tasas de asma son altas en todo el Caribe y, a pesar de esta evidencia, existe poca investigación sobre los factores causales. Además, hay pocos datos en propiedades de los aerosoles que podrían ayudar a identificar los vínculos con la salud. Existen ya varias formas de seguirle el paso a los polvos minerales. Mediante distintos métodos se puede monitorear y hasta pronosticar dichos polvos (Próspero y Mayol, 2013).

En agosto del año 2013 se experimentó en tierras costarricenses un episodio de transporte de polvos provenientes del desierto del Sahara, estos viajaron durante 6

días recorriendo unos 9000 Km de distancia. Los polvos viajaron desde el desierto del Sahara hasta el Caribe y Centroamérica contribuyendo de manera positiva en las concentraciones de partículas PM_{10} monitoreadas en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. El tiempo que tarda el transporte de los polvos del Sahara hasta el Caribe varía estacionalmente; es común que tome alrededor de unos cinco a siete días (Prospero & Carlson, 1981).

Óxidos de Nitrógeno

Se establece por convención que los NO_x son la suma de las especies NO + NO_2; por su parte los NO_y se definen como la suma de todas las especies reactivas que contienen Nitrógeno, por ejemplo: NO + NO_2 + HNO_3 + PAN + HONO + NO_3 + N_2O_5 + nitratos orgánicos + otros. El N_2O es una especie inerte en la tropósfera que se transporta hasta la estratósfera, en donde actúa como una fuente de NO_x (Finlayson-Pitts y Pitts 2000). Este gas es emitido predominantemente por suelos y aguas; además, se considera como un gas de efecto invernadero (Seinfeld y Pandis 2006).

METEOROLOGÍA

La calidad del aire está íntimamente relacionada con el tiempo atmosférico, el clima y la salud humana. No se puede considerar como un concepto aislado, de lo contrario su estudio no tendría conclusiones válidas. Es sumamente importante hacer un esfuerzo por parte de los entes correspondientes en cuanto a la medición de variables meteorológicas se refiere; esto en los sitios de muestreo de contaminantes atmosféricos.

Como se explicó anteriormente, los procesos de emisión, dispersión, transporte, transformación y deposición de contaminantes atmosféricos se da en la capa más baja y turbulenta de la atmósfera. Esta capa se denomina capa límite atmosférica, la cual ha sido poco estudiada en nuestro territorio nacional. La estabilidad de esta capa tiene un impacto directo en procesos como el transporte, dilución,

concentración y deposición de los contaminantes atmosféricos. Los ciclos diurnos de nuestra capa límite en los diferentes puntos del territorio costarricense aún se consideran lagunas de información y estudio en las investigaciones relacionadas a la contaminación del aire.

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMOSFERA: DEPOSICIÓN HÚMEDA Y SECA

El proceso mediante el cual la atmosfera deposita los contaminantes en la superficie terrestre (deposición total) se da mediante la suma de dos procesos distintos: deposición seca y deposición húmeda. Estos procesos se dan tanto para gases traza como para partículas.

Deposición seca

La deposición seca es el proceso mediante el cual las partículas y los gases son transferidos a la superficie como resultado de movimientos turbulentos de la atmósfera. La superficie terrestre puede ser el suelo, océanos, vegetación, edificaciones, etcétera. Esta superficie puede ser entonces seca o húmeda. La deposición seca se refiere únicamente a la fase en la cual los contaminantes son depositados (American Meteorological Society 2015).

Deposición húmeda

Por su parte la deposición húmeda es la remoción de gases y partículas en la atmósfera a través de la incorporación en las gotas de agua que luego son precipitadas a la superficie terrestre (American Meteorological Society 2015).

La introducción de sustancias ácidas a la flora, el suelo, y las aguas superficiales se conoce como lluvia ácida o deposición ácida. Esta es generalmente limitada por la deposición húmeda; sin embargo, algunos materiales ácidos pueden también enriquecer la superficie de la tierra mediante deposición seca (aerosoles ácidos) y niebla ácida (pequeñas gotas de agua que contienen ácido sulfúrico y nítrico). Por lo general, la deposición ácida tiene un pH menor a 5.7, la cual debe su valor a la ionización del dióxido de carbono absorbido (Vallero, 2008).

La biota acuática puede ser peligrosa y significativamente afectada por cambios muy pequeños de pH. Además, el problema de acidificación de suelos y superficies de agua son función del incremento en acidez de la precipitación y la habilidad del receptor (agua o suelo) a resistir el cambio de pH (capacidad amortiguadora). La contribución antropogénica tiene especial atención en esta temática, primordialmente los óxidos de azufre y nitrógeno que son considerados como fuentes de lluvia ácida. Por su parte, el nitrato y sulfato presente en el material particulado tiene un aporte en la formación de este tipo de deposición (Vallero, 2008).

En la figura 7 se ilustran los procesos de remoción atmosférica (deposición seca y húmeda), incluyendo los principales contaminantes que aportan a la formación de la lluvia ácida.

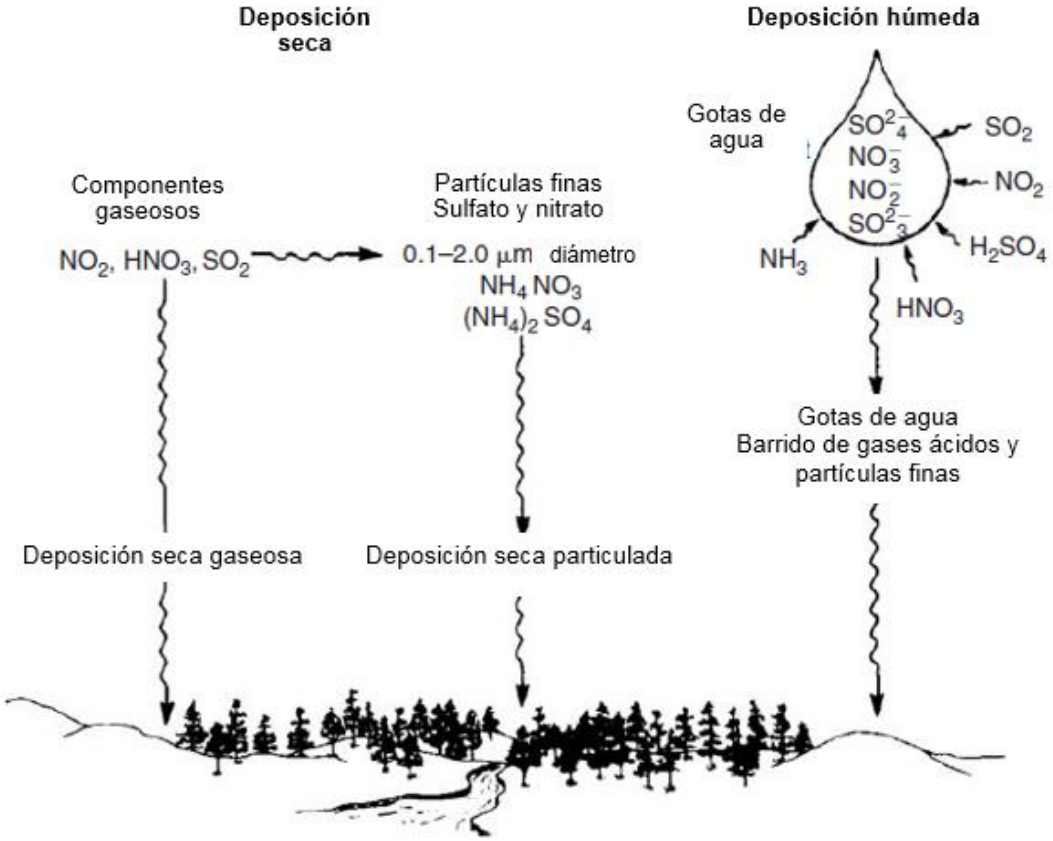


Figura 7. Procesos atmosféricos involucrados en la deposición ácida. Las principales vías son la deposición seca y la deposición húmeda. Fuente: (Vallero, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Partículas PM_{10}

Ubicación y concentraciones

En la figura 8 se observan todos los sitios de muestreo de partículas PM_{10} ubicados dentro del perímetro del Área Metropolitana de Costa Rica.

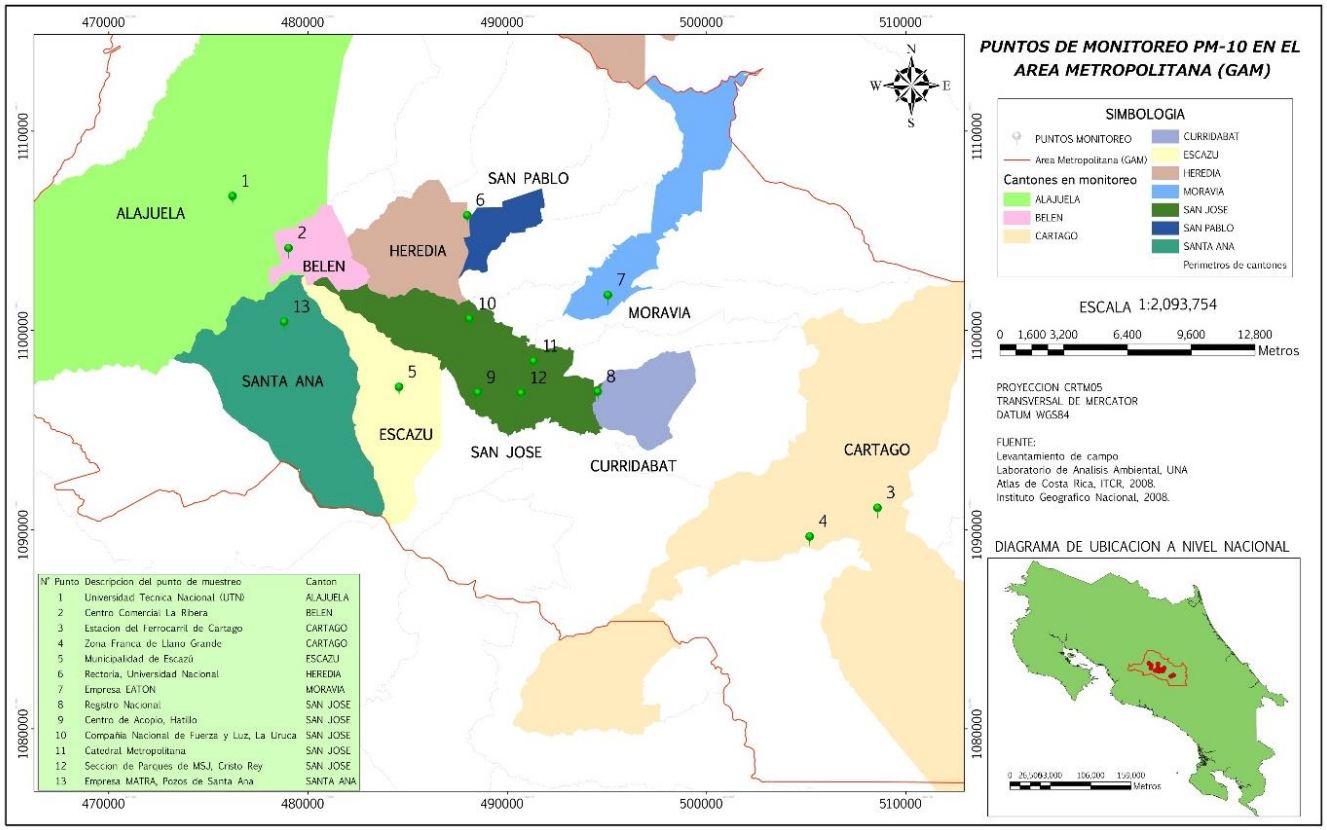


Figura 8. Ubicación de los sitios de muestreo de partículas PM_{10} en el Área Metropolitana de Costa Rica.

Los cuadros 3, 4 y 5 presentan las concentraciones promedio anuales de PM_{10} para los años 2013, 2014 y 2015 respectivamente. Estos datos muestran sus desviaciones estándar que indican cuán dispersos fueron los datos resultantes. Además, la última columna muestra el máximo valor registrado en los años estudiados para una escala de tiempo de 24 horas.

Cuadro 3. Concentración promedio anual de partículas PM_{10} ($\mu g/m^3$) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2013.

	Institución que aporta equipo de muestreo	Sitio de muestreo	AÑO 2013		
			Promedio Anual ($\mu g/m^3$)	Desviación Estándar ($\mu g/m^3$)	Valor máximo registrado en 24 horas
1	UNA	Catedral Metropolitana	23	8	52
2	UNA	Sección de Parques, MSJ	27	7	52
3	MINAE	Centro de Reciclaje de Hatillo, MSJ	29	9	58
4	MINAE	La Uruca	30	9	77
5	MINAE	Registro Nacional, Zapote	23	7	62
6	MINAE	Palacio Municipal, Escazú	22	6	44
7	MINSALUD	Centro Comercial La Ribera, Belén	36	12	83
8	MINAE	Estación Ferrocarril, Cartago	34	11	70
9	MINSALUD	Rectoría de la UNA, Heredia	30	16	67
10	MINAE	Lindora, Santa Ana	23	9	72
11	MINAE	Parque Industrial, Cartago	26	9	72
12	MINAE	Compañía EATON, Moravia	17	8	62
13	MINAE	Universidad Técnica Nacional, Alajuela	27	10	73

Cuadro 4. Concentración promedio anual de partículas PM_{10} ($\mu g/m^3$) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2014.

	Institución que aporta equipo de muestreo	Sitio de muestreo	AÑO 2014		
			Promedio Anual ($\mu g/m^3$)	Desviación Estándar ($\mu g/m^3$)	Valor máximo registrado en 24 horas
1	**UNA**	**Catedral Metropolitana**	21	8	43
2	**UNA**	**Sección de Parques, MSJ**	27	8	46
3	**MINAE**	**Centro de Reciclaje de Hatillo, MSJ**	25	8	50
4	**MINAE**	**La Uruca**	30	10	60
5	**MINAE**	**Registro Nacional, Zapote**	23	8	52
6	**MINAE**	**Palacio Municipal, Escazú**	24	9	59
7	**MINSALUD**	**Centro Comercial La Ribera, Belén**	29	10	64
8	**MINAE**	**Estación Ferrocarril, Cartago**	20	8	40
9	**MINSALUD**	**Rectoría de la UNA, Heredia**	32	19	86
10	**MINAE**	**Lindora, Santa Ana**	25	12	79
11	**MINAE**	**Parque Industrial, Cartago**	24	9	48
12	**MINAE**	**Compañía EATON, Moravia**	17	7	39
13	**MINAE**	**Universidad Técnica Nacional, Alajuela**	21	6	37

Cuadro 5. Concentración promedio anual de partículas PM_{10} ($\mu g/m^3$) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2015.

