

INFORME CALIDAD DEL AIRE

Área Metropolitana Costa Rica

2017-2018



Dr. Daniel Salas Peraza

Ministro, Ministerio de Salud

Dr. Alejandro Muñoz Villalobos

Presidente Ejecutivo, Refinadora Costarricense de Petróleo

Ing. Johnny Araya Monge

Alcalde, Municipalidad de San José

Ing. Horacio Alvarado Bogantes

Alcalde, Municipalidad de Belén

Dr. Alberto Salom Echeverría

Rector, Universidad Nacional

Grupo Técnico Encargado de la Elaboración del Informe

Ing. Tomás Soto Murillo
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

Dr. Jorge Herrera Murillo
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

M.Sc. José Félix Rojas Marín
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

Ing. Julio Murillo Hernández
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

Lic. Allan Quesada Esquivel
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

PhD María Martínez Cruz
OVSICORI
Universidad Nacional

Ing. Ana Villalobos Villalobos
Dirección de Protección al Ambiente Humano
Ministerio de Salud

Colaboradores en la Operación de la Red de Monitoreo

Dirección de Protección al Ambiente Humano
Ministerio de Salud

Departamento de Gestión Ambiental
Municipalidad de San José

Departamento de Gestión Ambiental
Municipalidad de Belén

Dirección de Aseguramiento de la Calidad
Refinadora Costarricense de Petróleo

Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

OVSICORI
Universidad Nacional

Introducción

Contaminantes y Calidad del Aire	Página 10
Contaminantes Atmosféricos	Página 13
Situación Calidad del Aire Mundial	Página 21
Situación Calidad del Aire Latinoamericano	Página 26
Situación Calidad del Aire en Costa Rica	Página 32
Polvos del Sahara	Página 35

1

Metodología	Página 39
Red Manual	Página 42
Red Automática	Página 52
Red Pasiva	Página 54
Control	

Metodología

2

Resultados

Resultados	Página 62
Red Manual	Página 63
Red Automática	Página 102
Red Pasiva	Página 106

3

Acciones

4

Mejoras implementadas	Página 130
-----------------------	------------

Conclusiones

5

Presentación

La vigilancia de la calidad del aire en el Área Metropolitana del país representa un esfuerzo coordinado de trabajo interinstitucional en donde participa el Ministerio de Salud como ente rector del tema, la Refinadora Costarricense de Petróleo, la Municipalidad de San José, la Municipalidad de Belén y la Universidad Nacional, quien es la responsable, a través del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales, de brindar el soporte técnico en materia de mediciones, incluyendo el respectivo aseguramiento de la calidad y control metrológico de los datos.

Este esfuerzo parte de la convicción de que solamente con un monitoreo sostenido en el tiempo, preciso, confiable, sistemático y riguroso se podrá contar con la información necesaria para poder comprender la naturaleza, comportamiento y tendencias de los principales contaminantes criterio en esta región del país como punto de partida para orientar el desarrollo de herramientas complementarias como los inventarios de emisiones, que en conjunto permitan la revisión constante y actualización de todos los instrumentos normativos de control de emisiones desarrollados hasta la fecha y su respectiva alineación para garantizar el cumplimiento de las políticas en materia de gestión ambiental y salud pública.

Los esfuerzos realizados por las instituciones participantes no se han centrado exclusivamente en la operación de la red de monitoreo, sino en el mejoramiento

sostenido de la misma, de forma tal que gracias a la inversión realizada por el Ministerio de Salud, la Refinadora Costarricense de Petróleo y la Universidad Nacional, a partir del año 2017 el país cuenta con 5 estaciones de monitoreo automático que ampliaron la capacidad de monitoreo existente mejorando los plazos de respuesta, la resolución y calidad de la información.

Este informe sintetiza los resultados más importantes registrados durante los años 2017-2018, a la espera de que la información generada sea incorporada en los procesos de planeación y toma de decisiones en materia de gestión de la calidad del aire y salud pública del país.

Dr. Jorge Herrera Murillo

Universidad Nacional

Resumen Ejecutivo

La contaminación del aire y el deterioro de su calidad constituyen una problemática importante a nivel mundial, regional y nacional. Los modelos de desarrollo adoptados por la mayoría de los países promueven la generación de emisiones de contaminantes como subproducto de los procesos industriales y comerciales, y a nivel país el incremento desmedido en el uso de vehículos de combustión interna entre otros factores se suma a la problemática.

El presente informe busca presentar los resultados obtenidos del análisis de los datos generados en la red de monitoreo de la calidad del aire del área metropolitana con el propósito de que los mismos sean utilizados por los distintos entes reguladores y gubernamentales en la generación de políticas, reglamentos y normativas tendiente a disminuir el nivel de contaminación del aire y mejorar la calidad del mismo.

Para obtener los resultados, se recolectó la información concerniente a concentración de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, así como concentración de metales en aire, los cuales se obtuvieron mediante muestreos activos, en estaciones automáticas y por difusión pasiva para dióxido de nitrógeno en distintos puntos de la red de

monitoreo, los cuales se hallan ubicados a lo largo de la Gran Área Metropolitana (GAM). Luego estas muestras fueron analizadas a través de métodos gravimétricos, cromatografía de iones y espectrometría de masas por acoplamiento inductivo de plasma (ICP-MS).

