



Informe de calidad del Aire

San José

Año 2014



Licda. Sandra León Coto

Rectora Universidad Nacional

Dra. Sandra García Pérez

Alcaldesa Municipalidad de San José

Publicación de resultados generada en el marco del Programa de Cooperación UNA-MSJ Programa Agenda Verde San José, bajo la responsabilidad técnica de los siguientes funcionarios:

Licda. Delia Guevara

Departamento de Gestión Ambiental

Dr. Jorge Herrera Murillo

Coordinador Laboratorio de Análisis Ambiental UNA

Para obtener mayor información sobre el presente documento favor dirigirse a los correos electrónicos: dguevara@msj.go.cr, o jorge.herrera.murillo@una.cr.

Índice de contenidos

Introducción	4
Gestión de Calidad del Aire	6
Contaminantes Criterio	9
Resultados Año 2014	15
Conclusiones	33
Referencias	34

INTRODUCCION

La evolución de las sociedades modernas se ha caracterizado por un uso intensivo de los recursos naturales y una degradación sostenida del medio ambiente, de la cual el aire ha sido una víctima más. Las necesidades de desarrollo de infraestructura, los patrones de movilización en centros urbanos, la creciente demanda energética, la falta de planificación urbana son solo algunos de los factores de presión que han originado la emisión de importantes cantidades de contaminantes al aire en países desarrollados, pero especialmente en aquellos que se encuentran en vías de desarrollo.

En Costa Rica las principales actividades comerciales e industriales se concentran en el Gran 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 toneladas de PM₁₀ siendo

los vehículos de carga liviana quienes generan más de la mitad de las partículas PM_{10} , mientras que los particulares son los mayores generadores de NO_x y CO.

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 y la Municipalidad de San José, con la colaboración del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, han venido consolidando una Red de Monitoreo de Calidad del Aire para el cantón, 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 el cantón. El propósito de este documento es el de ofrecer a la población un análisis objetivo sobre las tendencias que guarda la calidad del aire del cantón, en un contexto actual e histórico. Con esta y otras medidas tanto el gobierno local 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 del cantón su participación en la solución de los problemas que ambientalmente los aquejan y con ello mejorar la calidad de vida.

GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

La contaminación del aire es un estado en el que gases y partículas alcanzan concentraciones suficientemente altas para provocar afectaciones directas o indirectas a plantas, animales, ecosistemas, estructuras y la salud humana (Jacobson, 2002). De esta forma, la calidad del aire se define en términos de la concentración de los contaminantes gaseosos y el material particulado.

Los contaminantes pueden ser generados de manera natural por diversos procesos, entre los cuales se puede mencionar: la erosión del suelo, descomposición de materia orgánica, incendios forestales, actividad volcánica, entre otros. Por otra parte, aquellos emitidos por causa de las actividades del hombre son conocidos como antropogénicos, y en su mayoría son resultado de la quema de combustibles fósiles. En este grupo de contaminantes están los que son producidos por: fuentes fijas (grandes establecimientos industriales estacionarios), fuentes de área (conjunto de pequeños locales industriales o comerciales), y fuentes móviles, vehículos automotores, que también incluyen aquellos que no circulan por carretera.

Los contaminantes que son emitidos de manera directa, ya sea de una fuente natural o antropogénica, son llamados contaminantes primarios (por ejemplo, el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno). También existen los llamados secundarios, los cuales son resultado de las reacciones químicas entre contaminantes primarios y otros componentes de la atmósfera (por ejemplo el ozono, que se forma de la reacción entre el dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles)(INE, 2010).

Estudios epidemiológicos, han demostrado una asociación directa entre algunos contaminantes del aire y la salud de la población, razón por la cual han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente. Estos contaminantes son conocidos como criterio. Los contaminantes criterio incluyen : el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de ni-

trógeno (NO_2), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2,5 micrómetros (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$). La vigilancia de las concentraciones ambientales de estas sustancias se puede llevar a cabo por medio del muestreo, análisis y el monitoreo del aire ambiente.

La medición de los contaminantes atmosféricos se puede lograr a través de los siguientes métodos:

Muestreo pasivo.

En esta técnica se colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Las bases teóricas para el muestreo están relacionadas tanto con el proceso de difusión como el de permeación por medio de la primera ley de difusión de Fick, la cual ofrece una expresión matemática que describe el flujo ($\text{moles/m}^2\text{-s}$) de las moléculas de un gas a través del aire y establece que este flujo es directamente proporcional al gradiente de concentración del gas (moles/m^3) en la longitud de la trayectoria.

Muestreo activo.

En esta técnica de muestreo se requiere de energía eléctrica para succionar y hacer pasar el aire a través de un medio de colección físico o químico. Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas); dentro de estos últimos, el más utilizado actualmente es el muestreador de alto volumen “High-Vol” (para PST, PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$). Entre las desventajas de ésta técnica, se encuentra el hecho de que no se aprecian los valores mínimos y máximos durante el día, sólo promedios generalmente de 24 horas y que se requieren de análisis de laboratorio para obtener el valor de concentración del contaminante a ser medido.

Método automático.

Estos métodos son los mejores en términos de la alta resolución de sus mediciones, permitiendo llevar a cabo mediciones de forma continua para concentraciones horarias y menores. Las muestras colectadas se analizan utilizando una variedad de métodos los cuales incluyen la espectroscopia y cromatografía de gases. Además, estos métodos tienen la ventaja de que una vez que se carga la muestra al sistema nos da las lecturas de las concentraciones de manera automática y en tiempo real.

El monitoreo de la calidad del aire es una actividad que consiste en vigilar una situación para detectar los cambios en las concentraciones de los contaminantes con el tiempo, y se define como el conjunto de metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua y sistemática las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire. El monitoreo, los modelos de calidad del aire y los inventarios de emisiones, son parte integral de un sistema de gestión de la calidad del aire. El establecimiento de este modelo se encuentra directamente vinculado con el cumplimiento de objetivos económicos, de evaluación y de regulación. En el desarrollo de un plan efectivo de gestión de la calidad del aire es necesario contar con información confiable relacionada con los niveles de contaminación en el aire a través del monitoreo.