	Institución que aporta equipo de muestreo	Sitio de muestreo	AÑO 2015		
			Promedio Anual ($\mu g/m^3$)	Desviación Estándar ($\mu g/m^3$)	Valor máximo registrado en 24 horas
1	**UNA**	**Catedral Metropolitana**	23	7	39
2	**UNA**	**Sección de Parques, MSJ**	24	5	42
3	**MINAE**	**Centro de Reciclaje de Hatillo, MSJ**	26	6	47
4	**MINAE**	**La Uruca**	33	9	72
5	**MINAE**	**Registro Nacional, Zapote**	25	6	62
6	**MINAE**	**Palacio Municipal, Escazú**	26	8	75
7	**MINSALUD**	**Centro Comercial La Ribera, Belén**	30	7	54
8	**MINAE**	**Estación Ferrocarril, Cartago**	26	5	43
9	**MINSALUD**	**Rectoría de la UNA, Heredia**	35	13	64
10	**MINAE**	**Universidad Técnica Nacional, Alajuela**	30	11	78

Tal como puede observarse en los cuadros 3, 4 y 5, para los tres años de medición la totalidad de los valores promedio anual de concentración de partículas PM_{10}, registrados para los sitios de muestreo, cumplieron con la norma nacional de un límite máximo de 50 $\mu g/m^3$ (promedio anual). De la misma forma, durante este período de tiempo, ninguno de los datos diarios supero la norma de 150 $\mu g/m^3$ (24 horas). Sin embargo, si los resultados se comparan contra el criterio de la OMS, se evidencia un incumplimiento tanto en promedio anual como en 24 horas en todos los sitios de muestreo, a excepción del punto de Moravia (promedio anual) y Escazú

(24 horas). Es importante señalar que las concentraciones más bajas se obtuvieron en puntos con menor flujo vehicular (zonas residenciales). Para estos sectores se obtuvo concentraciones de PM_{10} entre (17 – 22) $\mu g/m^3$ en cuanto a promedios anuales se refiere. Por otro lado, en sectores en donde predomina mayor flujo vehicular (zonas comerciales e industriales) se obtuvo un ámbito de concentraciones mayores (23 – 36) $\mu g/m^3$.

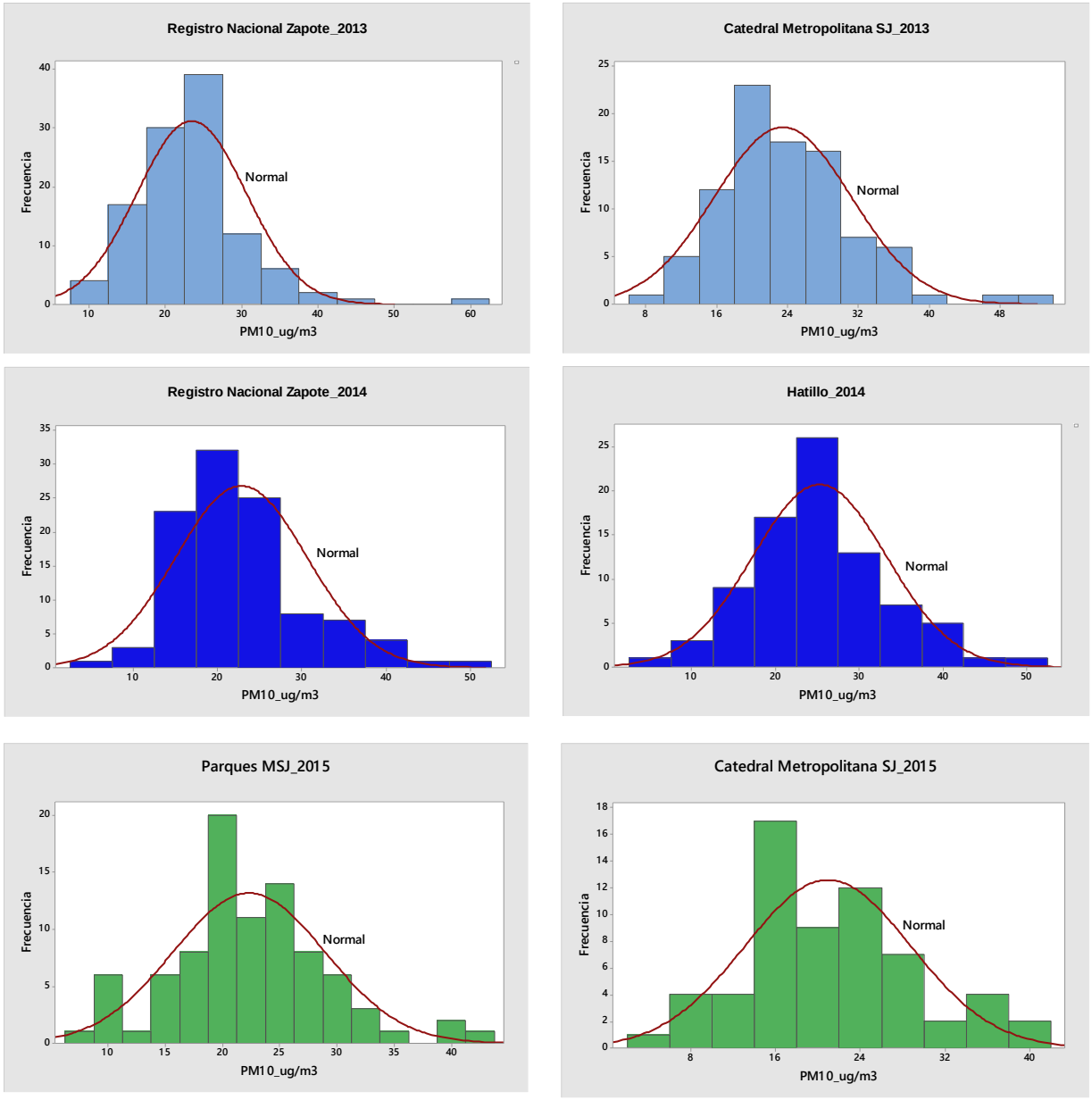


Figura 9. Distribución de frecuencias para varios puntos de muestreo de partículas PM_{10}. La línea roja es la distribución teórica Normal.

Distribución de los datos

Los fenómenos reales por lo general tienen un comportamiento gaussiano o normal; la figura 9 muestra la distribución de los datos de partículas PM_{10} con la teórica de Gauss o Normal sobrepuesta en los histogramas. Ambas distribuciones fueron graficadas para los años 2013, 2014 y 2015 en diferentes sitios de muestreo. Tal como se puede observar en la figura 9, para ambos sitios de muestreo entre un 32 a 38% de los datos de muestreos de 24 horas se encuentra por encima de la media con valores superiores a 30 $\mu g/m^3$.

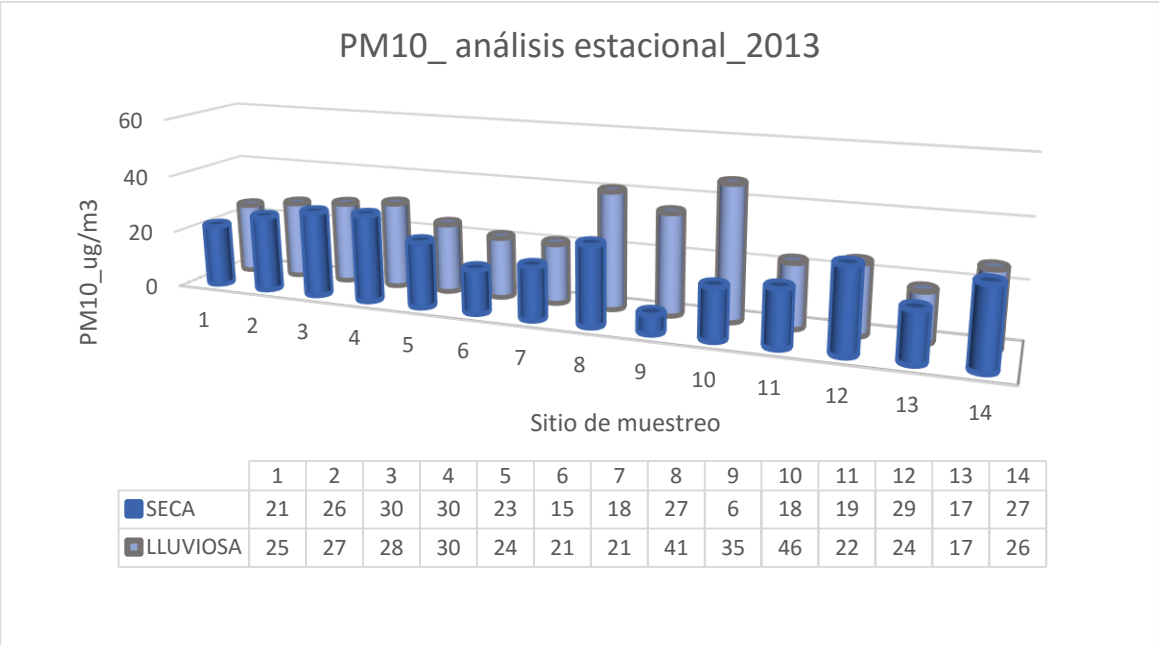
Análisis estacional

Si se parte del hecho de que las precipitaciones lavan la atmósfera, teóricamente se podría pensar que en la época lluviosa se tendrían concentraciones más bajas de contaminantes. Sin embargo, esto es mucho más complejo, la atmósfera y sus patrones de viento varían en todas las escalas debido a fenómenos naturales que incluyen circulaciones generales, ondas de montaña-valle y diferentes fenómenos que físicamente afectan la tendencia general.

En el año 2013 se obtuvo una tendencia en todos los sitios de muestreo de partículas PM_{10}. Las concentraciones promedio obtenidas en la época lluviosa resultaron mayores que las de la época seca (figura 10).

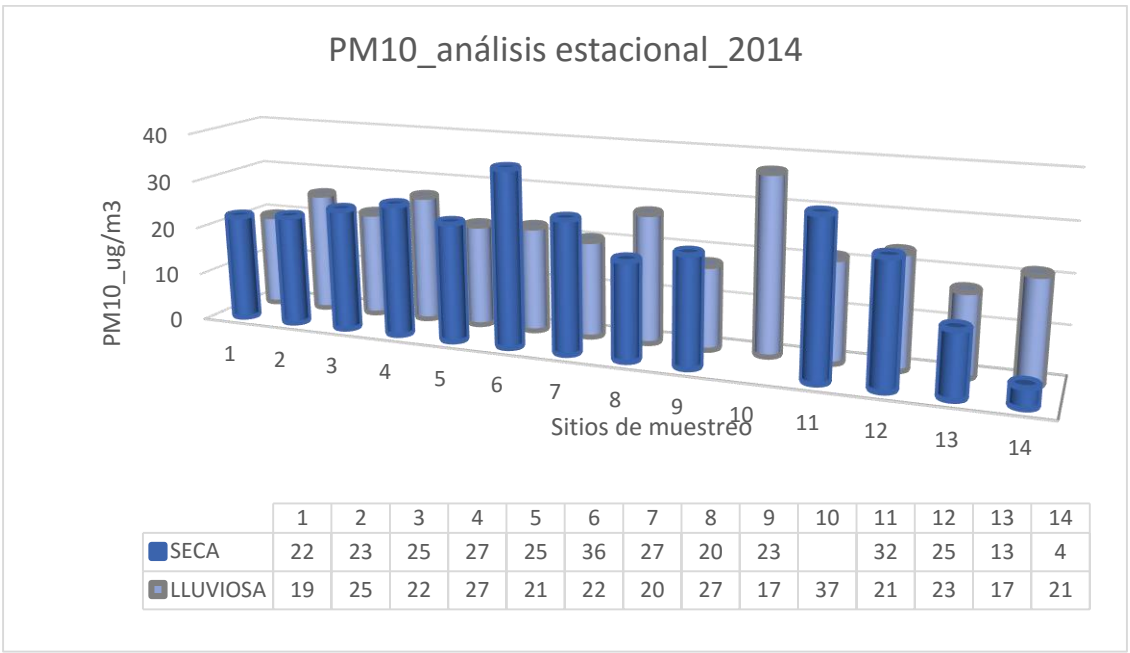
En la figura 11 se muestra que, en el año 2014, no se obtuvo una tendencia general en todo el año. No obstante, en la mayoría de los sitios de muestreo, la concentración de PM_{10} fue mayor en la época lluviosa que en la época seca.