De los resultados obtenidos se logra concluir que para la concentración de PM_{10} se cumple la normativa nacional establecida en el decreto N° 39951-S para la mayoría de los sitios tanto en el 2017 como en el 2018. Sin embargo, incumplen de forma generalizada la normativa internacional establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Mientras tanto para $PM_{2.5}$ no se cumple ninguna de las dos normativas.

También se logra determinar que los sitios que presentan concentraciones más elevadas corresponden a aquellos con impacto dominado por el sector industrial y zonas con alto flujo vehicular. Sin embargo, no se detectan tendencias significativas de aumento o decremento en la concentración de PM_{10} a nivel general de la red.

Otro hallazgo importante que se desprende del análisis de los datos es que los niveles de dióxido de nitrógeno en la Gran Área Metropolitana superan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud para la mayoría de los sitios en ambos años.

Finalmente se realizan una serie de recomendaciones como la ampliación de la red automática y los datos que se generan de esta para analizar perfiles más detalladas correspondientes a la dispersión, transporte y deposición de los contaminantes criterio, lo que facilitaría la elaboración de planes reguladores en las distintas municipalidades de la Gran Área Metropolitana, así como retroalimentar los procesos de ordenamiento territorial.



1. Introducción

Calidad del Aire:
Contexto nacional e internacional

Contaminación y Calidad del aire

La contaminación del aire es uno de los principales problemas que afectan a la salud y el ambiente, y se entiende como cualquier sustancia, introducida en la atmósfera por fuentes antropogénicas, que tenga un efecto perjudicial sobre los seres vivos y el medio ambiente.¹

En el marco legal costarricense, la Ley General de Salud define la contaminación atmosférica como el deterioro de la pureza de la atmósfera 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 pureza del aire aceptadas internacionalmente y declaradas oficiales por el Ministerio.²

Los contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en dos grandes categorías. En primera instancia están los contaminantes primarios que son los que se emiten directamente a la

atmósfera dentro de los cuales destacan el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), plomo (Pb), material particulado (PM) entre otros. Luego están los contaminantes secundarios los cuales se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas (hidrólisis, oxidaciones o reacciones fotoquímicas) en las que intervienen los contaminantes primarios. Entre estos se destacan el dióxido de nitrógeno (NO₂) producto de la oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) o el ozono (O₃) producto de reacciones fotoquímicas.³

Otro criterio de clasificación para los agentes contaminantes del aire, es el punto de vista epidemiológico, donde los contaminantes criterio se definen como aquellos normados a los que se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire para proteger la salud humana y que están constituidos por el ozono, dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno,

¹ National Geographic. (2010). La contaminación del aire. Recuperado el 26 de junio de 2019 de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/la-contaminacion-del-aire>

²Ley 5395. (noviembre de 1974).Ley General de Salud. Diario Oficial La Gaceta N° 222.

³ Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. (s.f.). Contaminantes del aire y sus efectos. Recuperado el 26 de junio de 2019 de IDEAM: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/001083/Course2/Lecturas/Vehiculos/chapter2.pdf>

partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}) y plomo.

También están los contaminantes tóxicos que son aquellos que aún en concentraciones bajas presentan características de toxicidad que representan un peligro para la salud, como es el caso del benceno, tolueno y xileno, entre otros gases y partículas que contengan metales pesados.⁴

La calidad del aire es una medida de que tan limpio o contaminado está el aire de un lugar y para medirlo y reportarlo la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) utiliza el índice de calidad del aire, el cual además también reporta el riesgo que dicho nivel de contaminación significa para la salud.

Para ello, la EPA establece estándares de calidad del aire para los contaminantes criterio como punto de comparación para definir una puntuación que varía de 0 a 500 donde, entre mayor sea el valor obtenido, mayor es la contaminación y el riesgo a la salud.⁵

La calidad del aire puede verse afectada por distintos factores, uno de ellos son las emisiones que corresponden a gases y partículas contaminantes liberadas a la atmósfera y que pueden ser producidas por la actividad humana (antropogénicas), o por causas naturales como los incendios forestales no provocados, las erupciones volcánicas y el polvo arrastrado por el viento.⁶

Además, otros factores como las condiciones meteorológicas y la topografía también pueden afectar la calidad del aire.⁶

Los factores meteorológicos tienen un efecto importante sobre la calidad del aire, pues el transporte de contaminantes y su concentración en distintos sitios depende en gran medida del comportamiento de los distintos factores atmosféricos, por ejemplo, los vientos pueden arrastrar los contaminantes grandes distancias para luego depositarlos en sitios donde no hay fuentes de emisión,

⁴ Comisión federal para la protección contra riesgos sanitarios. (2017). Clasificación de los contaminantes del aire ambiente. Recuperado el 26 de junio de 2019 de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>

⁵ AirNow. (2016). Air Quality Index Basics. Recuperado el 26 de junio de 2019 de AirNow: <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>