El propósito más importante del monitoreo de la calidad del aire es generar y proporcionar la información necesaria a científicos, legisladores y planificadores para que ellos tomen las decisiones adecuadas a favor de la gestión y mejora del medio ambiente. El monitoreo juega un papel regulador en este proceso proporcionando la base científica para el desarrollo de las políticas y estrategias, en el establecimiento de objetivos durante la evaluación del cumplimiento de las metas y en la ejecución de las acciones (INE, 2010).

Para lograr una evaluación adecuada de los contaminantes se deben considerar las condiciones ambientales las cuales intervienen en la dispersión de los contaminantes por lo que se debe contar con información proveniente de mediciones de parámetros

como presión, humedad, velocidad y dirección del viento, temperatura. También se debe determinar el área geográfica donde se llevará a cabo la evaluación y debe ir relacionado a los objetivos que se hayan planteado previamente.

Las redes de monitoreo consisten en estaciones donde se evalúan periódicamente la concentración de diferentes contaminantes, en Costa Rica a partir del 2003 se inició con la red de monitoreo de la calidad del aire, el cual es un proyecto conjunto entre el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, el Ministerio de Salud, el Ministerio de Ambiente y Energía y la Municipalidad de San José.

Las estaciones de muestreo se localizan en sitios representativos de la zona urbana en concordancia con el decreto 30221-SALUD y monitorean partículas PM_{10} , dióxido de nitrógeno tanto por difusión pasiva como método activo, dióxido de azufre por método activo, aniones (cloruro, sulfato y nitrato) y metales pesados en partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Los inventarios de emisiones se realizan para identificar las fuentes emisoras de contaminantes, concentración de los contaminantes y caracterizar las actividades a las cuales se encuentran asociados los niveles de contaminación registrados. Esta información es una de las principales herramientas que los gobiernos deben considerar para el desarrollo de estrategias de control de la calidad del aire.

CONTAMINANTES CRITERIO

Partículas

Las partículas que se encuentran en la atmósfera pueden estar en estado sólido o líquido, pero la mayor parte de ellas se emiten directamente, desde las fuentes, en forma sólida mientras que las líquidas, se originan por la condensación de algunos gases y vapores emitidos o son el resultado de transformaciones químicas. Por lo

tanto, generalmente también las partículas atmosféricas se clasifican en aerosoles primarios o aerosoles secundarios (Arya, 1999).

Una característica muy importante de las partículas en suspensión es su tamaño, pero como tienen una infinidad de formas no es posible caracterizarlas con una sola dimensión geométrica real. Por ello, se utiliza el diámetro aerodinámico; este indicador es igual al diámetro de una partícula esférica de densidad unitaria que tiene la misma velocidad de sedimentación que la partícula en cuestión, sin importar su forma, tamaño o densidad bajo condiciones de temperatura, presión y humedad existentes (WHO, 2010).

En base al tamaño, las partículas atmosféricas usualmente se dividen en dos grandes categorías, finas y gruesas, las cuales tienen diferente origen y composición. Las partículas gruesas tienen un diámetro que va de 2,5 μm hasta 10 μm (PM_{2,5-10}), mientras que las finas poseen diámetros menores o iguales a 2,5 μm (PM_{2,5}) (USEPA, 2009).

En términos de regulación ambiental las partículas de mayor atención en los últimos quince años han sido las partículas menores de 10 μm , también llamadas fracción torácica o inhalable (ya que tienen la capacidad de penetrar y depositarse a lo largo del tracto respiratorio), y hasta hace apenas unos años las partículas finas y ultrafinas, es decir, las menores a 2,5 y 1 μm , respectivamente. Estas partículas tienen la capacidad de llegar a los bronquiólos respiratorios y a la región alveolar, por lo que se les conoce como partículas respirables (He et al., 2001).

El diámetro de las partículas está en función de los procesos de formación de las mismas y se clasifican de las siguientes categorías:

-Moda de nucleación (>0,02 μm): incluye a las partículas que provienen de la condensación de vapores, y su formación depende de las condiciones ambientales de presión, temperatura y humedad relativa, así como de la propia concentración del vapor, aunque en este proceso también pueden intervenir otras partículas finas que estén presentes, las cuales se adhieren a las gotas de vapor formadas.

-Moda Aitken (0,02 – 0,1 μm): estas partículas pueden ser primarias, o bien secundarias, originadas como consecuencia del crecimiento de partículas nucleadas, por condensación³, o por reacciones en fase líquida. La permanencia de este tipo de partículas en la atmósfera es más prolongada que la de las partículas en la moda de nucleación, mientras que su concentración se ve afectada en gran medida por la presencia de actividades humanas, y es alrededor de cien veces más elevada a nivel de la calle en las ciudades que en zonas remotas.

-Moda de acumulación (0,1-1 μm): surgen producto del crecimiento de partículas de la moda Aitken, principalmente por reacciones en fase líquida que ocurren en las gotas de agua en las nubes. Su tiempo de residencia en la atmósfera es grande, ya que los mecanismos de remoción son menos eficientes en este intervalo de tamaños; por tanto, se pueden utilizar como indicadores o trazadores del transporte de largo alcance de las partículas (Environment Canada, 2000).

-Moda gruesa (>1 μm): se forman en su mayoría por procesos mecánicos, como la erosión de la superficie terrestre o el aporte del aerosol marino. Se caracteriza por presentar un reducido número de partículas, pero una elevada masa.

La composición química de las partículas es muy variable, siendo que muchas provienen de una compleja serie de procesos de formación, lo que les da una alta probabilidad de estar presentes como mezclas heterogéneas. Muchos trabajos han mostrado que la fracción fina de los aerosoles atmosféricos generalmente está compuesta por: nitratos, sulfatos, amonio, carbono formando parte de las moléculas orgánicas, y las gruesas por hierro, calcio, zinc y plomo (Miranda et al., 2004), cuyas fuentes fundamentales son los productos de erosión del viento (polvo), partículas de origen marino, las provenientes de erupciones volcánicas y de actividades humanas. Es importante especificar que en la gran mayoría de los aerosoles colectados se encuentran como una mezcla de especies químicas donde solamente es posible

separar la fracción fina de la gruesa por la utilización de un equipo que permita hacer una selección de partículas específicas. El carácter de esta mezcla determina finalmente las propiedades, los procesos de formación y toxicidad de este material particulado (Molina y Molina, 2002). De esta manera se puede afirmar que la mezcla de estos contaminantes en el aire nunca es constante ni simple.