Por su parte, la figura 12 muestra que en el año 2015 tampoco existe una clara diferenciación entre las concentraciones obtenidas en la época seca y lluviosa. No se evidencia una tendencia general tal y como sucedió en el año 2014



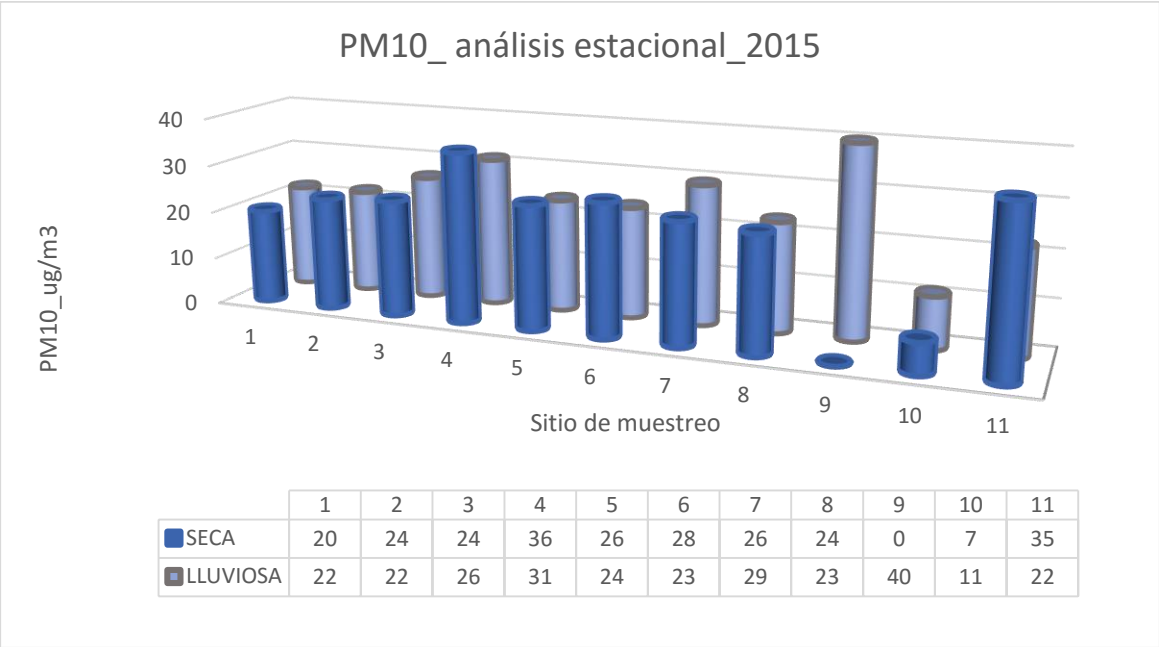
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SECA	21	26	30	30	23	15	18	27	6	18	19	29	17	27
LLUVIOSA	25	27	28	30	24	21	21	41	35	46	22	24	17	26

Figura 10. Promedios estacionales de PM_{10} para cada sitio de muestreo 2013



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SECA	22	23	25	27	25	36	27	20	23		32	25	13	4
LLUVIOSA	19	25	22	27	21	22	20	27	17	37	21	23	17	21

Figura 11. Promedios estacionales de PM_{10} para cada sitio de muestreo 2014.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SECA	20	24	24	36	26	28	26	24	0	7	35
LLUVIOSA	22	22	26	31	24	23	29	23	40	11	22

Figura 12. Promedios estacionales de PM_{10} para cada sitio de muestreo 2015

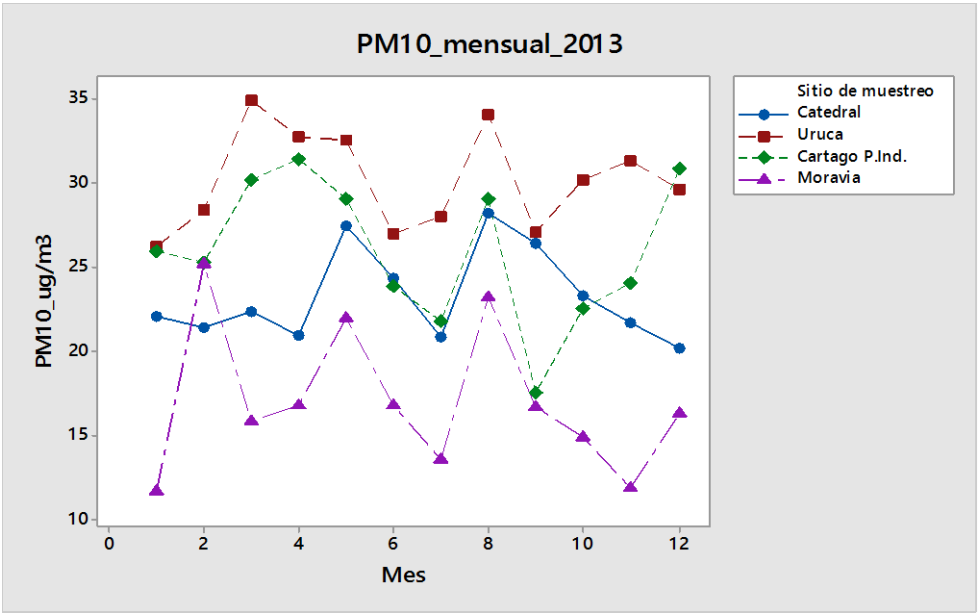


Figura 13. Evolución mensual de partículas PM_{10} para el año 2013 en los sitios de muestreo ubicados en la Catedral Metropolitana, CNFL Uruca, Parque Industrial Cartago y Moravia.

Las figuras 13, 14 y 15 muestran la evolución mensual de partículas PM_{10} en varios de los sitios de muestreo para los años 2013, 2014 y 2015 respectivamente. Una vez más se puede apreciar que no existe un patrón general en todos los sitios de esta red.

Las figuras 14 y 15 muestran un claro descenso en la concentración de este contaminante en el mes de junio. Este comportamiento puede deberse al pico de velocidad característico del chorro de bajo nivel del Caribe, el cual intensifica los vientos alisios (vientos que provienen del NE), y que podrían estar desplazando las partículas hasta la zona del Pacífico, disminuyendo así la incidencia de este contaminante en la región de la GAM. Este descenso también se puede notar en el mes de enero.

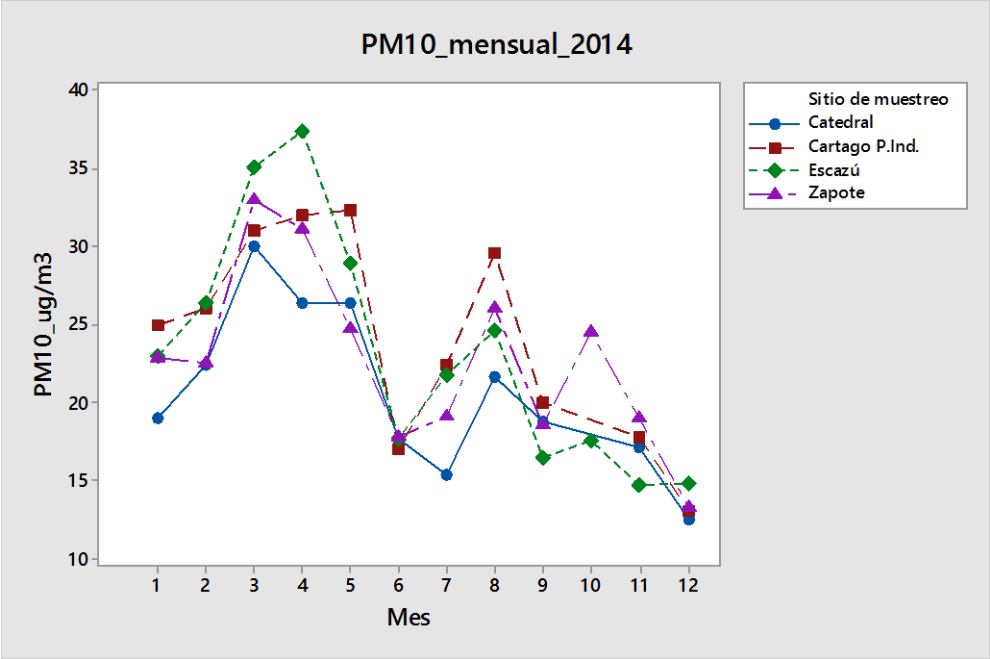


Figura 14. Evolución mensual de partículas PM_{10} para el año 2014 en los sitios de muestreo ubicados en la Catedral Metropolitana, Parque Industrial Cartago, Escazú y Zapote.

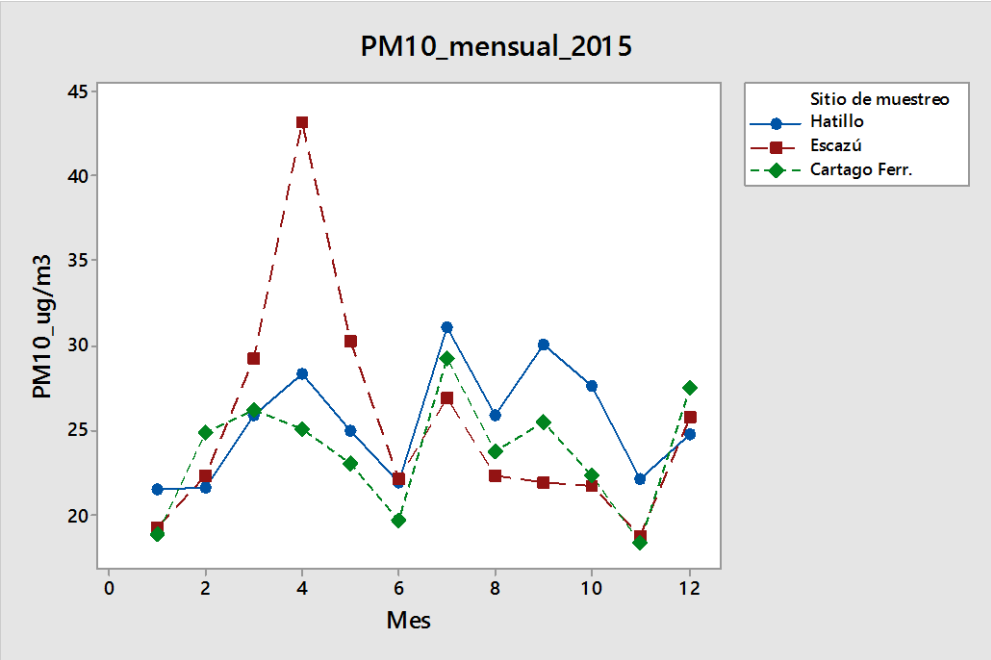


Figura 15. Evolución mensual de partículas PM_{10} para el año 2015 en los sitios de muestreo ubicados en la Hatillo, Escazú y Cartago Ferrocarril.

Evolución temporal

Cuando se analiza una evolución en el tiempo se debe tomar en cuenta la significancia de un aumento o descenso en la concentración del contaminante estudiado. No se debe creer que todo aumento o descenso es realmente lo que a simple vista parece. Por esta razón, a los resultados de concentración promedio anual de PM_{10} se les hace un tratamiento matemático y se expresan como anomalías estandarizadas. Esto permite notar de forma sencilla si un aumento o descenso es significativo con respecto al historial de mediciones en el mismo punto de muestreo.

Las figuras 16 a 28 muestran el comportamiento anual de la concentración de PM_{10} para cada uno de los sitios de muestreo. En ningún caso se logra apreciar ninguna tendencia de aumentos ni descensos importantes en el Área Metropolitana.

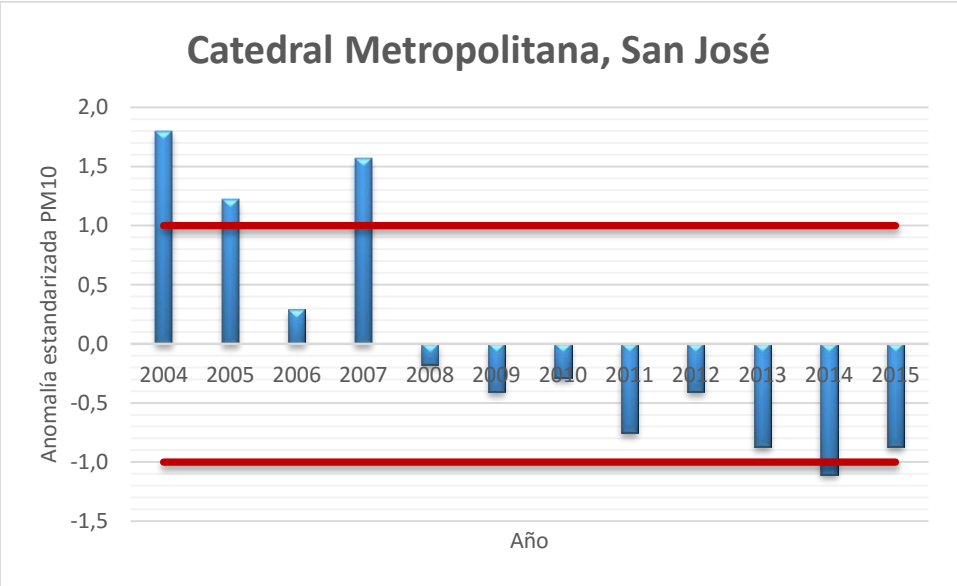


Figura 16. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Catedral Metropolitana de San José.

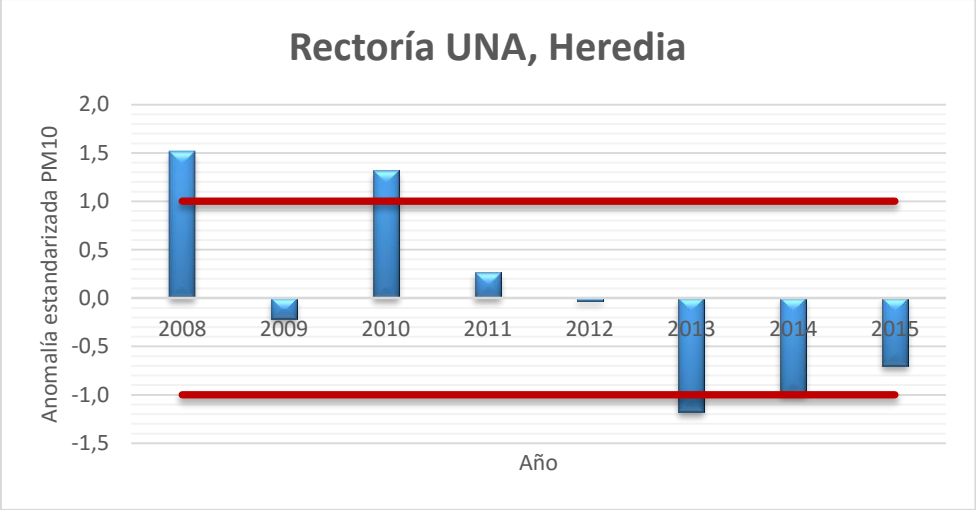


Figura 17. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Universidad Nacional, Heredia.