⁶ Molina, F. (2016). Monitoreando la calidad del aire. Recuperado el 26 de junio de 2016 de NASA: <https://ciencia.nasa.gov/monitoreando-la-calidad-del-aire>

como ocurre con la fumigación vertical.⁷

Las corrientes de aire arrastran sustancias gaseosas contaminantes y partículas de un país a otro y de una región a otra, e inclusive de un continente a otro. De esta manera, las emisiones, tanto antropogénicas como naturales, generadas en un sitio del planeta pueden tener un efecto sobre otros territorios. Incluso, la dinámica atmosférica provoca que la calidad del aire en una zona varíe de una hora a otra y entre días, meses y años.⁸

Por otro lado, los factores topográficos también influyen en la calidad del aire, en tanto los accidentes geográficos como montañas y valles alteran los movimientos atmosféricos y por ende la dispersión de los contaminantes. Además, regiones con topografías planas como las costeras se ven más influenciadas por el efecto de arrastre de los vientos tierra adentro o viceversa.⁹

La calidad del aire juega un papel importante en diferentes ámbitos tales

como la salud, la economía y el medio ambiente.

En el ámbito económico, si la calidad del aire es mala, la salud de las personas irá en detrimento, lo que deriva en días laborales perdidos por incapacidades y en general un aumento en el presupuesto destinado a la salud, mientras que, si la calidad del aire es alta, permite el crecimiento económico y de empleos.¹⁰

En el ámbito ambiental, una mala calidad del aire está asociada a una mayor contaminación atmosférica. Al introducir agentes contaminantes en la atmósfera se altera la composición natural de la misma, lo que deriva en una serie de efectos ambientales negativos. El incremento en la concentración de dióxido de azufre, por ejemplo, propicia la formación de ácido sulfúrico en la atmósfera lo que ocasiona lluvias ácidas, También, altas emisiones de dióxido de carbono potencian el efecto invernadero responsable del calentamiento global.¹¹

⁷ García-Reynoso, J. (2009). Influencia de la meteorología en la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México. Revista especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 12(2), 83-86.

⁸Secretaría del Medio Ambiente (2017). Informe de Gobierno, Ciudad de México.

⁹ Centro Europeo de Posgrados. (2018). La dispersión de los contaminantes. Recuperado el 26 de junio de 2019 de CEUPE: <https://www.ceupe.com/blog/la-dispersion-de-los-contaminantes.html>.

¹⁰Secretaría del Medio Ambiente (2017). Informe de Gobierno, Ciudad de México.

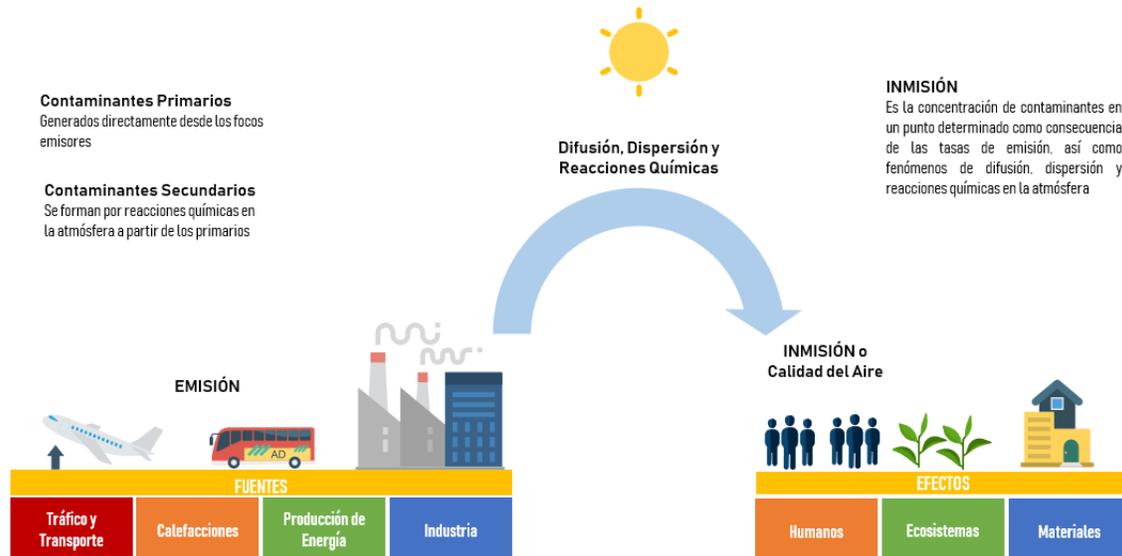
¹¹ Centro Europeo de Posgrados. (2018). ¿Cuáles son los efectos de la contaminación atmosférica? Recuperado el 26 de junio de 2019 de CEUPE: <https://www.ceupe.com/blog/cuales-son-los-efectos-de-la-contaminacion-atmosferica.html>.

En el ámbito de la salud, la contaminación atmosférica y la mala calidad del aire son las principales causas de muerte por enfermedades no transmisibles. La exposición a largo plazo puede ocasionar afectaciones importantes como cáncer de pulmón, accidentes cerebrovasculares, y cardiopatías, y la exposición a partículas suspendidas es la principal causa de infecciones agudas de las vías respiratorias principalmente en niños menores de 5 años, incrementando la mortalidad infantil.¹²

La Figura 1 brinda un resumen de la interacción entre las fuentes de emisión de contaminantes, y sus efectos sobre la calidad del aire y sus partes.