El 80% de los aerosoles emitidos anualmente son generados por procesos de origen natural, donde se incluyen los polvos terrestres y las sales marinas; sin embargo el aumento de partículas de origen antropogénico ha producido cambios en las condiciones terrestres, tales como la contribución al calentamiento global y en forma indirecta, la disminución de la capa de ozono en la capa terrestre (Hinds, 1999).

Por ejemplo, el aumento del agujero de la capa de ozono que se genera a partir de bajas temperaturas durante el invierno en la estratosfera polar, donde sustancias como ácido nítrico y vapor de agua condesada generan nubes; estas superficies sirven como sitios donde se lleva a cabo la conversión catalítica de compuestos clorados, como los clorofluorocarbonos (CFCs), cloro molecular (Cl_2) y ácido hipocloroso (HOCl). Así, durante el verano polar, el sol disocia estos compuestos en cloro atómico, que reaccionan con el ozono presente para formar oxígeno y monóxido de cloro, que a su vez se convierte nuevamente en cloro atómico, generando la repetición del ciclo con la subsiguiente destrucción de ozono (Brasseur y Granier, 1992).

El aumento de la concentración de aerosoles estratosféricos afecta directamente al balance de radiación terrestre, al obstruir la energía solar entrante y dispersarla hacia el espacio, ocasionando un cambio en el albedo terrestre (reflectividad) y enfriamiento en la troposfera y la superficie terrestre (Schaap et al., 2004).

Muchos estudios epidemiológicos han mostrado asociaciones significativas en los niveles de partículas atmosféricas y padecimientos a la salud humana; como diversos síntomas respiratorios, agravamientos de afecciones respiratorias, cambios en el funcionamiento pulmonar y cardiovascular e incluso incremento de la mortalidad

(Spurny, 2000). Los daños que pueden causar los aerosoles atmosféricos están en función de la probabilidad de que penetren en el sistema respiratorio.

Investigaciones epidemiológicas han mostrado un incremento en enfermedades respiratorias en diversas ciudades, con el incremento de las PM_{10} . Incluso los esfuerzos no sólo se han orientado hasta las $PM_{2,5}$, sino que existen estudios específicos para partículas ultrafinas, que muestran efectos tóxicos en los tejidos pulmonares, como el hierro (Fe), que produce óxidos y radicales libres que reaccionan en el organismo, produciendo inflamaciones y otros males.

MONÓXIDO DE CARBONO

Las principales fuentes que generan este contaminante son los procesos de combustión de hidrocarburos y sustancias que contienen carbono, tales como la gasolina, el diesel, el gas licuado de petróleo, etc. Otra importante fuente de formación del monóxido de carbono son los incendios estructurales, forestales y agrícolas.

Este es un gas incoloro e inodoro que se combina con la hemoglobina para formar la carboxihemoglobina. Esta sustancia afecta al sistema nervioso central provocando cambios funcionales cardiacos y pulmonares, dolor de cabeza, fatiga, somnolencia, fallos respiratorios y hasta la muerte.

Este gas puede causar la muerte por envenenamiento en pocos minutos porque substituye el oxígeno en los eritrocitos de la sangre. Las mujeres embarazadas y sus bebés, los niños pequeños, las personas mayores y las que sufren de anemia problemas del corazón respiratorios pueden ser mucho más sensibles al monóxido de carbono.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO

El dióxido de nitrógeno se deriva de los procesos de combustión, siendo ésta la principal fuente de su vertimiento a la atmósfera. Es un contaminante primario y

juega un doble papel en materia medio ambiental ya que se le reconoce afecto potencialmente dañino de manera directa, pero también es uno de los precursores del ozono. La acumulación de dióxido de nitrógeno, en el cuerpo humano, constituye un riesgo para las vías respiratorias ya que se ha comprobado que: inicia, activa y puede alterar la capacidad de respuesta de las células en el proceso inflamatorio, siendo más frecuentes los casos de bronquitis crónica.

El nitrógeno forma siete diferentes óxidos, de los cuales sólo el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se presentan como contaminantes importantes del aire. Los NO_x que se forman durante la combustión, son el producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico, o bien de la oxidación del nitrógeno orgánico del combustible. En el primer caso, la producción de NO_x se favorece a medida que aumenta la temperatura y, resultado de esta dependencia, la producción de NO y NO₂ es función también de la relación aire/combustible en la mezcla. El bióxido puede formar ácido nítrico y ácido nitroso en presencia de agua. Ambos pueden precipitarse junto con la lluvia o combinarse con el amoníaco de la atmósfera para formar nitrato de amonio.

El óxido nítrico al igual que el monóxido de carbono, puede combinarse con la hemoglobina de la sangre reduciendo su capacidad de transporte de oxígeno. El bióxido de nitrógeno irrita los alvéolos pulmonares. Estudios de salud ocupacional muestran que este gas puede ser fatal en concentraciones elevadas. En contraste con el ozono, el NO₂ puede ser más abundante en interiores que en el exterior, esto se debe a que una fuente de este contaminante son las estufas de gas L.P. y los quemadores o calderas industriales que utilizan el mismo combustible.

Los óxidos de nitrógeno generan, junto con los hidrocarburos, contaminantes de tipo secundario, la llamada contaminación fotoquímica, cuyo principal componente es el ozono (O₃). Los óxidos de nitrógeno son producidos principalmente por los transportes y por el consumo de combustibles en la industria y en la generación de energía.

RESULTADOS AÑO 2014

PARTICULAS PM₁₀ Y PM_{2,5}

El método de referencia utilizado para el muestreo es el declarado en el año 2000 en las regulaciones del código federal de los Estados Unidos. Para esto, en cada uno de los sitios se utilizaron equipos marca Tisch MFC. En el caso de los PM₁₀ el aire ambiental es aspirado en forma simétrica (independientemente de la dirección del viento), durante (24 ± 1) horas, a través de la abertura circunferencial ubicada en la parte superior del cabezal. Una vez dentro del cabezal de muestreo, el flujo de aire se aceleró a través de las boquillas impactadoras a una velocidad de $(1,13 \pm 10 \%) \text{ m}^3/\text{min}$, para después ser dirigido hacia la superficie de impactación. Debido a su momento, aquellas partículas que poseen diámetros aerodinámicos mayores a los 10 μm , quedan retenidas en la superficie de la cámara, mientras que las restantes poseen la suficiente inercia como para continuar a través de un sistema de 16 boquillas de diámetro específico, hacia un filtro colector. El equipo cuenta con una bomba de vacío, la cual se encuentra conectada a un sensor de masa, que permite no solo seleccionar el flujo de aire al cual se realiza el muestreo, sino que también regula la potencia de la bomba para mantenerlo constante a través de todo el periodo monitoreo. Además, el muestreador tiene incorporado un cronometro con el fin de contabilizar el tiempo total de muestreo (fig 1).