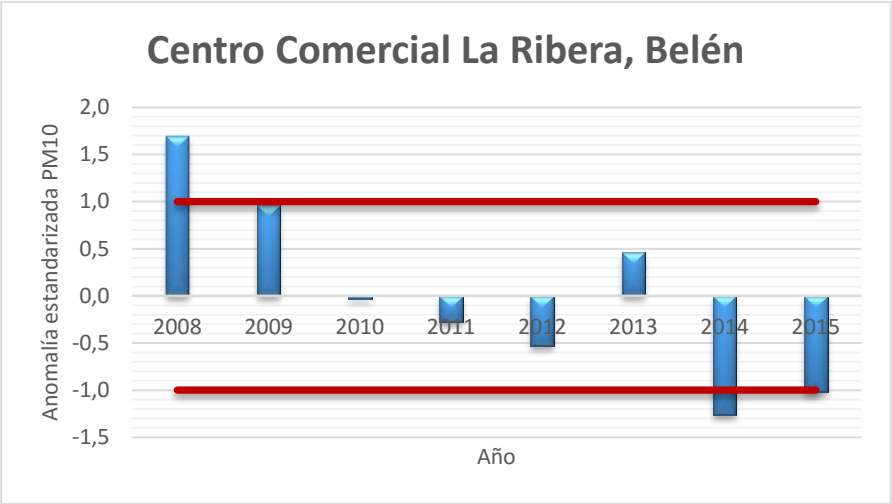


Figura 18. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en el Centro Comercial La Ribera, Belén.

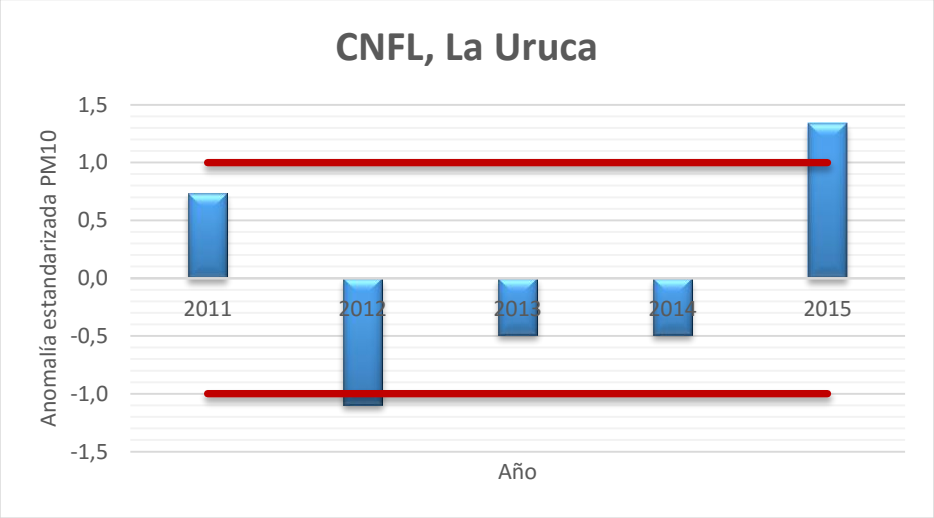


Figura 19. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca.

Figura 20. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en el Registro Nacional, Zapote.

Figura 21. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en el Centro de Acopio de la Municipalidad de Hatillo.

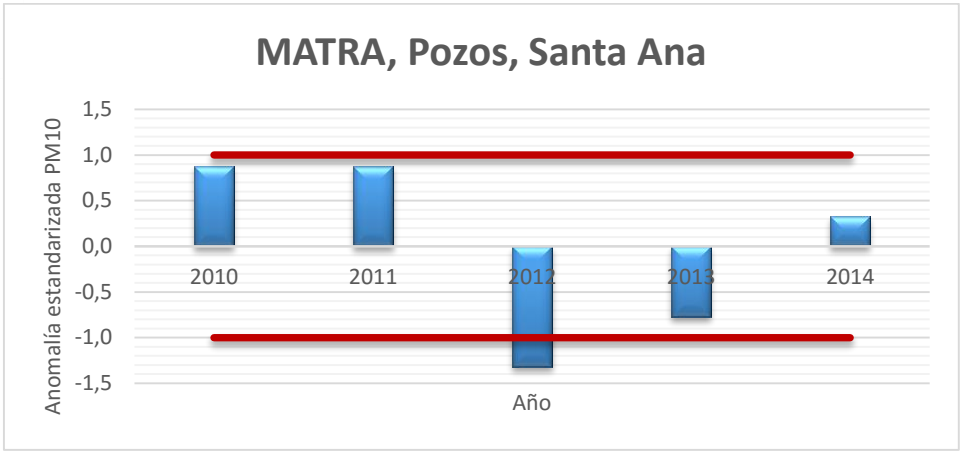


Figura 22. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la empresa MATRA, Pozos de Santa Ana.

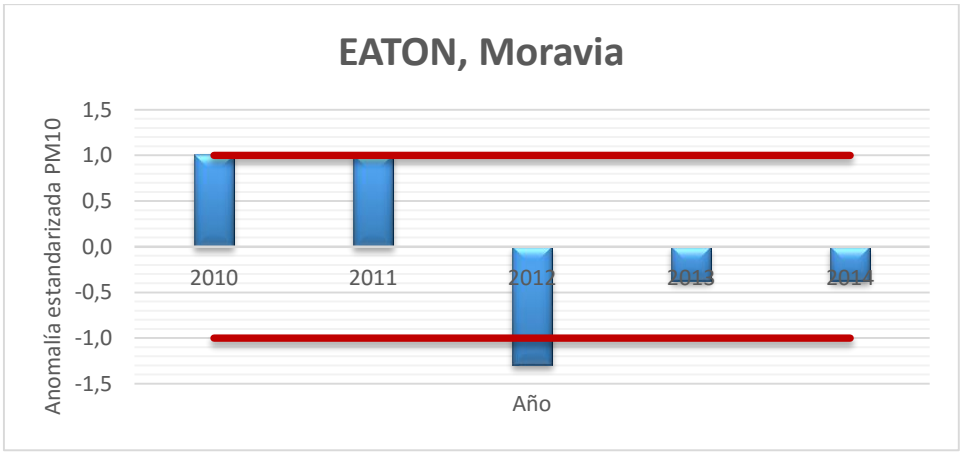


Figura 23. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la empresa EATON, Moravia.

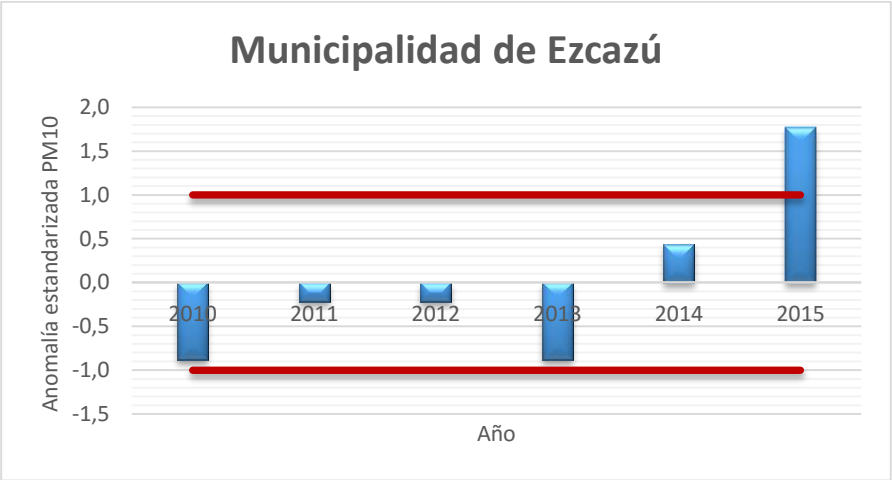


Figura 24. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Municipalidad de Escazú.

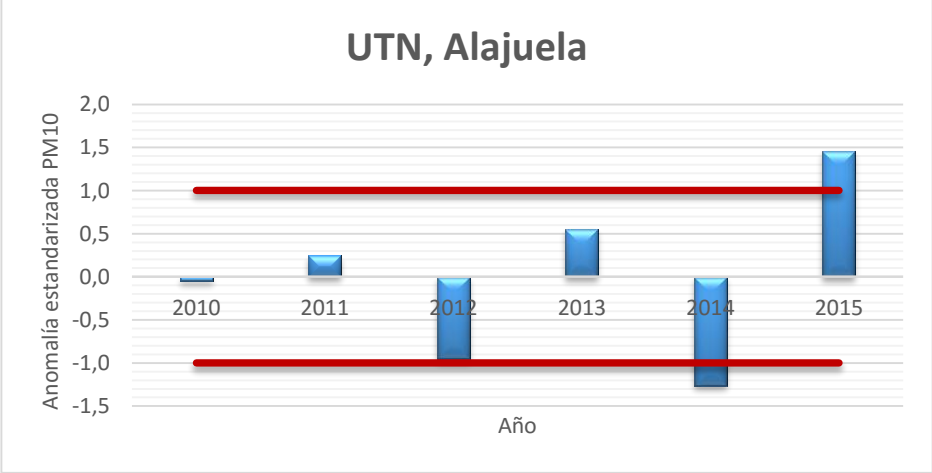


Figura 25. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Universidad Técnica Nacional, Alajuela.

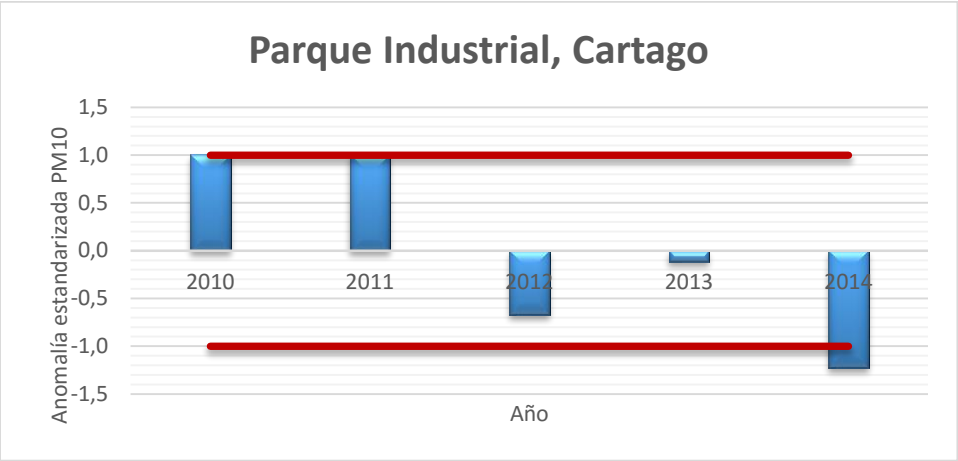


Figura 26. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en el Parque Industrial, Cartago.

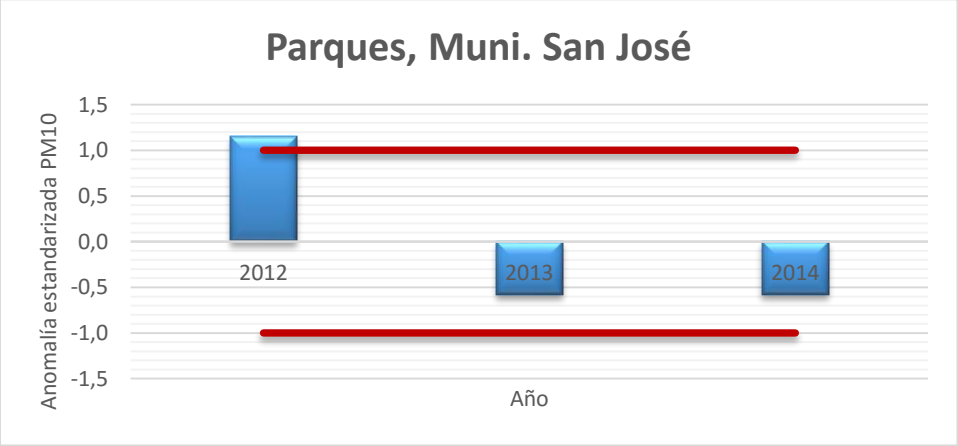


Figura 27. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en Parques, Municipalidad de San José.

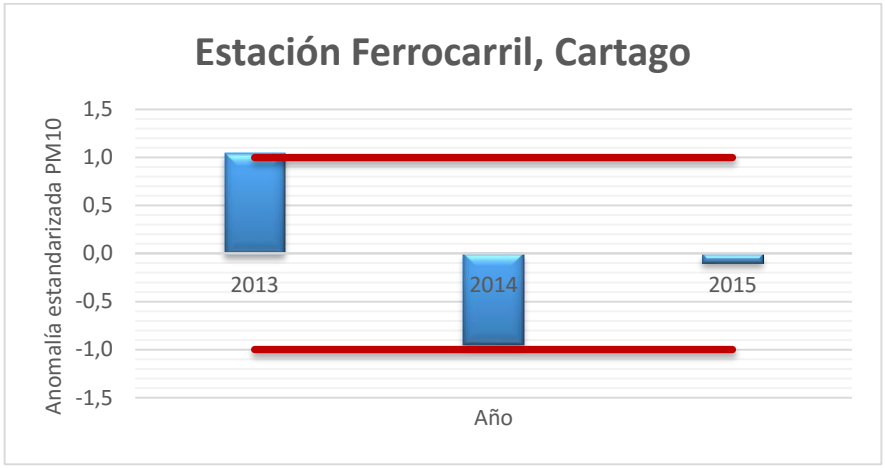


Figura 28. Comportamiento anual de la concentración de partículas PM_{10} encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Estación del Ferrocarril, Cartago.

Iones

En las figura 29, 30, 31 y 32 se muestra la evolución anual de los iones más predominantes (cloruro, nitrato, sulfato y bromuro) en las partículas PM_{10} muestreadas en los años 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014.