Contaminantes Atmosféricos

A continuación, se hace un resumen de los contaminantes criterio con sus características y afectaciones a la salud y al medio ambiente.



Fuente: Elaboración propia

¹² Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). Contaminación del aire ambiental. Recuperado el 29 de junio de 2019 de OPS:

https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es.

Figura 1. Fuentes de emisiones de contaminantes atmosféricos y su efecto sobre el ambiente.

Ozono Troposférico (O₃)

El ozono es un contaminante secundario, es decir, no emitido directamente a la atmósfera por una fuente, sino formado a partir de reacciones fotoquímicas (activadas por la luz solar) entre contaminantes primarios.

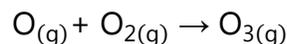
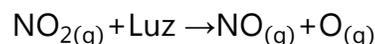
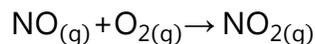
Consiste en una molécula formada por tres átomos de oxígeno (O₃) que a nivel troposférico ocasiona problemas de salud en las personas y daños al medio ambiente. Además constituye el principal compuesto del smog.¹³

Origen

Se produce debido a la reacción fotoquímica entre gases precursores, principalmente óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC's por sus siglas en inglés), así como monóxido de carbono (CO) en menor medida, los

cuales tienen su origen en las emisiones de gases de combustión de automóviles, centrales eléctricas, calderas, refinerías y otras fuentes.¹⁴

En presencia de luz solar, estos gases precursores reaccionan según se muestra en las siguientes ecuaciones para formar el ozono troposférico.¹⁴



Afectaciones a la Salud

Las personas con mayor riesgo de presentar problemas de salud por respirar ozono son los que padecen de enfermedades como asma, así mismo, los infantes cuyo sistema respiratorio aún está en desarrollo, personas de la tercera edad y personas que se encuentran activas al aire libre debido al mayor nivel de exposición.¹⁵

La exposición al ozono ocasiona la contracción muscular de las vías

¹³ EPA (2018). Ground-Level Ozone Basics. Recuperado el 27 de junio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>

¹⁴ Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f). Gases precursores de ozono troposférico. Recuperado el 27 de junio de 2019 de MITECO: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precursores_ozono.aspx)

[ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precursores_ozono.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precursores_ozono.aspx)

¹⁵ EPA (2018). Health effects of Ozone Pollution. Recuperado el 27 de junio de EPA: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>

respiratorias, lo que dificulta la respiración, causando molestias al respirar.¹⁵

Así mismo, puede ocasionar dolor de pecho, tos, irritación de la garganta, inflamación de vías respiratorias, y exposiciones prolongadas ocasionan la reducción de la función pulmonar y daño de tejido pulmonar, lo cual puede derivar en afectaciones crónicas como la enfermedad pulmonar obstructiva, asma o enfisemas.¹⁶

Afectaciones al ecosistema

El ozono también tiene un efecto negativo sobre el ambiente, particularmente para las plantas sensibles.

Cuando suficiente ozono entra en las hojas de la planta este afecta el ciclo de crecimiento de la misma, al reducir su tasa de fotosíntesis, e incrementar la propensión a enfermedades, daños por plagas, efectos de otros contaminantes y daños más severos por climas adversos.¹⁷

La afectación de las plantas por ende también genera un impacto en los ecosistemas, donde la pérdida de especies vegetales puede alterar la calidad de los hábitats e impactar a otras especies que dependen de estas.¹⁸

Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono se define como un gas incoloro e inodoro que resulta dañino si se inhalan grandes cantidades. En entornos abiertos (aire libre) se generan niveles más bajos de concentración. En entornos cerrados su afectación es más directa y puede causar síntomas detectables fácilmente.¹⁹

Origen

La principal fuente de emisión de monóxido de carbono se debe a la combustión incompleta de combustibles fósiles.²⁰

Por este motivo, las fuentes más importantes de CO en aire exterior son

¹⁶ European Environment Agency (2017). Air Quality in Europe – 2017 Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

¹⁷ EPA (2018). Ecosystem Effects of Ozone Pollution. Recuperado el 27 de junio de EPA: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ecosystem-effects-ozone-pollution>

¹⁸ EPA (2018). Ecosystem Effects of Ozone Pollution. Recuperado el 27 de junio de EPA: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ecosystem-effects-ozone-pollution>

¹⁹ EPA (2016). Basic information about carbon monoxide (CO) Outdoor Air Pollution. Recuperado el 27 de junio de EPA: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO>

²⁰ Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. (s.f.). Monóxido de Carbono. Recuperado el 28 de junio de 2019 de PRTR: <http://www.prtr-es.es/CO-Monoxido-de-carbono,15589,11,2007.html>

los automóviles y la maquinaria que quema productos derivados de petróleo.²¹

De igual manera la industria metalúrgica y la de fabricación de papel son de los sectores con mayores emisiones de CO.²⁰

Afectaciones a la Salud

El monóxido de carbono tiene una mayor afinidad que el oxígeno por la hemoglobina en la sangre, formando el compuesto carboxihemoglobina, el cual impide el transporte del oxígeno a las células.