Figura 1. Esquema de un muestreador de aire de alto volumen empleado en la colección de partículas PM_{10} . Fuente: <http://www.scielo.org.co>

Para recolectar las partículas $PM_{2,5}$ alto volumen, se utilizó la misma estructura de los muestreadores de PM_{10} marca Tisch MFC, con un cabezal distinto de la misma línea, haciendo entrar el aire ambiente a una velocidad de flujo de $1,13 \text{ m}^3/\text{min}$ para desembocar en una cámara de amortiguación a través de una pantalla diseñada para evitar la entrada de insectos y material de gran tamaño al sistema (figura 2 (a,b)). Posteriormente el aire fluye a través de un conjunto de 40 boquillas de diámetro específico que dirigen el aire hacia un disco poroso humedecido con aceite, cuya función es retener todas las partículas con diámetro aerodinámico mayor a 2,5 (figura 2 (C)). Las partículas menores de 2,5 micras logran atravesar el filtro y son dirigidas hacia un filtro colector. De la misma forma que el sistema de PM_{10} , el equipo cuenta con una bomba de vacío, la cual se encuentra conectada a un sensor de masa, que permite no solo seleccionar el flujo de aire al cual se realiza el muestreo, sino que también regula la potencia de la bomba, para mantenerlo constante a través de todo el periodo de muestreo. Además, el muestreador tiene incorporado un cronómetro con el fin de contabilizar el tiempo total de muestreo (GPO, 2000).

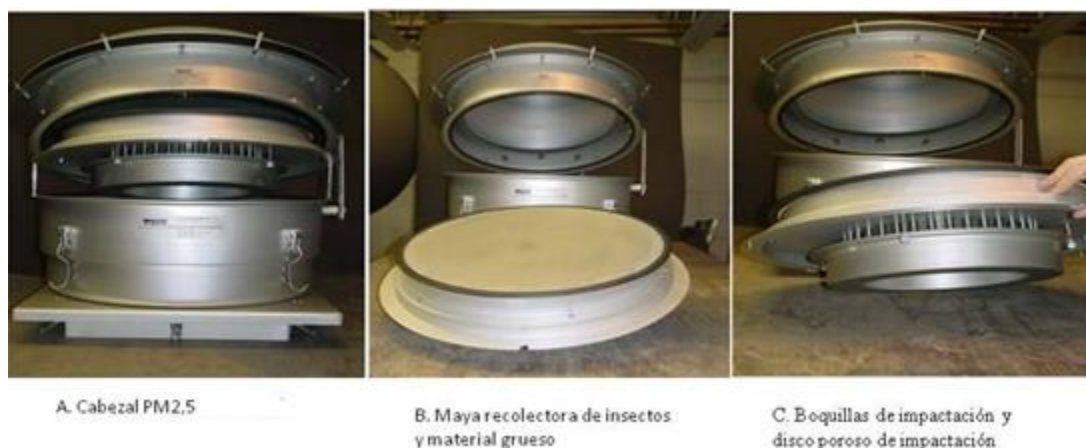


Figura 2. Esquema de las distintas zonas de impactación internas del cabezal PM2,5 alto volumen. (Foto: <http://tisch-env.com/pdf/pm25.pdf>)

En el cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos como promedio anual para los sitios de monitoreo de partículas PM_{10} en el cantón de San José. Tal como se puede observar en las áreas industriales y comerciales de alto flujo vehicular (La Uruca) se presentan concentraciones significativamente diferentes ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a las registradas para zonas residenciales y comerciales de bajo flujo vehicular (Hatillo). Durante el año 2014 todos los sitios de monitoreo, cumplieron tanto el límite de exposición aguda de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como el valor de exposición crónica de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contemplados en el decreto 30221-S “Reglamento de Inmisión de Contaminantes de Costa Rica”. Tal como se muestra en el cuadro 2, las concentraciones de partículas PM_{10} en el cantón se mantuvieron estables con respecto a los datos obtenidos para el período anterior.

Cuadro 1. Concentración promedio anual de partículas PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenidas en el cantón de San José, 2014.

Sitio de muestreo	Número de datos válidos	Promedio Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación Estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor máximo registrado en 24 horas
Catedral Metropolitana	96	24	6	43
Sección de Parques, MSJ	82	27	8	46

Centro de Reciclaje, Hatillo	83	25	8	50
CNFL, La Uruca	85	30	10	60
Registro Nacional, Zapote	105	23	8	52

Cuadro 2. Tendencia de la concentración de partículas PM₁₀ registradas en el cantón de San José, 2008-2014.

Sitio de monitoreo	Promedio Anual (µg/m ³)						
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Catedral Metropolitana	29	27	28	24	27	24	24
Sección de Parques, MSJ	26	28	*	26	29	29	27
Centro Reciclaje, Hatillo			37	32	29	30	25
CNFL, La Uruca			35	32	27	29	30
Registro Nacional, Zapote			29	22	22	23	23

*Durante este período no se registraron mediciones en este sitio

En el caso de las partículas finas (PM_{2,5}) se registraron concentraciones (cuadro 3) que incumplen la normativa internacional tanto para exposición aguda como crónica, en los dos sitios de monitoreo ubicados en el cantón: Plantel de la Municipalidad de San José y Compañía Nacional de Fuerza y Luz en La Uruca. Es importante aclarar que el decreto 30221-S no contempla valores criterio para este contaminante. De esta forma de cada 100 días en donde se realizó monitoreo de la calidad del aire en los dos sitios antes mencionados, solamente en 86 y 81 días se cumplen las normas internacionales para PM_{2,5} para el edificio de la Municipalidad y La Uruca, respectivamente. Al igual que en el caso de las partículas gruesas, las PM_{2,5} presentan valores estables al comparar los promedios anuales de los últimos tres años (Cuadro 4).