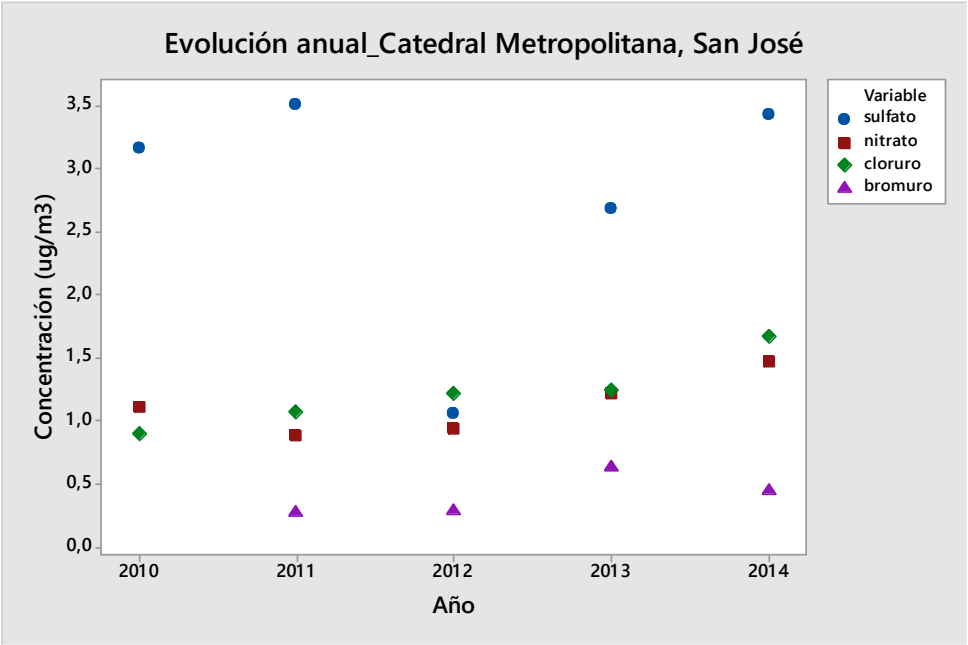


Figura 29. Evolución anual de los iones sulfato, nitrato, cloruro y bromuro en el sitio de muestreo ubicado en la Catedral Metropolitana, San José.

El ion bromuro presentó los niveles más bajos y mantienen un comportamiento anual constante con promedios menores a 1 µg/m^3. Los niveles de cloruro y nitrato oscilaron entre un nivel aproximado de 0,5 a 2 µg/m^3 en promedio anual. Por otro lado, el sulfato presentó los niveles más altos con concentraciones de hasta 6 µg/m^3 en el año 2013.

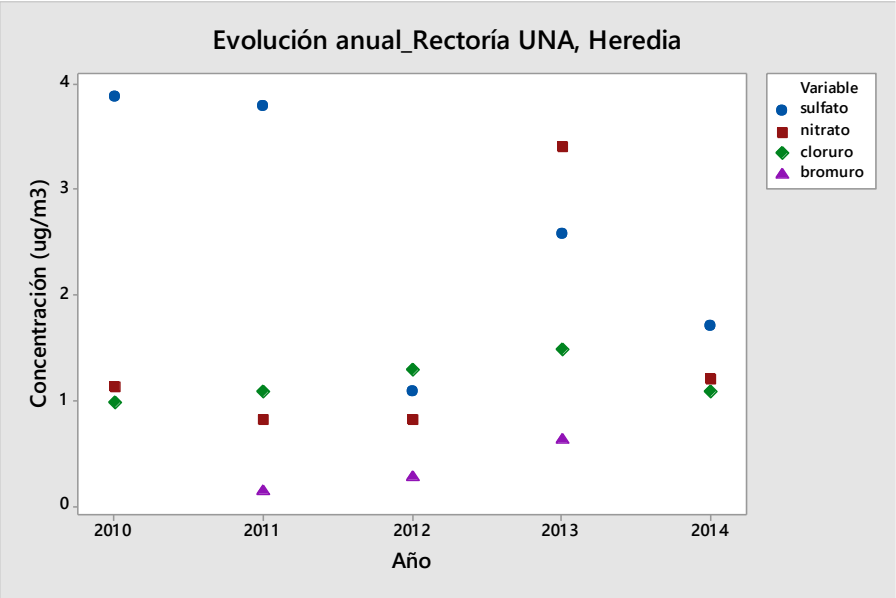


Figura 30. Evolución anual de los iones sulfato, nitrato, cloruro y bromuro en el sitio de muestreo ubicado en la Universidad Nacional, Heredia.

Es común que los niveles de sulfato superen las concentraciones de nitrato, cloruro y bromuro; sin embargo, en el año 2013, la concentración de nitrato fue mayor que la de sulfato en el sitio de Rectoría de la UNA. Esto evidencia una alta influencia de flujo vehicular.

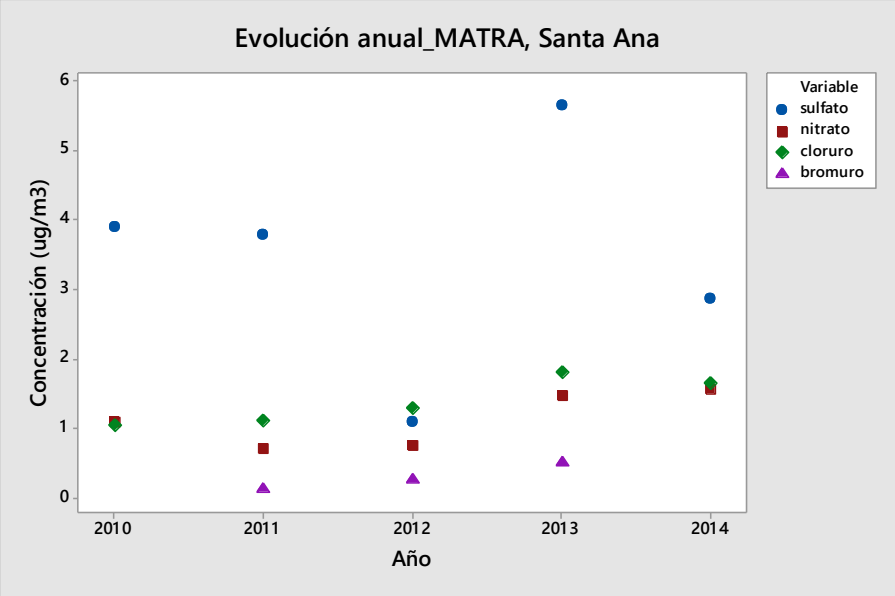


Figura 31. Evolución anual de los iones sulfato, nitrato, cloruro y bromuro en el sitio de muestreo ubicado en MATRA, Santa Ana.

Los iones sulfato y nitrato están relacionados con la emisión de NO_2 y SO_2, estos últimos contribuyen significativamente con la acidificación de la gotas de agua que precipitan en forma de lluvia.

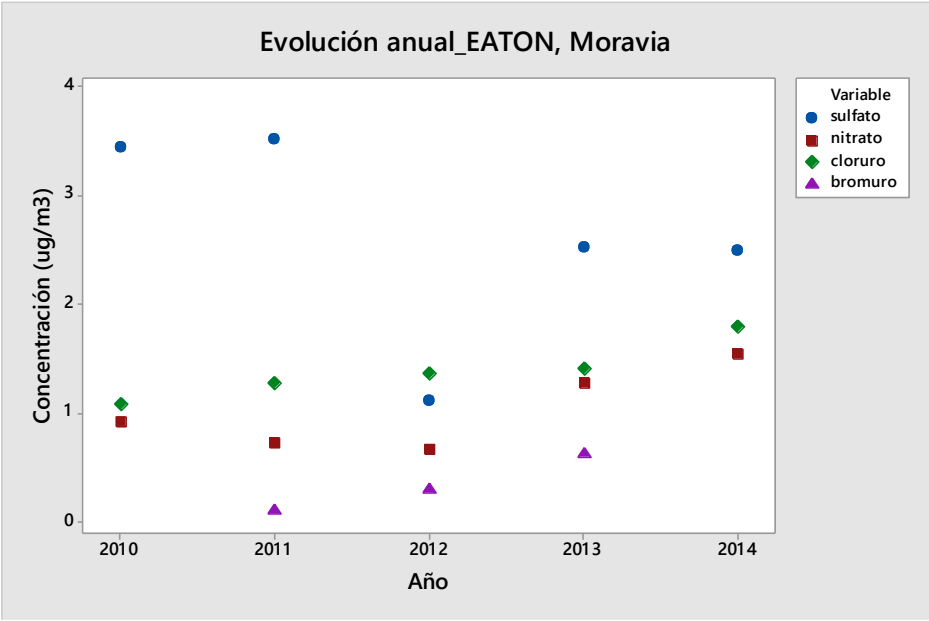


Figura 32. Evolución anual de los iones sulfato, nitrato, cloruro y bromuro en el sitio de muestreo ubicado en la empresa EATON, Moravia.

El flujo vehicular predomina en la asociación con los niveles de concentración del ion nitrato. Por otro lado, el ion sulfato se tiene a asociar con mayor fuerza a fuentes de tipo industrial (uso de búnker como combustible para generación de energía). No obstante, las fuentes volcánicas también tienen un aporte importante en este ion encontrado en partículas PM_{10}.

La figura 33 muestra la razón entre los iones sulfato y nitrato; entre mayor sea la magnitud de este cociente, mayor predominancia tienen las fuentes industriales y volcánicas sobre el flujo vehicular. Desde el año 2012 este cociente ha venido en descenso, lo que quiere decir que el uso de combustibles en el sector transporte ha sido mucho mayor que años atrás. Esto es un claro ejemplo de los efectos que tiene el aumento constante de la flota vehicular nacional a la calidad del aire y el posible impacto de la reducción del contenido de azufre en el diesel.

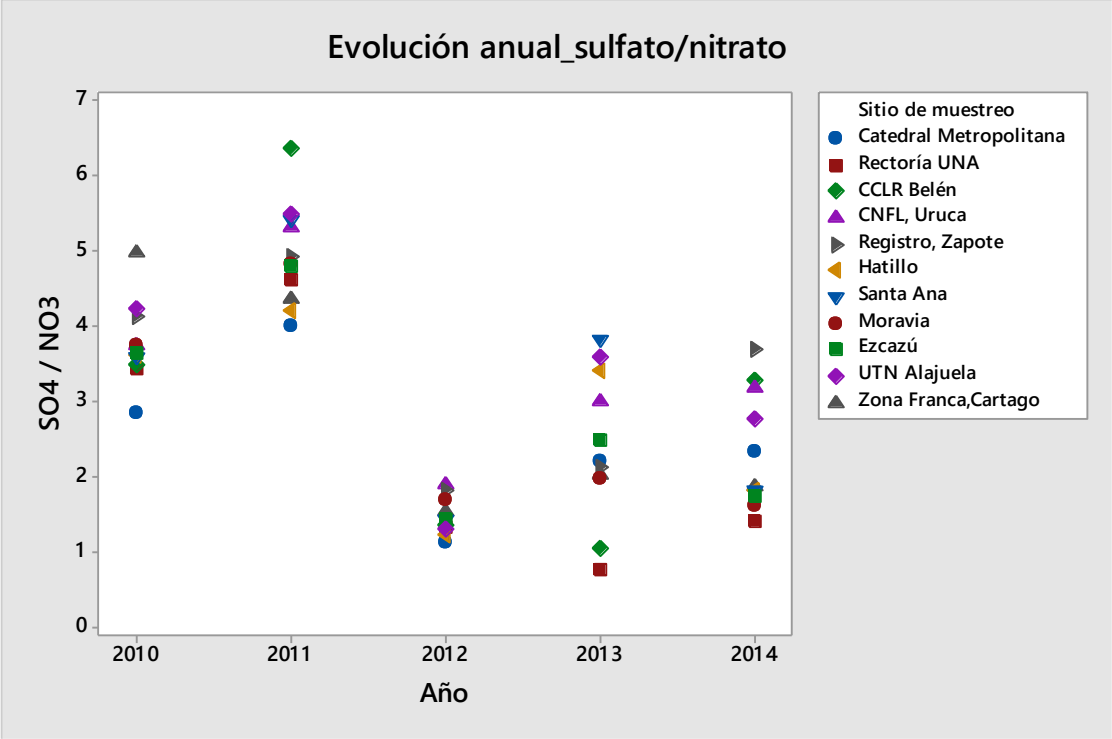


Figura 33. Evolución anual de la relación entre sulfato y nitrato para diferentes sitios de muestreo.

Metales

En el cuadro 5 se muestra la concentración de metales encontrada en las partículas PM_{10} recolectadas en el año 2013. Cada uno de los metales presenta su concentración promedio anual, desviación estándar y valor máximo encontrado.

Cuadro 5. Resultados de la concentración de metales en partículas PM_{10} encontrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana en el año 2013.