La inhalación de CO en pequeñas concentraciones puede producir confusión mental, vértigo, dolor de cabeza, náuseas, debilidad y pérdida del conocimiento, mientras que exposiciones prolongadas pueden ocasionar problemas en el sistema nervioso central y cardiovascular e incluso causar la muerte por envenenamiento.²⁰

De igual manera las personas con condiciones cardio-respiratorias preexistentes y quienes realizan actividad física al aire libre tienen una mayor sensibilidad a este contaminante, ya que su demanda de oxígeno es mayor, pero el CO reduce su disponibilidad ocasionando falta de aliento y dificultad para respirar.²²

Afectaciones al ecosistema

En cuanto a los efectos que este contaminante tiene sobre los ecosistemas, es un gas que reacciona con el oxígeno, cloro, fluor y NO_x, pudiendo formar gases tóxicos que afectan el ambiente.²³

Así mismo posee una vida media en la atmósfera de 3 meses, lo que le permite oxidarse lentamente en presencia del oxígeno para formar dióxido de carbono que es un gas de efecto invernadero, además de también ser un gas precursor para la formación de ozono.²⁴

²¹ EPA (2016). Basic information about carbon monoxide (CO) Outdoor Air Pollution. Recuperado el 27 de junio de EPA: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO>

²² EPA (2016). Basic information about carbon monoxide (CO) Outdoor Air Pollution. Recuperado el 27 de junio de EPA: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO>

²³ Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. (s.f.). Monóxido de Carbono. Recuperado el 28 de junio de 2019 de PRTR: <http://www.prtr-es.es/CO-Monoxido-de-carbono,15589,11,2007.html>

²⁴ Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f.). Monóxido de carbono. Recuperado el 28 de junio de 2019 de MITECO: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/monoxido-carbono.aspx>

Plomo (Pb)

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre, el cual tiene diversos usos, entre ellos como aditivo en la gasolina, para la fabricación de baterías de plomo-ácido, en pinturas y pigmentos, en soldadura, joyería, cosméticos entre otros.²⁵

Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.²⁵

Origen

Las principales fuentes de plomo en el aire provienen mayoritariamente de la industria minera y metalúrgica, por el procesamiento del metal. Otras fuentes importantes son las quemas de residuos sólidos, los fabricantes de baterías que contienen plomo y el uso de combustibles con plomo.²⁶

Afectaciones a la Salud

Dependiendo del nivel de exposición, el plomo puede afectar gravemente el sistema nervioso, la función renal, el sistema inmunológico, el sistema reproductivo y el sistema cardiovascular.

La exposición al plomo también afecta la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, como sucede con el CO. Los efectos principales más comunes son los neurológicos en los niños y los cardiovasculares (presión alta y enfermedades cardíacas) en adultos. Los niños y bebés son sensibles a niveles muy bajos de plomo, y éste puede incidir en problemas de conducta, reducción del coeficiente intelectual y deficiencias en el aprendizaje²⁷.

De igual forma la exposición a este metal puede ocasionar anemia, inmunotoxicidad y toxicidad reproductiva donde las exposiciones a concentraciones relativamente bajas pueden ser peligrosas. La OMS señala que no existe una concentración de plomo en sangre que pueda considerarse segura y que incluso

²⁵ Organización Mundial de la Salud. (2018). Intoxicación por plomo y salud. Recuperado el 28 de junio de 2019 de OMS: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

²⁶ EPA (2017). Basic Information about Lead Air Pollution. Recuperado el 28 de junio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/lead-air-pollution/basic-information-about-lead-air-pollution>

²⁷ Jones, L., Claxton, R., Thistlethwaite, G., Hampshire, K., Karagianni, E., Kilroy, E., Misselbrook, T., Passant, N., Pearson, B., Richardson, J., Wakeling, D. & Walker, C. (2018). Air Pollutant Inventories for England, Scotland, Wales and Northern Ireland: 1990-2016. DEFRA, London, UK.

concentraciones de 5 $\mu\text{g}/\text{dl}$, catalogadas hasta hace poco como seguras, se asocian actualmene a los problemas cognitivos y de comportamiento antes mencionados en niños.²⁸

Afectaciones al ecosistema

El plomo puede llegar a acumularse en los ecosistemas a través de la deposición de partículas y sedimentos que contienen dicho metal y que se hallan suspendidas en el aire. Al depositarse en los suelos, puede ser arrastrado por la lluvia a las fuentes de agua subterráneas y es un contaminante persistente que afecta al ambiente. También puede introducirse por la descarga de aguas residuales que contanga plomo o por la extracción minera.

Este se arrastra así por todo el ecosistema, pudiendo alcanzar concentraciones elevadas que ocasionan la disminución del crecimiento de las plantas así como la reducción en las tasas reproductivas de estas y de los animales, además de

provocar efectos neurológicos en los vertebrados.²⁹

Material Particulado (PM)

Este contaminante es una mezcla de entidades sólidas y pequeñas gotas de líquidos que se mantienen suspendidos en el aire.

Algunas tales como el polvo, la suciedad, el hollín o el humo, son lo suficientemente grandes u oscuras para ser vistas a simple vista, mientras que otras son muy pequeñas, y únicamente visibles a través de un microscopio de barrido electrónico.