Cuadro 3. Resultados de concentración de partículas PM_{2,5} registrados durante el año 2014 en el cantón de San José.

Sitio de muestreo	Número de datos válidos	Promedio Anual (µg/m³)	Desviación Estándar (µg/m³)	Valor máximo registrado en 24 horas
Plantel Municipal, MSJ	91	25	11	69
CNFL, La Uruca	87	23	10	76

Cuadro 4. Tendencia de la concentración de partículas PM_{2,5} registradas en el cantón de San José, 2012-2014.

Sitio de monitoreo	Promedio Anual (µg/m³)		
	2012	2013	2014
Catedral Metropolitana	27	26	25
Sección de Parques, MSJ	20	22	23

Para todos los sitios de muestreo, los iones predominantes resultaron ser el SO₄²⁻ y el Na⁺, seguidos del NH₄⁺ y Cl⁻. Los constituyentes iónicos representan, en promedio, el 15,3% del total de la masa de PM₁₀. En el caso de los metales pesados, el Fe, Al, Mn y Cu mostraron las concentraciones mayores en las partículas PM₁₀, mientras que el Cr y el Ni fueron las especies menos abundantes (Cuadros 5-8).

Cuadro 5. Composición iónica de las partículas PM₁₀ colectadas durante el año 2014 en el cantón de San José.

Sitios de monitoreo	Fluoruro (µg/m³)	Cloruro (µg/m³)	Nitrato (µg/m³)	Fosfato (µg/m³)	Sulfato (µg/m³)	Sodio (µg/m³)	Amonio (µg/m³)
Catedral	0,27 ± 0,08	1,71 ± 0,42	1,41 ± 0,33	0,62 ± 0,15	4,33 ± 2,11	2,15 ± 1,05	1,72 ± 0,64

Sitios de monitoreo	Fluoruro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cloruro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nitrato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fosfato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sulfato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sodio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Amonio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Metropolitana							
Sección de Parques, MSJ	$0,31 \pm 0,09$	$1,55 \pm 0,47$	$1,28 \pm 0,30$	$0,55 \pm 0,17$	$4,27 \pm 1,92$	$2,23 \pm 1,13$	$1,64 \pm 0,81$
Centro de Acopio, Hatillo, MSJ	$0,26 \pm 0,04$	$1,61 \pm 0,37$	$1,32 \pm 0,14$	$0,51 \pm 0,13$	$4,42 \pm 2,32$	$2,08 \pm 1,27$	$1,95 \pm 0,74$
CNFL, La Uruca	$0,32 \pm 0,15$	$1,73 \pm 0,63$	$1,32 \pm 0,29$	$0,64 \pm 0,09$	$4,35 \pm 2,81$	$2,21 \pm 1,02$	$2,07 \pm 0,86$
Registro Nacional, Zapote	$0,36 \pm 0,35$	$1,45 \pm 0,46$	$1,32 \pm 0,37$	$0,46 \pm 0,09$	$4,04 \pm 2,31$	$2,10 \pm 0,95$	$1,83 \pm 0,75$

El valor indicado como $\pm$ representa la desviación estándar del dato

Cuadro 6. Composición iónica de las partículas $\text{PM}_{2.5}$ colectadas durante el año 2014 en el cantón de San José

Sitios de monitoreo	Fluoruro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cloruro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nitrato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fosfato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sulfato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sodio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Amonio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CNFL, La Uruca	$0,24 \pm 0,08$	$1,02 \pm 0,44$	$0,95 \pm 0,21$	$0,25 \pm 0,06$	$3,84 \pm 2,10$	$1,09 \pm 0,76$	$1,67 \pm 0,61$
Edificio Municipalidad de San José	$0,33 \pm 0,10$	$1,26 \pm 0,38$	$1,10 \pm 0,27$	$0,36 \pm 0,13$	$3,96 \pm 1,88$	$1,45 \pm 0,91$	$1,81 \pm 0,74$

El valor indicado como $\pm$ representa la desviación estándar del dato

Cuadro 7. Concentración de especies metálicas (ng/m^3) presentes en las partículas PM_{10} colectadas en el cantón de San José, 2014

	Pb	Cu	Ni	Cr	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	V
Catedral	7,5	14,6	4,3	11,6	2429	201	502	374	352	30,1	73,2	2,85
Sección de Parques	18,4	40,5	4,8	18,3	2875	233	658	392	567	97	328	2,92

	Pb	Cu	Ni	Cr	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	V
Hatillo	15,3	19,5	4,0	10,3	2980	257	594	236	580	82	279	2,51
La Uruca	8,8	14,2	10,5	12,5	2438	273	517	242	873	20,4	407	3,29
Zapote	12,1	32,9	8,2	10,7	2575	241	432	207	639	12,7	494	2,12

Cuadro 8. Concentración de especies metálicas (ng/m³) presentes en las partículas PM_{2,5} colectadas en el cantón de San José, 2014

	Pb	Cu	Ni	Cr	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	V
CNFL, La Uruca	7,7	13,3	8,7	11,2	2150	174	468	197	508	16,6	291	2,84
Edificio Municipalidad de San José	16,5	42,1	5,3	16,4	2826	225	593	381	470	109	305	2,11

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 crustal, 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:

$$FE = (E/R)_{\text{Aire}} / (E/R)_{\text{suelo}} \quad (1)$$

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 cantón de San José, se muestran en el cuadro 9 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 metal mecánicas, etc.

Cuadro 9. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas en los sitios de muestreo de partículas PM10, año 2014

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

Para el resto de los metales, los FE resultaron ser pequeños, situación que pudiera deberse a que la composición media de los suelos en Costa Rica fuese diferente a la media universal utilizada para el cálculo de los factores, por lo que no se puede descartar la contribución antropogénica.

Contribución marina a la composición química de los aerosoles:

El aerosol marino tiene una contribución importante en la composición de las partículas PM10. 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):

$$[X]_{\text{nam}} = M_x - [X / \text{Na}]_{\text{am}} M_{\text{Na}} \quad (2)$$

donde la expresión $[X / \text{Na}]_{\text{am}}$ denota la relación de masa del ion X con respecto al Na^+ en el agua de mar, M_x y M_{Na} la concentración del ion X y del Na^+ en las partículas PM10. De acuerdo con Berg y Winchester (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 $[X]_{\text{nam}}$.