Sitio	Estadístico	Cr ng/m³	Cu ng/ m³	Mg µg/ m³	K µg/ m³	Na µg/m³	Fe µg/m³	Ca µg/m³	V ng/m³	Ni ng/m³	Pb ng/m³	Al µg/m³	Mn ng/m³
Hatillo	media	19,06	15,97	0,58	7,59	7,10	0,46	2,22	5,77	0,87	3,67	1,08	Nan
	des.est.	5,25	6,16	0,47	7,62	4,29	0,16	1,61	1,89	0,19	3,44	0,87	Nan
	max.	36,74	33,95	2,46	19,81	11,24	0,80	4,67	10,44	1,22	14,51	1,24	Nan
Uruca	media	9,05	23,24	0,75	3,76	13,02	0,39	1,72	8,65	2,98	4,11	2,17	Nan
	des.est.	6,19	34,80	1,14	4,17	12,08	0,17	1,63	5,31	1,26	3,44	0,63	Nan
	max.	28,42	222,19	4,02	12,14	33,92	1,08	5,69	24,51	6,37	17,8	2,86	Nan
Zapote	media	6,57	13,63	0,85	4,83	16,61	0,31	2,59	4,43	1,80	2,18	1,72	8,99
	des.est.	2,09	6,09	1,14	6,23	15,02	0,18	2,58	2,20	1,61	1,95	1,53	4,12
	max.	11,57	31,60	4,28	19,31	46,64	1,20	8,46	10,14	8,13	8,67	2,44	27,22
Escazú	media	10,54	14,53	1,34	6,69	30,60	0,20	5,43	3,35	2,92	2,55	2,25	8,79
	des.est.	2,16	13,36	1,38	8,99	25,33	0,09	5,24	1,27	0,89	0,86	1,28	3,28
	max.	18,68	62,83	5,76	25,45	71,03	0,46	15,80	7,65	5,44	4,25	2,38	21,58
Ferr. Cartago	media	27,43	24,31	2,03	8,06	39,45	0,81	5,27	3,39	3,19	1,13	2,13	23,26
	des.est.	56,90	31,14	2,16	8,27	26,15	0,49	3,28	2,16	1,37	1,20	1,04	12,29
	max.	275,05	128,17	5,85	20,52	76,49	2,03	9,53	10,26	5,82	3,70	2,44	41,98
UNA	media	4,48	17,84	0,26	2,57	9,45	0,07	0,75	1,55	1,42	1,64	1,48	6,08
	des.est.	1,64	5,62	0,30	2,74	8,43	0,03	0,78	1,06	0,87	0,84	0,91	1,94
	max.	7,84	29,07	1,28	8,36	24,65	0,13	1,87	3,93	3,19	3,20	2,11	11,12
Santa Ana	media	11,24	5,94	1,35	7,43	29,34	0,24	5,10	4,96	3,57	2,23	2,62	13,54
	des.est.	2,86	3,12	1,28	7,99	19,67	0,14	3,94	2,46	1,08	0,83	1,89	5,21
	max.	16,21	15,73	4,47	19,81	59,40	0,86	12,15	13,09	6,18	3,90	2,63	26,37
P. Ind. Cartago	media	5,81	5,01	1,32	5,55	30,14	0,19	3,89	4,03	3,26	2,30	0,66	19,23
	des.est.	2,90	4,36	1,59	7,17	25,76	0,16	3,60	3,05	1,38	0,89	0,38	8,33
	max.	13,20	14,23	5,94	20,16	81,32	1,00	13,52	13,57	7,01	5,99	1,21	40,82
Moravia	media	11,60	33,06	0,72	6,88	28,36	0,34	5,71	1,78	2,60	3,29	0,75	6,36
	des.est.	4,08	38,30	0,83	8,19	22,44	0,18	10,78	1,39	0,88	1,19	0,35	2,68
	max.	23,24	203,03	3,59	21,02	64,04	1,05	45,11	5,56	4,83	6,40	1,37	14,95

Los valores de plomo siguen manteniendo un valor por debajo de la normativa nacional que establece un máximo admisible de 0,5 µg/m^3 (500 ng/m^3) en promedio anual. El máximo valor encontrado de este metal fue en el sector de Hatillo con un promedio de 0,014 µg/m^3.

Factores de enriquecimiento:

Las relaciones elementales en muestras de aerosoles pueden proporcionar información importante para entender su posible origen. De esta forma, los factores de enriquecimiento de los elementos presentes en dicha matriz, con respecto a la concentración existente en el material proveniente del polvo de suelo, se suelen calcular con el fin de identificar las posibles fuentes y la contribución de las emisiones antropogénicas a los niveles de metales en las partículas (Duce et al., 1975; Zoller et al., 1974). Si el valor del factor de enriquecimiento es cercano a la unidad, el elemento presenta un origen predominantemente crustal. Sin embargo, debido a las diferencias existentes entre la composición crustal en las distintas regiones del planeta, los valores de factor de enriquecimiento comprendidos entre 1-10, se consideran de origen natural.

Elementos como el Al, Si, Ti, Fe se usan comúnmente como elemento de referencia para el cálculo de los factores, debido a que son muy abundantes en el material crustal y no son significativamente afectados por la contaminación. En el presente estudio, para estimar dichos factores se utilizó como referencia el Fe y la concentración crustal continental superior se tomó de Taylor y McLennan (1985). El factor de enriquecimiento de un elemento FE en una muestra de aerosol, se define como:

$$FE = (E/R)\ Aire\ /\ (E/R)\ suelo \qquad (1)$$

donde R es el elemento de referencia.

Los valores de factores de enriquecimiento calculados a partir de los datos de concentración de metales, presentes en las partículas colectadas en el área

metropolitana, se muestran en el cuadro 6 y siguen la siguiente secuencia: Pb > Cu > V > Mn > Ni > Cr.

El Pb y Cu presentan valores de FE en el rango de 10-1000 lo que indica que la concentración de estos elementos en las partículas es enriquecida por fuentes que no son de origen crustal tales como: combustión de hidrocarburos fósiles, tráfico vehicular, emisiones de industrias metalmecánicas, etc.

Cuadro 6. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas en los sitios de muestreo de partículas PM10, año 2013

Sitio de muestreo	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Mn
Catedral	8,1	96,5	2,3	62,5	3,2	3,5
Sección de Parques	10,2	201,5	3,7	205	3,8	11,4
Hatillo	7,4	187	1,9	117	2,9	9,9
La Uruca	17,6	103	2,5	59,5	6,8	2,8
Zapote	6,7	96	2,0	115,8	6,3	1,32

Contribución marina a la composición química de los aerosoles:

El aerosol marino tiene una contribución importante en la composición de las partículas PM_{10}. Con el fin de estimar este aporte, es necesario calcular la fracción de los distintos componentes inorgánicos influenciados por el aerosol marino. Iones como sulfato (SO_4^{-2}), potasio (K^+), magnesio (Mg^{+2}) y Calcio (Ca^{+2}) tienen fuentes tanto marinas como continentales. Basado en la relación de masa de estos iones con respecto al Na^+, el componente debido al aerosol marino se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Duce et al., 1983):

$$[X]_{nam} = M_x - [X / Na]_{am} M\,Na \qquad (2)$$

donde la expresión $[X / Na]_{am}$ denota la relación de masa del ion X con respecto al Na^+ en el agua de mar, Mx y MNa la concetración del ion X y del Na+ en las partículas PM_{10}. De acuerdo con Berg y Winchestor (1978), la relación de masa de

los iones SO_4^{-2}, K^+, Mg^{+2} y Ca^{+2} con respecto al Na^+ en agua de mar es de 0,25, 0,037, 0,12 y 0,038 respectivamente. La diferencia entre la concentración del ion presente en las partículas y el componente debido a la contribución marina, corresponde a la fracción originada por fuentes diferentes al aerosol marino [X]nam. El cuadro 7 muestra la distribución, para cada uno de los sitios de muestreo, de la fracción debida al aerosol marino.

Cuadro 7. Contribución del aerosol marino (ug/m^3) a la composición de las partículas PM_{10} colectadas en los sitios de muestreo, año 2014

Sitio de muestreo	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}
Catedral	0,54	0,079	0,082
Sección de Parques	0,56	0,082	0,085
Hatillo	0,52	0,077	0,079
La Uruca	0,55	0,082	0,084
Zapote	0,52	0,077	0,080

Si se analiza el caso del SO_4^{-2}, se puede apreciar que aproximadamente del 86 al 88% de la concentración másica de este ion tiene un origen distinto al aerosol marino; en el caso del K^+ y el Ca^{+2} esta fracción representa como mínimo el 97% en los diferentes sitios de muestreo. Sobre el continente, la fracción de SO_4^{-2} que no proviene del aerosol marino constituye un trazador de actividades antropogénicas y de quema de combustibles fósiles, el K_{nam} se origina mayoritariamente por quema de biomasa mientras que el Ca_{nam} tiene un origen predominantemente crustal.

Acidez de las partículas:

Con el fin de estimar la acidez de las partículas colectadas en cada uno de los sitios de monitoreo, se obtuvo la recta de mejor ajuste, generada al graficar la suma de la concentración equivalente (μeq/m^3) de cationes presentes en las partículas en el eje "y" versus la correspondiente suma de los aniones en el eje "x". La pendiente obtenida de la regresión lineal de la suma de los cationes y aniones, para los cinco sitios de monitoreo, se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 8. Relación entre la suma de concentraciones equivalentes de cationes y aniones presentes en las partículas PM_{10} colectadas en el Área Metropolitana, 2014.

Sitio de muestreo	Regresión Lineal	Coeficiente de correlación	Número de muestras
Catedral	$\Sigma^+ = 0{,}803\Sigma^- - 1{,}218$	0,925	95
Sección de Parques	$\Sigma^+ = 0{,}815\Sigma^- - 1{,}027$	0,953	103
Hatillo	$\Sigma^+ = 0{,}834\Sigma^- - 1{,}147$	0,892	89
La Uruca	$\Sigma^+ = 0{,}787\Sigma^- - 1{,}309$	0,917	92
Zapote	$\Sigma^+ = 0{,}828\Sigma^- - 1{,}272$	0,886	97

Sería de esperarse que la pendiente obtenida para estas rectas de mejor ajuste fuese muy cercana a uno, debido al balance iónico. Si se toma en cuenta que no se cuantificó e incluyó en el balance, el ión hidronio, el grado de cercanía de la pendiente al valor esperado de uno, brinda una idea de la magnitud del aporte del ión hidronio a la composición de las partículas.

Tal y como se indica en la pendiente de las curvas de regresión lineal, la acidez de las partículas es menor en los sitios ubicados en el este del cantón mientras que el mayor nivel se presenta en la zona industrial de La Uruca. Este resultado se puede deber al hecho de que la contribución de los iones secundarios de las partículas es mayor para estos sitios.

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)

Los cuadros 9 y 10 muestran las concentraciones encontradas de HAPs en el año 2013.

Cuadro 9. Resultados de la concentración de HAPs (ng/m^3) encontrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana en el año 2013.

Sitio / Compuesto	Catedral Metropolitana	Parques, MSJ	Hatillo	CNFL, Uruca	Registro, Zapote	Escazú
Naftaleno	0,31	0,37	0,29	0,36	0,34	0,53
Acenaftileno	0,34	0,60	0,36	0,34	0,47	0,49
Fluoreno	nd	nd	nd	nd	0,18	0,14
Fenantreno	0,15	0,14	0,22	0,35	0,23	0,17
Antraceno	0,04	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02
Benzo (g,h,i) perileno	0,20	0,28	0,29	0,20	0,20	0,19
Criseno	0,10	0,15	0,13	0,17	0,12	0,08
Benzo (a) antraceno	0,52	0,11	4,75	1,08	3,22	2,56
Fluoranteno	0,07	0,09	0,09	0,14	0,08	0,05
Pireno	0,11	0,14	0,15	0,29	0,14	0,09
Benzo (b) fluoranteno	0,19	0,16	0,39	0,22	0,18	0,17
Benzo (k) fluoranteno	0,08	0,12	0,14	0,11	0,08	0,07
Benzo (a) pireno	0,21	0,31	0,25	0,20	0,17	0,14
Dibenzo (a,h) antraceno	0,10	0,10	0,05	0,06	0,04	0,06
Indeno (1,2,3-C.D) pireno	0,42	0,58	0,64	0,41	0,34	0,39

nd: no detectable

Los quince HAPS analizados en este estudio para todos los sitios de muestreo se determinaron en la fase particulada y, por lo tanto, no considera la fracción de estos compuestos, presentes en estado de vapor. Es importante mencionar que a nivel país no se cuenta con una normativa de calidad del aire específica en metales y HAPS, razón por la cual se utilizó como punto de referencia la normativa europea vigente según la Directiva 2004/07/CE (emitida por el Parlamento

Cuadro 10. Resultados de la concentración de HAPs (ng/m^3) encontrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana en el año 2013 (continuación)

Sitio / Compuesto	CCLR, Belén	UNA, Heredia	Matra, Santa Ana	Parque Ind., Cartago	Moravia	UTN, Alajuela
Naftaleno	0,80	1,00	0,60	0,40	0,60	1,00
Acenaftileno	2,00	1,00	0,30	1,54	1,00	0,50
Fluoreno	0,60	0,80	0,10	0,01	0,50	0,40
Fenantreno	0,30	0,70	0,20	0,37	0,40	0,05
Antraceno	0,03	0,08	0,03	0,01	0,04	0,05
Benzo (g,h,i) perileno	0,20	0,40	0,14	0,12	0,21	0,20
Criseno	0,14	0,50	0,03	0,07	0,18	0,03
Benzo (a) antraceno	53,00	24,00	1,00	0,79	20,00	2,50
Fluoranteno	0,09	0,60	0,04	0,03	0,20	0,30
Pireno	0,20	0,80	0,09	0,07	0,27	0,02
Benzo (b) fluoranteno	0,20	1,00	0,13	0,08	0,38	0,10
Benzo (k) fluoranteno	0,09	0,12	0,05	0,04	0,08	0,07
Benzo (a) pireno	0,20	0,30	0,05	0,08	0,18	0,10
Dibenzo (a,h) antraceno	7,80	7,50	0,05	0,04	4,56	0,06
Indeno (1,2,3-C.D) pireno	0,10	0,30	0,30	0,21	0,28	0,30

Europeo el 15 de diciembre de 2004 relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente), en donde se establece un valor máximo únicamente para el caso del Benzo (a) pireno (1 ng/m^3) por su conocida actividad carcinogénica. En todos los puntos de muestreo se obtuvieron valores promedio de Benzo (a) pireno por debajo de lo establecido en la esta referencia.

Los HAPS más abundantes en los sitios de muestreo fueron Benzo (a) antraceno, Dibenzo (a,h) antraceno, Indeno (1,2,3-C.D) pireno y Benzo (b) fluoranteno, dos de los cuales son considerados como marcadores de gasolina (Saldarriaga, 2008). Lo que podría evidenciar que para todos los sitios de monitoreo hay una posible

contribución por parte de las emisiones vehiculares. Las emisiones de HAPS en zonas urbanas se asocian principalmente con las actividades antropogénicas (Saldarriaga, 2008). Según los resultados obtenidos los compuestos más abundantes presentan la característica de estar conformados por cinco y seis anillos mientras que los menos abundantes fueron de tres a cuatro. Lo anterior concuerda con lo hallado por diversos autores (Kiss *et al*, 1998, Yang *et al,* 1999, Schnelle-Kreis *et al*, 2001) donde los HAPS de mayor peso molecular se encuentran en la fase particulada debido a su menor presión de vapor con respecto a los de menor peso molecular hallados principalmente en la fase gaseosa (Arey *et al*, 1986).

El Benzo (a) antraceno se encuentra en todos los sitios, sin embargo, existe una marcada diferencia si se comparan las concentraciones obtenidas en las zonas comercial-residencial, comercial, e industrial. Los sitios de monitoreo ubicados en zonas comerciales y comerciales-residenciales mantienen concentraciones de Benzo (a) antraceno mucho más altas, que las obtenidas en zonas industriales, como por ejemplo el Parque Industrial Cartago (PI-CA). Lo anterior podría asociarse a que en los primeros, el equipo de muestreo se encontraba en zonas con un alto flujo vehicular, mientras que el segundo el equipo se encontraba dentro del parque industrial, sin influencia directa de las emisiones vehiculares.