El material particulado puede clasificarse de acuerdo con el tamaño máximo de partícula que se considera como límite. De esta manera, se tiene el PM_{10} que representa todas aquellas partículas con diámetro aerodinámico igual o menor que 10 micrómetros (μm). Por su parte, el $\text{PM}_{2.5}$ representa todas aquellas con diámetro aerodinámico igual o menor que 2,5 μm .³⁰

²⁸ Organización Mundial de la Salud. (2018). Intoxicación por plomo y salud. Recuperado el 28 de junio de 2019 de OMS: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

²⁹ EPA (2017). Basic Information about Lead Air Pollution. Recuperado el 28 de junio de 2019 de EPA:

<https://www.epa.gov/lead-air-pollution/basic-information-about-lead-air-pollution>

³⁰ EPA (2018). Particulate Matter (PM) Basics. Recuperado el 28 de junio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>

El PM_{2.5} por ser menor al PM₁₀ está incluido en este último, es decir el PM_{2.5} es una fracción del PM₁₀.

Origen

El material particulado puede ser emitido a la atmósfera tanto por fuentes naturales, por ejemplo erupciones volcánicas y partículas arrastradas por el viento, como antropogénicas.³¹

Hay material que se emite directamente desde una fuente, como sitios de construcción, caminos sin pavimentar, campos de cultivo, chimeneas o incendios. La mayoría de las partículas (aerosoles) se forman en la atmósfera luego de reacciones químicas complejas con compuestos como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por las centrales eléctricas, industrias y automóviles³²

Afectaciones a la Salud

Algunas de las partículas suspendidas en el aire son tan pequeñas que pueden ser inhaladas y ocasionar problemas de salud. El PM₁₀ puede penetrar profundamente en los pulmones y otras más pequeñas como el PM_{2.5} pueden incluso penetrar en el

torrente sanguíneo, volviéndolas más peligrosas.³⁰

Numerosos estudios científicos han probado la relación entre la exposición a contaminación con PM con una variedad de problemas, tales como la muerte prematura de personas con enfermedades pulmonares o cardíacas, ataques cardíacos no mortales, arritmias cardíacas, asma, disminución de la función pulmonar, irritación de las vías respiratorias y tos.³³

Afectaciones al Ecosistema

En el aspecto ambiental, el PM_{2.5} en altas concentraciones puede provocar niebla en los cascos urbanos. Adicionalmente, el material particulado puede transportarse grandes distancias por el viento y luego depositarse ya sea en suelo o agua, y según su composición química, al depositarse puede aumentar la acidez de lagos y arroyos, cambiar el balance de nutrientes en aguas costeras y ríos, agotar los nutrientes del suelo, dañar ecosistemas y cultivos

³¹ Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. Universidad de Caldas

³² European Environment Agency (2017). Air Quality in Europe – 2017 Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

³³ EPA (2018). Health and environmental effects of particulate matter (PM). Recuperado el 28 de junio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

sensibles, afectar su diversidad y contribuir con la lluvia ácida.³⁴

Dioxido de Nitrógeno (NO₂)

Es un compuesto químico tóxico e irritante gaseoso, de color marrón amarillento que forma parte de un grupo sumamente reactivo encontrado en la atmósfera conocidos como óxidos de nitrógeno (NO_x) y el cual en presencia de agua reacciona para formar ácido nítrico y nitroso además de ser precursor para la formación de ozono troposférico y material particulado.^{35,36}

Origen

El dióxido de nitrógeno se emite principalmente por la quema de combustibles derivados del petróleo, siendo parte de las emisiones de los vehículos y de fuentes industriales.³⁵

De igual manera otras fuentes menores corresponden a las emisiones de la industria química como en los procesos intermediarios de producción de fertilizantes, en soldadura, explosivos utilizados en

minería e incluso en el humo de tabaco.³⁶

Afectaciones a la Salud

Respirar aire con altas concentraciones de NO₂ puede dañar el sistema respiratorio, comenzando por la irritación de las vías respiratorias. La exposición continua en periodos cortos pueden agravar las enfermedades respiratorias como el asma, ocasionando tos y dificultad para respirar, mientras que exposiciones prolongadas, pueden degenerar en el desarrollo de enfermedades como asma y susceptibilidad a sufrir infecciones respiratorias, donde los grupos más vulnerables son las personas de la tercera edad y los niños.³⁵

Afectaciones al Ecosistema

Al interactuar con el agua, oxígeno y otros compuestos en la atmósfera el dióxido de nitrógeno forma ácido nítrico y nitroso, el cual al llover es arrastrado ocasionando la lluvia ácida.³⁵

³⁴ EPA (2018). Health and environmental effects of particulate matter (PM). Recuperado el 28 de junio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

³⁵ EPA (2016). Basic Information about NO₂. Recuperado el 1 de julio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>

³⁶ Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2018). Dióxido de Nitrógeno. Recuperado el 1 de julio de 2019 de INSST: https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/MIGRAR%20VARIAS/MIGRAR%20LEP%20_VALORES%20LIMITE/Doc_Toxicologica/114%20en%20adelante/DLEP%20116%20%20Dióxido%20de%20nitrógeno%20%20Año%202018.pdf