En el cuadro 10 muestra la distribución, para cada uno de los sitios de muestreo, de la fracción debida al aerosol marino.

Cuadro 10. Contribución del aerosol marino ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a la composición de las partículas PM10 colectadas en los sitios de muestreo de partículas PM10, 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 ($\mu\text{eq}/\text{m}^3$) de cationes presentes en las partículas en el eje “y” versus la correspondiente suma de los aniones en el eje “x”. Las características de la regresión lineal de la suma de los cationes y aniones, para los cinco sitios de monitoreo, se muestran en el cuadro 11.

Cuadro 11. Relación entre la suma de concentraciones equivalentes de cationes y aniones presentes en las partículas PM_{10} colectadas en el cantón de San José, 2014.

Sitio de muestreo	Regresión Lineal	Coefficiente 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

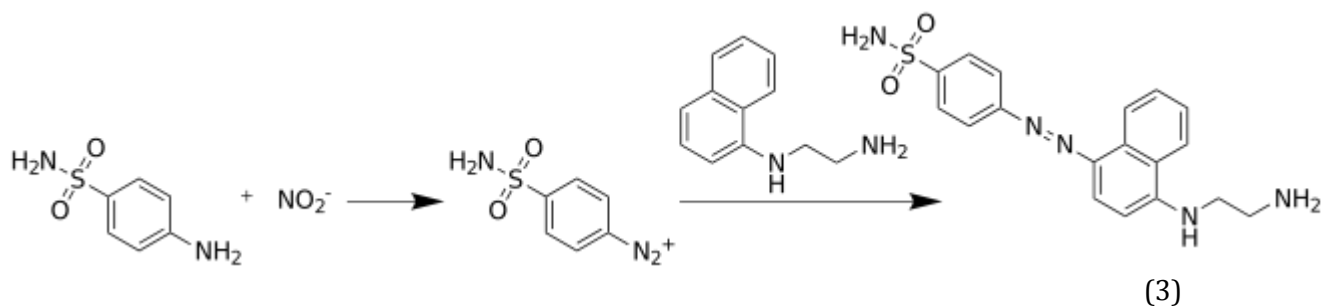
Sería de esperarse que la pendiente obtenida para estas rectas de mejor ajuste fuese muy cercana a uno, debido al balance iónico. Si se toma en cuenta que no se cuantificó e incluyó en el balance, el ión hidronio, el grado de cercanía de la pendiente al valor esperado de uno, brinda una idea de la magnitud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

Dióxido de nitrógeno:

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

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



El producto de esta reacción es un compuesto coloreado fucsia cuya absorbancia es proporcional a la concentración. Tanto a las muestras como a una curva de calibración compuesta por seis disoluciones patrón de NO₂ (0 a 1 000 µg/l) preparadas a partir de la disolución madre de 1000 mg/l, se les midió la absorbancia a 542 nm. La masa de dióxido de nitrógeno colectada en cada tubo se determinó por interpolación en la curva de calibración, a partir de la cual se obtiene la concentración de NO₂ en el aire utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{M \times L}{D \times A \times t} \quad (4)$$

Siendo:

C = Concentración ambiental media del contaminante

M = Masa de contaminante captada

t = Tiempo de captación

A = Sección frontal del dispositivo de captación

L = Longitud del espacio interno de difusión

D = Coeficiente de difusión del contaminante

Para el monitoreo de los niveles de NO₂ en el Área Metropolitana se seleccionaron un total de 25 sitios de muestreo distribuidos de acuerdo como se indica en el cuadro 12. Las muestras se colectaron cada 22 días.

Cuadro 12. Localización de los sitios de muestreo utilizados en el monitoreo de NO₂ en el cantón de San José.

Sitio	Naturaleza del sitio	Ubicación exacta
1	Comercial	Hospital San Juan de Dios, Paseo Colón

Sitio	Naturaleza del sitio	Ubicación exacta
2	Comercial	Frente al costado norte de la Catedral Metropolitana
3	Comercial	150 m norte de la Antigua estación del ferrocarril al Pacífico
4	Comercial	50 m este de la estación de servicio La Castellana, avenida 10
5	Residencial	Avenida 26, Calles 13 y 15, Barrio La Cruz
6	Residencial	200 m sur de la antigua fábrica Dos Pinos, Barrio Luján
7	Residencial	50 m sur y 100 este del edificio del MINAE, Barrio Francisco Peralta
8	Comercial	Iglesia Santa Teresita, Barrio Aranjuez
9	Comercial	Costado sur del Tribunal Supremo de Elecciones de Costa Rica
10	Comercial	75 m este del edificio del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
11	Comercial	Frente al edificio de la Junta Administradora de Puertos de la vertiente Atlántica
12	Residencial	150 m oeste de la Iglesia de Barrio México
13	Residencial	200 m sur del Parque El Salvador, Barrio Pithaya
14	Industrial	Costado este de la industria Numar, Barrio Cuba
15	Comercial	100 m Sur de autos Gamboa, Barrio Córdoba
16	Comercial	Frente a Tienda Gollo, Zapote
17	Comercial	Frente a Abastecedor Los Sauces, San Francisco de Dos Ríos
18	Comercial	Frente a Faro del Caribe, San Francisco de Dos Ríos
19	Comercial	50 m Este de la Iglesia Católica, Paso Ancho
20	Comercial	75 m sur Supermercado Walmart, San Sebastián
21	Comercial	Frente al Centro de Reciclaje, Hatillo #3.
22	Residencial	Frente a Escuela Jorge Debravo, Hatillo #8
23	Residencial	Frente a Iglesia del Perpetuo Socorro, Mata Redonda
24	Industrial	Costado Sureste de la Plaza Santa Fe, Pavas.

En el cuadro 13 se presentan el promedio anual de las concentraciones de NO₂ obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en el cantón de San José durante los años 2011-2014. Tal como se puede notar al menos diez sitios en San José presentan valores mayores a 40 µg/m³, que corresponde al valor anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo vehicular en donde se llegan a alcanzar excedencias de hasta un 53% con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud. Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 12 y 15% para sitios comerciales e industriales respectivamente. Algunos de los sitios presentan valores muy estables, principalmente en zonas de transición entre áreas residenciales y comerciales.