En el cuadro 11 se muestra el posible origen de algunos HAPS en relaciones diagnóstico para la fase particulada según datos recopilados en otras partes del mundo. La alta variabilidad de los HAPS en el ambiente, provoca la utilización de las relaciones para aproximar las fuentes de emisión con mayor certeza. El cuadro 12 muestra los resultados de las relaciones diagnóstico obtenidas en este estudio, utilizando los promedios de concentración generados durante la campaña de monitoreo en los distintos sitios de muestreo.

Cuadro 11. Relaciones diagnóstico para las PM_{10} y el origen de las partículas emitidas.

Fuente de emisión	Benzo (g,h,i) perileno / Benzo (a) pireno	Indeno (1,2,3-C.D) / Indeno + Benzo (g,h,i) perileno	Benzo (a) antraceno / Criseno + Benzo (a) antraceno	Fluoranteno / Fluoranteno + Criseno
Vehículos Diesel	1,20-2,20 (a)	0,35-0,70 (a)	0,38-0,64 (c)	0,60-0,70 (a)
Vehículos de Gasolina con Catalizador	2,50-3,30 (a)	0,21-0,22 (d)	0,22-0,55 (e)	0,40 (a)
Quema de Petróleo	< 0,5 (e)	-	-	-
Combustión de Madera	-	0,62 (f)	0,43 (b)	-
Polvo de camino de lastre	0,91 (g)	0,36 (g)	-	0,42 (g)
Suelo de carretera	0,86 (h)	0,42 (h)	0,38 (h)	0,54 (h)
Hornos industriales	0,02-0,06 (i)	0,36-0,57 (i)	0,23-0,89 (i)	0,21-0,26 (i)
Planta Cementera	0,06 (i)	0,65(i)	0,58 (i)	0,25 (i)
Fundición de chatarra (metal)	0,09 (j)	-	0,28 (j)	0,45 (j)

a) (Rogge *et al*, 1993a); b) (Li *et al*, 1993); c) (Sicre *et al*, 1993); d) (Khalili *et al*, 1995); e) (Simcik *et al*, 1999); f) (Gogou *et al*, 1996); g) (Rogge *et al*, 1993b); h) (Oda *et al*, 2001); i)
(Yang *et al*, 1998); j) (Tsai *et al*, 2001). Recopilación (Huerta, 2011)

Cuadro 12. Relaciones diagnóstico de HAPS obtenidas en PM_{10} en los distintos sitios de monitoreo.

	Benzo (g,h,i) perileno / Benzo (a) pireno	Indeno (1,2,3-C.D) / Indeno + Benzo (g,h,i) perileno	Benzo (a) antraceno / Criseno + Benzo (a) antraceno	Fluoranteno / Fluoranteno + Criseno
Catedral	0,95	0,67	0,84	0,33
Hatillo	1,13	0,69	0,97	0,41
CNU-SJ	1,01	0,67	0,87	0,46
Registro Nacional	1,18	0,63	0,96	0,39
Escazú	1,34	0,67	0,97	0,37
Belén	1,00	0,33	1,00	0,39
Heredia	1,00	0,43	0,98	0,55
Santa Ana	2,80	0,68	0,97	0,57
Parque Industrial Cartago	1,56	0,63	0,92	0,29
Alajuela	2,00	0,60	0,99	0,77

Únicamente en la relación diagnóstico para los PM_{10} que involucra al Benzo (a) antraceno parece existir un aporte más grande por parte de los hornos industriales que de las fuentes provenientes de las emisiones vehiculares, mientras que en las otras tres existen en todos los sitios un posible aporte muy alto por parte de los vehículos diesel y de gasolina con catalizador. Lo anterior se sustenta en el caso de Alajuela, donde los valores de las relaciones diagnóstico entre el Benzo (g,h,i) perileno y el benzo (a) Pireno es de 2,0 respectivamente. La relación entre el Indeno y el Benzo (g,h,i) perileno para la mayoría de los sitios muestra valores entre 0,6 y 0,7, generando un poco más de posibilidades, ya que según Rogge en 1993, puede darse por contribución de vehículos diesel, condición más recurrente en los puntos de monitoreo, pero además, Yang en 1998 plantea que una relación 0,36-0,57 podría señalar una contribución de hornos industriales. Por último, los datos del cociente de Fluoranteno y Criseno indica nuevamente aporte por fuentes móviles.
Saldarriaga en el 2008, menciona que una relación diagnostica entre Benzo (a) pireno y el benzo(g,h,i)perileno cercana a 0,60 o superior puede indicar generación de HAPS por fuentes de combustión de gasolina y diesel. Estudios similares se han realizado en zonas urbanas de distintos lugares del mundo.

Evento Polvos del Sahara

La Figura 34 muestra el comportamiento de los niveles de concentración de PM_{10} en el año 2013 para 9 de los sitios de medición. Los puntos rojos ilustran los datos estadísticamente atípicos; en este caso los máximos valores atípicos se encuentran en las fechas del 06 y 07 de agosto, coincidiendo perfectamente con el evento de polvos provenientes del Sahara. En el gráfico se aprecia que el sitio de Escazú es una excepción; sin embargo, en este punto no se tomaron mediciones durante el periodo del evento, es por esto que el máximo valor reportado en este sitio no corresponde a esa fecha.

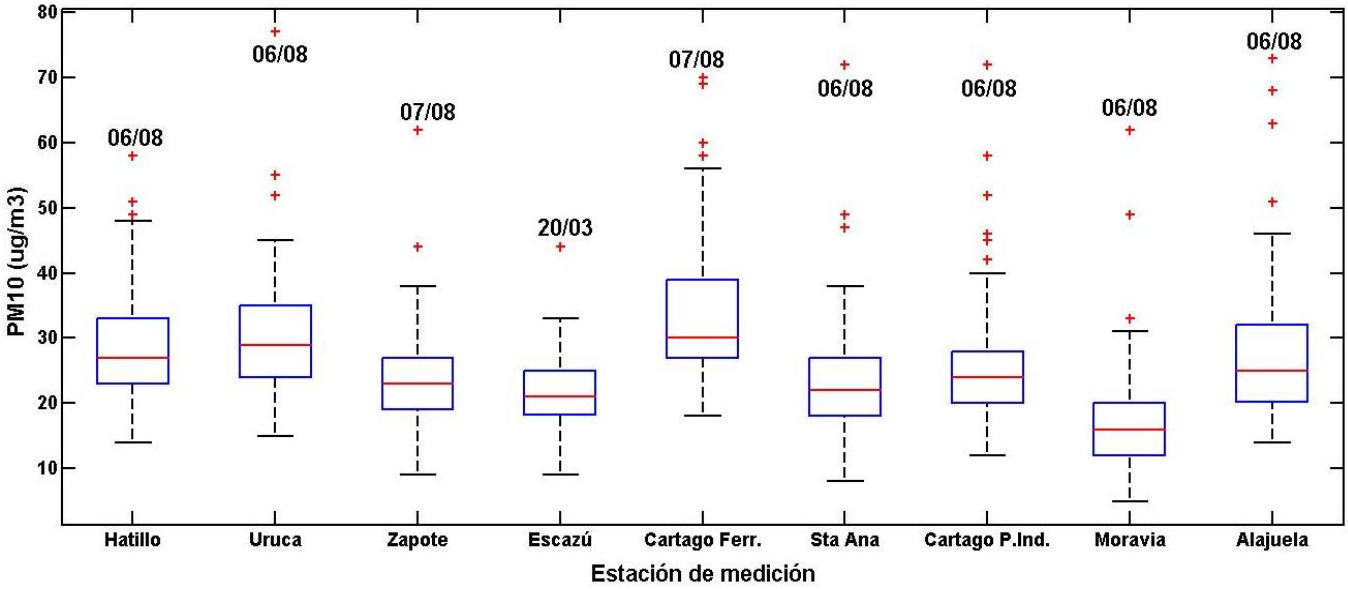


Figura 34. Gráfico de cajas de los niveles de concentración de partículas PM_{10} en la GAM para el año 2013. Tomado de: Poleo y Briceño 2014.

La figura 35 muestra que en los días 06 y 07 de agosto del año 2013 se presenció un aumento muy amplio en los niveles de concentración de PM_{10}. Esto sucedió en todos los sitios de muestreo por lo que no se considera un evento aislado; se logra afirmar una afectación en común en toda la región metropolitana costarricense. Además, según Poleo y Briceño (2014), con imágenes e instrumentos satelitales se observa que estos picos de concentración ocurrieron en la misma fecha en la que todo el territorio nacional estuvo cubierto por una masa de polvos provenientes del Sahara.

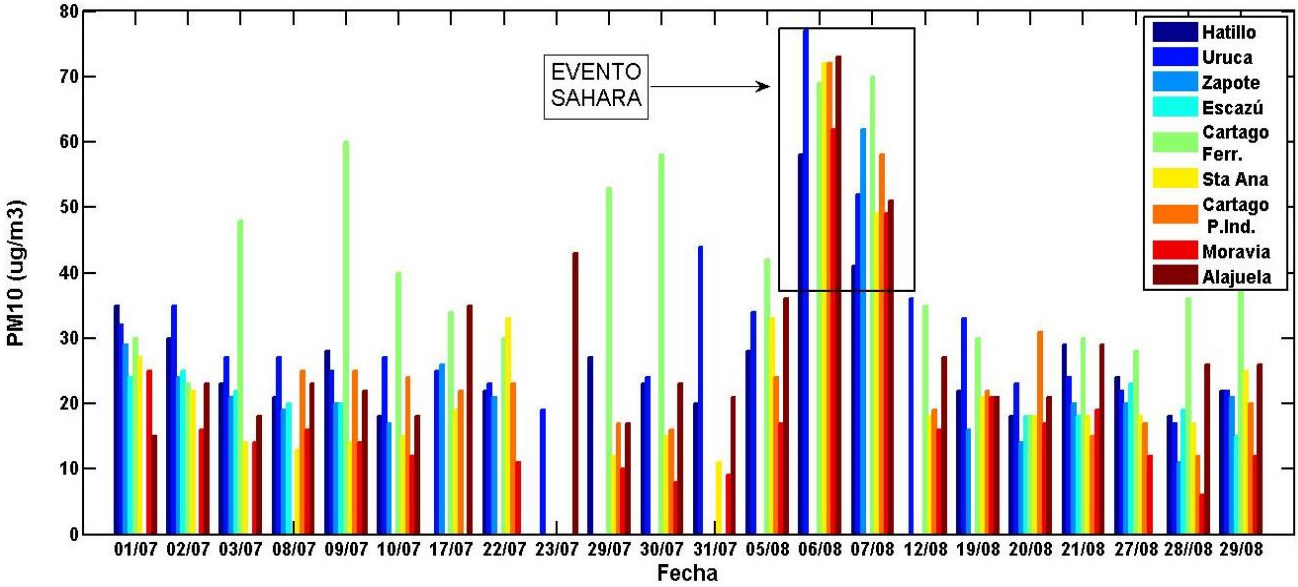


Figura 35. Niveles de concentración de PM_{10} en 9 puntos de medición de la GAM para el periodo comprendido entre julio y agosto 2013. Tomado de: Poleo y Briceño 2014.

Este tipo de eventos naturales tienen afecciones de tipo agudo (a corto plazo) en la salud humana de la población expuesta. Alergias y asma son de los casos más comunes que se ven en aumento debido a la exposición a altas concentraciones de partículas PM_{10} en periodos cortos. La figura 36 muestra un aumento en los casos atendidos por este tipo de enfermedades en la semana del 04 al 10 de agosto del año 2013. Debido a la falta de información más específica y detallada no se pueden realizar correlaciones con resultados numéricos más contundentes. Existe gran probabilidad de que los centros hospitalarios de la provincia de Limón hayan tenido un aumento claro en casos de consulta por enfermedades respiratorias agudas de las vías superiores.

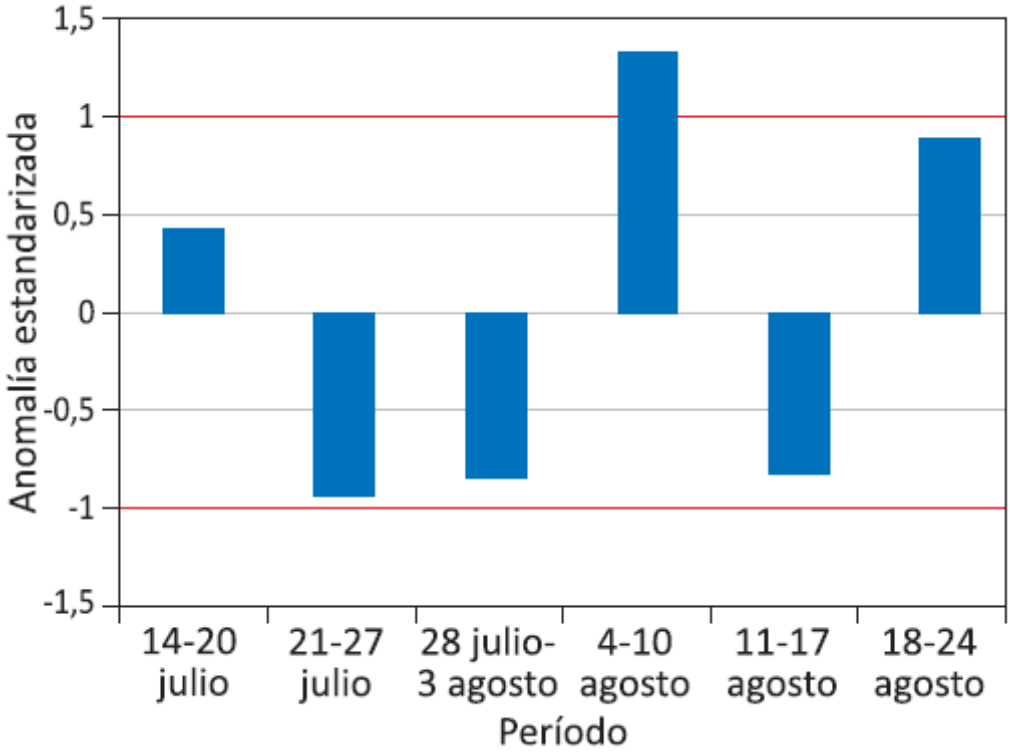


Figura 36. Casos atendidos por enfermedades respiratorias por semanas epidemiológicas entre el 14 de julio al 24 agosto 2013. Fuente: Caja Costarricense del Seguro Social. Tomado de: (Poleo y Briceño 2014)

Partículas $PM_{2.5}$

Las partículas $PM_{2.5}$ pueden ingresar hasta la región alveolar y provocar efectos a la salud más severos; pese a ello, en Costa Rica aún no se cuenta con normativa que regule la concentración de este contaminante. En el cuadro 13 se muestra la concentración encontrada en el sitio de muestreo ubicado en el Plantel de la Municipalidad de San José. En los años 2013 al 2015 se observa que los promedios anuales superan el criterio establecido por la Organización Mundial de la Salud. Además, los valores máximos registrados también superaron en casi el doble (año 2013) la concentración máxima establecida por este ente internacional; para los años 2014 y 2015 estos máximos superaron el criterio en más del doble.