Esta lluvia ácida puede ocasionar la disminución del pH de ríos y lagos, ocasionando la muerte de especies sensibles al pH, afectando a la fauna acuática y a las especies que dependen de esta. De igual manera, la lluvia ácida tiene la capacidad de arrastrar nutrientes del suelo que las plantas necesitan para su desarrollo inhibiéndolas de estos además de disolver el aluminio del suelo aumentando su concentración por encima de niveles aceptables para el adecuado desarrollo de las plantas, de manera que la vida vegetal también se ve afectada.³⁷

Otro producto de las reacciones del dióxido de nitrógeno con agentes atmosféricos son las partículas de nitratos, las cuales se mezclan con el aire y forman una niebla obstaculizando la visibilidad.³⁸

Dioxido de Azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro e irritante que forma parte del grupo de óxidos de azufre (SO_x) del cual es el más importante.³⁹

Es un gas estable, no inflamable más denso que el aire y soluble en agua, que en presencia de esta última reacciona para formar ácido sulfúrico así como sulfitos precursores de reacciones radicalarias en presencia de peróxidos.^{40,41}

Origen

Las principales fuentes de emisión de dióxido de azufre son antropogénicas, encabezando la lista la quema de combustibles fósiles en centrales eléctricas y plantas industriales, seguido de emisiones menores en los procesos industriales de extracción de metal, así como en por el uso de combustibles con alto contenido de azufre en barcos, trenes y automóviles. Finalmente, en menor medida hay emisiones naturales, como es el caso de los volcanes.³⁹

Afectaciones a la Salud

Entre las afectaciones a la salud ocasionadas por la exposición al dióxido de azufre se halla la irritación e inflamación del sistema respiratorio, insuficiencia pulmonar, alteración del

³⁷ EPA. (2017). Effects of acid rain. Recuperado el 1 de julio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>

³⁸ EPA (2016). Basic Information about NO₂. Recuperado el 1 de julio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>

³⁹ EPA. (2019). Sulfur dioxide basics. Recuperado el 1 de julio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>

⁴⁰ Lide D.R. (2003). CRC Handbook of Chemistry and Physics. 84ed. CRC Press: Florida.

⁴¹ Komarnisky, L.; Christopherson, R. & Basu, T. (2003). Sulfur: its clinical and toxicologic aspects. Nutrition, 19(1): 54-61.

metabolismo de las proteínas y dolor de cabeza.⁴²

Además este contaminante es precursor en la formación de material particulado con las respectivas afectaciones que el PM tiene a la salud.⁴³

Afectaciones al Ecosistema

El SO₂ tiene efectos negativos sobre las plantas, donde ocasiona daños graves a la vegetación ya que degrada la clorofila y reduce la fotosíntesis lo que conlleva a la pérdida de especies vegetales.⁴⁴

Así mismo el SO₂ reacciona con el agua de la atmósfera, formando ácido sulfúrico el cual produce lluvia ácida con los respectivos impactos que esta tiene sobre la biodiversidad, los suelos y los ecosistemas acuáticos y forestales.⁴⁵

También, al igual que con el dióxido de azufre, el material particulado que se forma producto de las reacciones del SO₂ con agentes atmosféricos producen nieblas que obstaculizan la visibilidad.⁴³

Situación de la calidad del aire a nivel Mundial

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) el aire limpio es un requisito básico para la salud y el bienestar humano y su contaminación representa una amenaza en todo el mundo, ocasionando muertes prematuras y enfermedades que afectan principalmente a la población de los países en desarrollo.⁴⁵

Un estudio reciente sobre la calidad del aire y la salud conducido por la OMS revela que para el 2016, el 91 % de la población mundial reside en lugares donde se incumplen las

⁴² Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f.). Dióxido de azufre. Recuperado el 1 de julio de 2019 de MITECO: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.aspx>

⁴³ EPA. (2019). Sulfur dioxide basics. Recuperado el 1 de julio de 2019 de EPA: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>

⁴⁴ Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f.). Dióxido de azufre. Recuperado el 1 de julio de 2019 de MITECO:

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.aspx>

⁴⁵ Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Actualización Mundial 2005. Ginebra, Suiza

directrices de la OMS sobre calidad del aire.⁴⁶

De igual manera la OMS publicó en un comunicado de prensa, que para el 2012 cerca de 7 millones de personas murieron en el mundo como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica, principalmente por que la exposición a los contaminantes viene a agravar condiciones cardio-respiratorias preexistentes o bien porque esta exposición crónica genera el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares, cardiopatías, isquemias e incluso cáncer. En este mismo documento se desglosan las principales causas de muerte debido a la contaminación atmosférica según el detalle descrito a continuación.⁴⁷

- Cardiopatía isquémica (40 %)
- Accidente cerebrovascular (40 %)
- Neumopatía obstructiva crónica (11 %)
- Cáncer de pulmón (6 %)

- Infección aguda de las vías respiratorias inferiores en los niños (3 %)

Una investigación enfocada en la estimación de la carga de morbilidad atribuible al medio ambiente muestra que entre las principales causas de muerte debido a factores medio ambientales se hallan enfermedades producto de la contaminación del aire, como se muestra en la Figura 2.⁴⁸

Debido al riesgo que representa la contaminación del aire en la salud, es que esta se ha incluido en la agenda de los objetivos de desarrollo sostenible, pues es una problemática global que afecta a todos los países. Hay varios contaminantes identificados que se relacionan con el incremento de enfermedades y muertes debido al deterioro de la calidad del aire, entre ellos los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂), sin embargo, uno de los agentes más estudiados y que se utiliza para realizar estimaciones de exposición a contaminantes son las partículas