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de dióxido de nitrógeno en los sitios de muestreo ubicados en la ciudad de San José. Janssen et al (1989) han utilizado esta herramienta estadística, con anterioridad, para distinguir entre fenómenos locales y de larga escala en el análisis de contaminación del aire. El valor y signo de cada uno de los factores que conforman los componentes principales permite diferenciar si las características de las fuentes de emisión locales afectan las concentraciones locales de cada uno de los sitios de monitoreo. Estos resultados pueden ser utilizados para validar la clasificación de los sitios de monitoreo.

Cuadro 13. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno obtenidos en el cantón de San José y Belén durante los años 2011-2014.

Sitio de Muestreo	Promedio Anual 2011 (ug/m ³)	Promedio Anual 2012 (ug/m ³)	Promedio Anual 2013 (ug/m ³)	Promedio Anual 2014 (ug/m ³)
Hospital San Juan de Dios, Paseo Colón	55	59	65	63
Frente al costado norte de la Catedral Metropolitana	43	46	56	51
150 m norte de la Antigua estación del ferrocarril al Pacífico	29	31	37	39
50 m este de la estación de servicio La Castellana, avenida 10	42	44	54	58
Avenida 26, Calles 13 y 15, Barrio La Cruz	26	28	37	31
200 m sur de la antigua fábrica Dos Pinos, Barrio Luján	26	25	30	30
50 m sur y 100 este del edificio del MINAE, Barrio Francisco Peralta	21	23	31	29
Iglesia Santa Teresita, Barrio Aranjuez	29	31	23	28
Costado sur del Tribunal Supremo de Elecciones de Costa Rica	19	17	31	26
75 m este del edificio del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados	23	21	43	43
Frente al edificio de la Junta Administradora de Puertos de la vertiente Atlántica	40	42	47	45

Sitio de Muestreo	Promedio Anual 2011 (ug/m ³)	Promedio Anual 2012 (ug/m ³)	Promedio Anual 2013 (ug/m ³)	Promedio Anual 2014 (ug/m ³)
150 m oeste de la Iglesia de Barrio México	26	28	50	34
200 m sur del Parque El Salvador, Barrio Pithaya	29	32	34	34
Costado este de la industria Numar, Barrio Cuba	41	40	44	63
100 m Sur de autos Gamboa, Barrio Córdoba				30
Frente a Tienda Gollo, Zapote				47
Frente a Abastecedor Los Sauces, San Francisco de Dos Ríos				27
Frente a Faro del Caribe, San Francisco de Dos Ríos				46
50 m Este de la Iglesia Católica, Paso Ancho				41
75 m sur Supermercado Walmart, San Sebastián				51
Frente al Centro de Reciclaje, Hatillo #3.				44
Frente a Escuela Jorge Debravo, Hatillo #8				28
Frente a Iglesia del Perpetuo Socorro, Mata Redonda				32
Costado Sureste de la Plaza Santa Fe, Pavas.				34

El cuadro 14 resume los resultados del análisis estadístico para los datos promedio mensuales de dióxido de nitrógeno en el período 2011-2014 para el cantón de San José.

Cuadro 14. Resumen de los resultados del análisis de componentes principales aplicados a los promedios mensuales de dióxido de nitrógeno en el cantón de San José, 2011-2014.

	Primer Componente	Segundo Componente	Tercer Componente
Varianza total explicada	47 %	30%	18%
Factores con valores < 0		Sitio 3: -0,874 Sitio 5: -0,950 Sitio 10: -0,865	Sitio 12: -0,286 Sitio 7: -0,452 Sitio 4: -0,099
Factores con valores > 0	Valores mayores: Sitio 1: 0,934 Sitio 6: 0,892 Sitio 13: 0,942 Sitio 9: 0,896 Sitio 11: 0,927 Valores menores: Sitio 3: 0,321	Sitio 12: 0,515 Sitio 11: 0,369	Sitio 8: 0,648 Sitio 1: 0,392 Sitio 3: 0,299

El porcentaje de la varianza total ($\text{Varianza} = \Sigma(X_{\text{modelo}} - X_{\text{medida}})^2$) explicado por el primer factor corresponde a un 47%, lo que implica que las concentraciones de NO_2 en los distintos sitios de monitoreo están fuertemente correlacionadas (cambios en fase). Lo anterior indica que las variaciones en la concentración de este gas están determinadas principalmente por fenómenos de mesoescala (meteorológicos). El segundo componente muestra valores negativos para los sitios ubicados al sur de la ciudad y positivos para aquellos ubicados en el sector norte, lo que hace presumir un gradiente sur-norte, con concentraciones menores en los sitios ubicados al sur del cantón. El tercer componente extraído muestra valores positivos

para sitios de alto flujo vehicular con importante concentración de actividades comerciales y valores negativos para zonas residenciales, evidenciando la importante influencia de las emisiones.

PRECIPITACION TOTAL

El depósito atmosférico es el proceso mediante el cual las partículas y gases contaminantes del aire llegan a la superficie de la tierra. Si ocurre en presencia de precipitación pluvial (lluvia, llovizna, granizo, nieve, etc.) se denomina depósito húmedo, si se deposita a través de procesos como la sedimentación, la impactación y la adsorción, se denomina depósito seco.

Para caracterizar la acidez de las precipitaciones se usa la escala de pH que indica la concentración de iones hidrógeno (H^+) responsables de la acidez. En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5,6, esta acidez se debe al dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera y que reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Cuando el depósito húmedo tiene una mayor acidez el valor de pH es menor a 5,60 y se considera como precipitación ácida o lluvia ácida.