Cuadro 13. Concentración promedio anual de partículas $PM_{2.5}$ (µg/m3) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2013, 2014 y 2015

Año	**2013**	**2014**	**2015**	
Sitio de muestreo	Plantel Municipal, MSJ	Plantel Municipal, MSJ	Plantel Municipal, MSJ	**Criterio OMS**
Promedio Anual (µg/m³)	22	25	24	10
Desviación Estándar (µg/m³)	7	11	9	-
Valor máximo registrado en 24 horas	48	69	66	25

Dióxido de Nitrógeno

Los cuadros 14, 15, 16 y 17 muestran los resultados obtenidos de la medición, por método pasivo, de la concentración de dióxido de nitrógeno en San José, Belén, Escazú y Alajuela, respectivamente.

En el caso de San José (cuadro 14) se observa que todos los sitios cumplen con la normativa nacional de 100 µg/m^3 como límite permisible en promedio anual. No obstante, muchos de los sitios muestreados presentan, en ambos años, un incumplimiento respecto al criterio internacional de la OMS (40 µg/m^3). La mayor parte de los incumplimientos se asocian a espacios con alto impacto de flujo vehicular.

Cuadro 14. Resultados de la concentración de Dióxido de Nitrógeno encontrada en los sitios de muestreo ubicados en San José para los años 2013 – 2015.

Sitio de muestreo	2013	2014	2015	Criterio OMS
Costado Norte de Catedral	56	51	50	40
Este del AyA, Avenida San Martín	43	43	43	
50 m Sur y 100 m Este del MINAE, Barrio Francisco Peralta	31	29	27	
detrás de la Iglesia de Santa Teresita.	28	28	28	
Costado Sur del Tribunal Supremo de Elecciones	31	26	29	
frente a JAPDEVA, Avenida 9.	47	45	47	
50 m Oeste de la Iglesia de Barrio México	50	34	38	
200 m Sur del Parque El Salvador, Barrio Pitahaya	34	34	35	
frente al Hospital San Juan de Dios	65	63	65	
50 m Este de la Bomba La Castellana.	54	58	54	
150 m norte de Ferrocarril al Pacífico	37	39	40	
Barrio La Cruz, Avenida 26 entre Calles 13 y 15.	37	31	32	
200 m Sur de antigua Dos Pinos, Barrio Luján	30	30	29	
de autos M. Gamboa 100 m Sur, Barrio Córdoba	nan	30	30	
frente a Gollo, Zapote	nan	47	45	
frente a Abastecedor Los Sauces, San Francisco de Dos Ríos	nan	27	27	
frente a Faro del Caribe, San Francisco de Dos Ríos	nan	46	46	
50 m Este de la Iglesia Católica, Paso Ancho	nan	41	38	
Walmart 75 m Sur, San Sebastián	nan	51	55	
frente al Centro de Reciclaje, Hatillo #3.	nan	44	33	
frente a Escuela Jorge Debravo, Hatillo #8	nan	28	29	
frente a Iglesia del Perpetuo Socorro, Mata Redonda	nan	32	31	

Sitio de muestreo	2013	2014	2015	Criterio OMS
Costado Sureste de la Plaza Santa Fé, Pavas.	nan	34	33	
Carnes San Antonio 100 m Norte, Lomas de Bibrí, Pavas	nan	20	19	
Costado Norte de la Nunciatura, Barrio Rohrmoser.	nan	32	29	
frente a Escuela la Peregrina, La Uruca.	nan	21	18	
frente a Autos JAC, La Uruca	nan	36	37	
Costado Este de la Númar, Calle 24	44	42	43	

Nan: no medido durante el año de estudio

En el sector de Belén (cuadro 15) se encontraron concentraciones bajo cumplimiento nacional, al igual que en San José. Sin embargo, una vez más se reportan valores cercanos y superiores a los límites expuestos en el criterio de la OMS, esto en algunos de los puntos con mayor afectación de flujo vehicular y zonas industriales.

Cuadro 15. Resultados de la concentración de Dióxido de Nitrógeno encontrada en los sitios de muestreo ubicados en Belén para los años 2013-2015.

Sitio de muestreo	2013	2014	2015	Criterio OMS
Frente al Hotel Herradura.	32	38	42	40
Frente a la rotonda en Residencial Cariari	18	21	21	
50 m Este de la Plaza de la Asunción	34	41	46	
Costado Norte de la Firestone.	34	43	43	
Centro Pedagógico Belén (Cerca del Marriot)	27	29	29	
Iglesia de la Ribera.	20	20	23	
Parque Recreativo Ojo de Agua.	28	35	35	
Polideportivo Belén	20	23	25	
Centro Comercial Plaza Belén.	35	40	45	
Costado del Palacio Municipal.	34	37	38	

Kimberly Clark.	21	20	19	

Para el caso del sector de Escazú, el cuadro 16 muestra que las concentraciones cumplen tanto la normativa nacional como la internacional. Algunos de los puntos muestreados reportan promedios muy cercanos al límite máximo admisible según la OMS.

Cuadro 16. Resultados de la concentración de Dióxido de Nitrógeno encontrada en los sitios de muestreo ubicados en Escazú para los años 2013 y 2014.

Sitio de muestreo	2013	2014	Criterio OMS
Wallmart, en el Centro Comercial Trejos Montealegre.	34	33	40
Multicentro Paco.	36	38	
Plaza Loma Real, Guachipelín.	27	29	
Calle El Llano, Cruce Alajuelita.	29	26	
San Antonio-La Guaria.	18	19	
Urbanización La Avellana, San Antonio.	18	18	
Zona Protectora, San Antonio.	6	8	
El Jardín, Escazú.	30	30	
Barrio Corazón de Jesús, Frente a Escuela Nocturna.	18	20	
Municipalidad de Escazú.	38	39	

Finalmente, el cuadro 17 ilustra las concentraciones encontradas de dióxido de nitrógeno para el sector de Alajuela en el año 2014. Estos sitios de muestreo son parte de la extensión de la red de monitoreo para este contaminante, por lo que no se reportan valores para años anteriores. En este caso, solamente un punto se encuentra bajo incumplimiento, según la normativa internacional. Sin embargo, y al igual que los demás sectores muestreados, todos los puntos están por debajo del límite aceptado por la normativa costarricense.

Cuadro 17. Resultados de la concentración de Dióxido de Nitrógeno encontrada en los sitios de muestreo ubicados en Alajuela para el año 2014.

Sitio de muestreo	2014	Criterio OMS
Escuela Carrizal Alajuela	12	40
Iglesia de Sabanilla	11	
Iglesia del Carmen	35	
Parque de Barrio San José	45	
Dos Pinos, El Coyol	40	
Escuela Ricardo Fernández, La Garita	22	
Escuela de Turrúcares, Alajuela	28	
Escuela Gabriela Mistral, La Guácima	29	
Iglesia de San Rafael de Alajuela	21	
Fuerza Pública de Ríos Segundo	32	

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los niveles de concentración de partículas PM_{10} en la GAM cumplen con la normativa nacional (Decreto N° 30221-S), más no así la normativa de referencia internacional dictada por la Organización Mundial de la Salud. Este incumplimiento se da de forma general para los años 2013, 2014 y 2015 (promedios anuales) estudiados en el presente informe.
2. Los sitios de muestreo que presentan mayor concentración de PM_{10} corresponden a lugares con impacto dominado por el sector industrial y zonas con alto flujo vehicular.

3. En los últimos años no se registra ninguna tendencia al aumento o descenso importante en cuanto material particulado se refiere. En algunos sitios se evidencian descensos significativos; sin embargo, no existe una generalidad en la red de monitoreo que prueben algún efecto favorable en temática de gestión de la calidad del aire.
4. Los niveles de dióxido de nitrógeno en la GAM superan los límites dictados por la OMS en muchos de los sitios de muestreo pasivo. Se recomienda, con base en estas mediciones, hacer un esfuerzo por la medición automática de este contaminante para determinar las horas en las cuales el problema es mayor. La regulación del flujo vehicular y las velocidades promedio de circulación de vehículos en el casco central de San José y en otras vías, conocidas por el colapso del tránsito, deben ser estudiados y corregidos con el fin de reducir las emisiones de este contaminante. Además, una política de mejora en la calidad de los combustibles podría resultar importante como meta para planes de reducción de emisiones.
5. En el año 2013 se evidenció un evento natural de suma importancia con aporte importante a los niveles de concentración de partículas PM_{10}. Este evento significó un 144% de aumento respecto a los días anteriores y posteriores a él. Además, aportó un 3% de aumento en el promedio anual de este contaminante. Los eventos naturales de este tipo tienen afectación de importancia a la salud humana por sus efectos agudos, especialmente en la población más vulnerable con padecimientos respiratorios.
6. A manera de recomendación, se deben sumar esfuerzos para la medición automática de contaminantes criterio y el modelado dinámico de contaminantes atmosféricos. Esto permitirá entender mejor los procesos de dispersión, transporte, transformación y deposición de los contaminantes que están asociados no solo a las fuentes de emisión, sino también a la geografía y meteorología del territorio costarricense. Las proyecciones a largo plazo tendrán mejor criterio con la ayuda de este tipo de herramientas.
7. Se debe implementar el pronóstico de los contaminantes criterio más importantes y el establecimiento de índices de la calidad del aire, con la

finalidad de advertir a la población de posibles escenarios de contaminación con alto impacto a la salud humana, para su debida prevención a corto plazo.

8. Utilizar los datos como retroalimentación para los procesos de ordenamiento territorial y elaboración de planes reguladores a nivel municipal.
9. Articular esfuerzos con SETENA para que la información obtenida en la red de monitoreo permita un mejor conocimiento de la línea base existente antes de la implementación de nuevos proyectos, y contribuir con esto en el mejoramiento del proceso de evaluación del impacto ambiental.

REFERENCIAS

- Afeti GM, Resch FJ. 2000. Physical characteristics of Saharan dust near the Gulf of Guinea. Atmospheric Environment 34:1273–9.
- American Meteorological Society, citado 2015: Deposition. Glossary of Meteorology. [Disponible en http://glossary.ametsoc.org/wiki/deposition.]
- Chudnovsky, A., Ben-Dor, E., Kostinski, A. B., & Koren, I. 2009. Mineral content analysis of atmospheric dust using hyperspectral information from space. Geophysical Research Letters, 36, L15811. doi: 10.1029/2009GL037922.
- Finlayson- Pitts, B.J., Pitts, J.N. Jr. 2000. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere, Academic press. USA. p 5, 15, 35.
- Francis E. Grousset, Pierre E. Biscaye. 2005. Tracing dust sources and transport patterns using Sr, Nd and Pb isotopes. Chemical Geology 222: 149–167
- Goudie, A. S., & Middleton, M. J. 2001. Saharan dust storms, nature and consequences. Earth-Science Reviews, 56, 179−204.
- Herrera, J. Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la GAM de Costa Rica: 2007. Informe técnico. 2010. Disponible en: http://www.digeca.go.cr/aire/aire_descargas.html Accesado el 21/10/14.
- Jamhari, A. A., M. Sahani, M. T. Latif, K. M. Chan, H. S. Tan, M. F. Khan, and N. Mohd Tahir, 2014: Concentration and source identification of polycyclic

aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM10 of urban, industrial and semi-urban areas in Malaysia. Atmos. Environ., 86, 16–27

- Joseph M. Prospero, Olga L. Mayol-Bracero. September 2013. Understanding the Transport and Impact of African Dust on the Caribbean Basin. Bulletin of the American Meteorological Society. Volume 94, Issue 9 pp. 1329-1337.
- Kabatas, B., Unal, A., Pierce, R.B., Kindapa, T., Pozzoli L. 2014. The contribution of Saharan dust in PM10 concentration levels in Anatolian Peninsula of Turkey. Science of the Total Environment 488–489: 413–421
- Kumar, W. Abouchami, S.J.G. Galer, V.H. Garrison, E. Williams, M.O. Andreae. 2014. A radiogenic isotope tracer study of transatlantic dust transport from Africa to the Caribbean. Atmospheric Environment 82: 130-143
- Poleo, D., Briceño, J. 2014. La intrusión de polvo del Sahara y del Sahel en la capa límite atmosférica del Mar Caribe: episodio de agosto 2013. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 13: 68-89.
- Prospero, J., & Carlson, T. N. 1981. Saharan outbreaks over the tropical North Atlantic. Pure and Applied Geophysics, 119, 677−691.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. 2006. Atmospheric Chemistry and Physics. John Wiley & Sons. 2th Edition. p 35
- Shumake-Guillemot, J.; Jalkanen, L.; Adhair-Rohani, H. 2014. Air Quality and Human Health, a priority for joint action. WMO Bulletin 63 (2) pp 15-18.
- Sportisse, B. (2008). *Fundamentals in Air Pollution: From Processes to Modelling.* France: Springer.
- Vallero, D. A. 2008. Fundamentals of Air Pollution. Elsevier. 4th Edition. pp 674
- Wu, D., Z. Wang, J. Chen, S. Kong, X. Fu, H. Deng, G. Shao, and G. Wu, 2014: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric PM2.5 and PM10 at a coal-based industrial city: Implication for PAH control at industrial agglomeration regions, China. *Atmos. Res.*, 149, 217–229