El incremento de la acidez en el agua de lluvia se debe, principalmente, a reacciones químicas en la atmósfera de los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno emitidos durante la combustión, en presencia de agua. Los precursores de la lluvia ácida pueden viajar cientos de kilómetros desde las fuentes de emisión y provocar gran variedad de impactos en una amplia región geográfica (US Environmental Protection Agency, 2009). En ecosistemas terrestres y acuáticos, la lluvia ácida puede ocasionar la declinación de especies, no obstante, esto también depende del tiempo de exposición y del nivel de sensibilidad. En la vegetación puede causar daños directos como pérdida de nutrientes foliares y necrosis en hojas y tejidos reproductores, lo que conduce al debilitamiento de la planta, pérdida de frutos y descenso en la productividad, sin embargo, los efectos indirectos pueden ser mayores. La acidificación progresiva del suelo origina la pérdida de cationes básicos y acumulación de aluminio, inhibiendo la fijación de nitrógeno en leguminosas, la biodisponibilidad de fosfatos y el crecimiento de las raíces. Esto conduce a la defoliación, clorosis y debilitamiento generalizado de la planta, haciéndola vulnerable al ataque de plagas, enfermedades, sequías u otros contaminantes. La degradación del suelo, también se manifiesta en aguas superficiales y mantos freáticos a través de procesos de acidificación, eutrofización y acumulación de metales

tóxicos como el aluminio, que ocasionan la muerte progresiva de organismos acuáticos (Krupa, 1999; Larssen et al., 2006).

Los resultados del año 2014 (cuadro 15) indican que la acidez de la lluvia presentó poca variabilidad espacial con valores promedio de pH entre 4,41 y 4,70. El valor promedio más ácido se obtuvo en la estación ubicada en la Municipalidad de San José, con un pH de 4,11.

Cuadro 15. Composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el Cantón de San José con respecto a otros sitios de la GAM, 2014.

	pH	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl- mg/l	F- mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l
San José	4,11	3,42	1,12	1,04	0,21	0,65
Heredia	4,25	3,15	1,15	1,23	0,23	0,70
Belén	4,15	3,21	1,17	1,19	0,27	0,43

CONCLUSIONES

-Los niveles de partículas finas (PM_{2,5}) registrados en el cantón de San José, superan las normas anuales establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, tanto para la exposición crónica como para la aguda.

-Las diferencias existentes entre las fuentes que afectan la variabilidad de la composición química de las partículas determinan, en forma adicional, algunas propiedades de las mismas como el caso de la acidez, ya que mientras que las partículas colectadas en los sitios ubicados al este del cantón muestran una menor acidez, las partículas de las zonas industriales y de alto flujo vehicular presentan mayor grado de acidez provocada en parte por concentraciones mayores de componentes secundarios tales como SO₄⁻² y NO₃⁻.

- De acuerdo con los datos obtenidos para las concentraciones de metales presentes en las partículas, solamente en el caso del Pb y Cu se presentan factores de enriquecimiento significativos (mayores a 10), lo que evidencia el aporte de las actividades antropogénicas a la composición química del material particulado.
- La influencia del aerosol marino juega un papel fundamental en la composición química de las partículas PM₁₀, siendo este el responsable del 13% y 5% del sulfato y magnesio, respectivamente.
- Las concentraciones de los iones sulfato y nitrato presentes en las partículas PM₁₀ se incrementan a una tasa anual cercana al 6,5% lo que evidencia indirectamente el aumento en las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno en la cuenca atmosférica.
- Existe una tendencia a incrementar el grado de acidificación de las muestras de precipitación total, ya que el número de eventos al año con pH inferior a 5,60 esta incrementado a una tasa de 16% anual en el período 2007-2014, razón por la cual se debe explorar más a fondo las causas de este fenómeno.
- Persiste el crecimiento en los niveles de dióxido de nitrógeno en sitios comerciales e industriales del cantón de San José, aunque la tasa de crecimiento para este año fue ligeramente menor en comparación con el período anterior.

REFERENCIAS

Arya, P.S. 1999. Air Pollution Meteorology and Dispersion. New York, New York. Oxford University Press, Inc. p. 310

Brasseur, G., Granier, C. 1992. Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. Science, 257:1239

Duce, R.A., Hoffman, G.L., Zoller, W.H., 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: Pollution or natural. Science 187, 59–61.

Environment Canada and Health Canada (2000), “National Ambient Air Quality Objectives for Particulate Matter”. Executive Summary. Part 1: Science Assessment Document. CEPA/FPAC Working Group on Air Quality Objectives and Guidelines

Environmental Protection Agency (2009), “Integrated Science Assessment for Particulate Matter”. EPA/600/R-08/139F.

He K., Yang F., Ma Y., Zhang Q., Yao X., Chan C. K., Cadle S., Chan T., y Mulawa, P. 2001. The characteristic of PM_{2.5} in Beijing, China. Atmospheric Environment. 38: 4959–4970.

Hinds W. C. 1999. Aerosol Technology Properties Behavior and Measurement of Airborne Particles, John Wiley and Sons Inc., E.U.A.

INE (2010). Manual 1: Principios de medición de la calidad del aire. Instituto Nacional de Ecología de México

Jacobson, M. (2002). Atmospheric Pollution. Cambridge University Press.

Krupa, S. V. (1999). Polución, población y plantas. Trad. M. Bauer. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Larssen, T.; Lydersen, E.; Tang, D.; He, Y.; Gao, J.; Liu, H.; Duan, L.; Seip, H.M.; Vogt, R.D.; Mulder, J.; Shao, M.; Wang, Y.; Shang, H.; Zhang, X.; Solberg, S.; Aas, W.; Økland, T.; Eilertsen, O.; Angell, V.; Liu, Q.; Zhao, D.; Xiang, R.; Xiao, J.; Luo, J.. (2006). "Acid rain in China". *Environmental Science & Technology*. 40(2):418-425.

Miranda M. C. J., Espinosa A., Barrera V. 2004. PIXE: Analysis of Atmospheric Aerosols from three Sites in Mexico City", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 219-220, pags (157-160)

Molina L. T., Molina M. J. 2002. *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Schaap, M., Denier Van Der Gon, H. A. C., Visschedijk, A. J. H., Van Loon, M., ten Brink, H. M., Dentener, F. J., Putaud, J-P., Guillaume, B., Liousse, C., y Builtjes, P. J. H. (2004), "Anthropogenic Black Carbon and Fine Aerosol Distribution over Europe". *Journal of Geophysical Research*, Vol.109, D18207.

Spurny Kwetoslav R. "Aerosol Chemical Processes in the Enviroment". Lewis Publishers, E.U.A. 2000

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, UK.

World Health Organization Europe (2005). *Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide.*"

Zoller, W.H., Gordon, R.A., Duce, R.A., 1974. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science* 183, 198–200.