⁴⁶ Organización Mundial de la Salud. (2018). Calidad del aire y salud. Recuperado el 5 de junio de 2019 de Organización Mundial de la Salud: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

⁴⁷ Organización Mundial de la Salud. (2014). 7 millones de muertes cada año debido a la contaminación atmosférica. Recuperado el 5 de junio de 2019 de Organización Mundial de la Salud:

<https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>

⁴⁸ Prüss-Ütün, A. & Corvalán, C. (2006). Ambientes saludables y prevención de enfermedades: hacia una estimación de la carga de morbilidad atribuible al medio ambiente. OMS. Ginebra, Suiza.

suspendidas (PM), principalmente aquellas con diámetro aerodinámico menor a $2,5 \mu\text{m}$.⁴⁹

Por este motivo, la OMS fija un límite para ambas partículas en su guía de calidad del aire según se muestra en el Cuadro 1.

⁴⁹ Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Ginebra, Suiza.

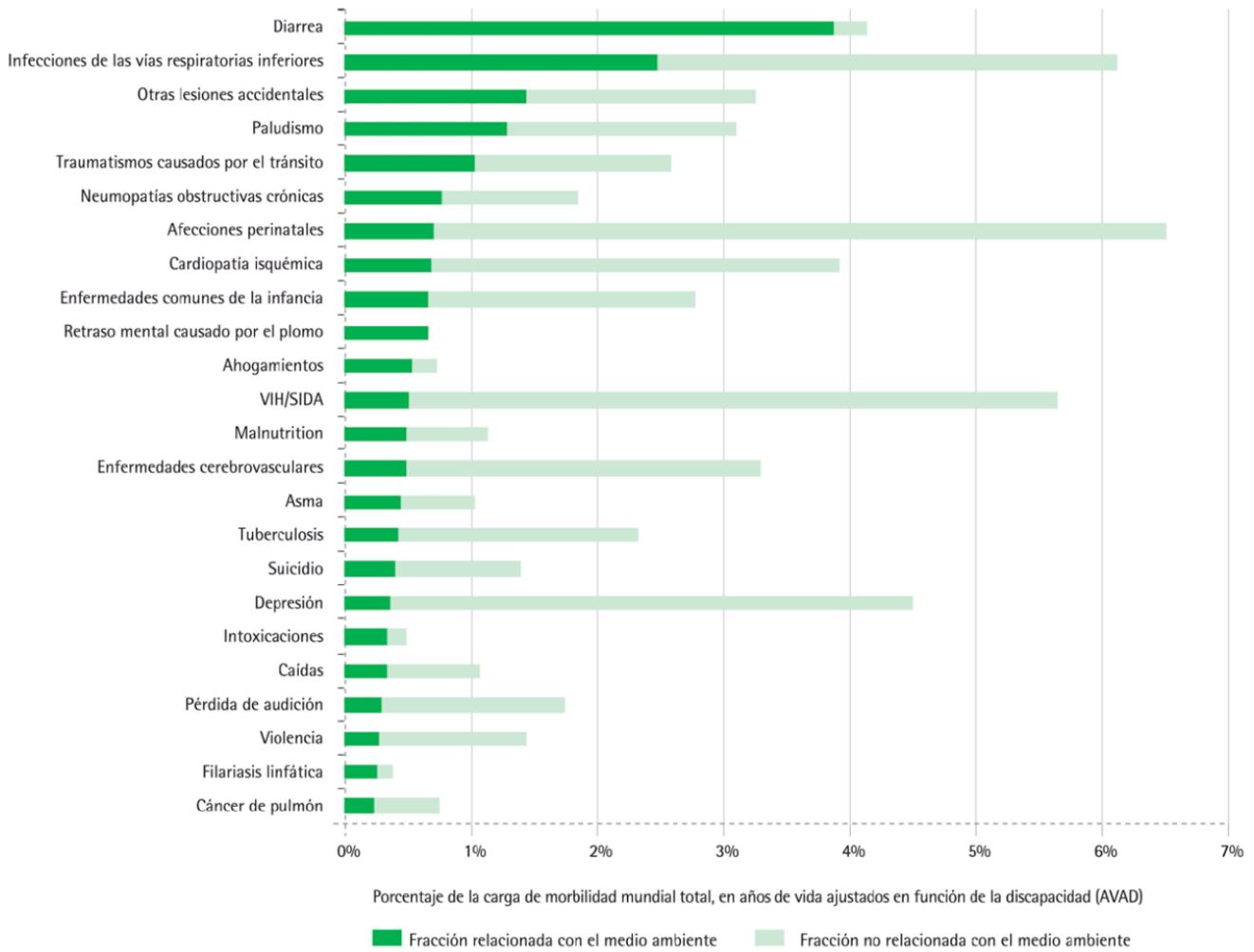


Figura 2. Enfermedades con la mayor contribución causal del medio ambiente.⁵⁰

Dado que el PM_{2.5} se asocia con los principales riesgos de salud, la OMS en su evaluación global del 2016 realiza un análisis sobre la concentración de estas partículas en más de 3 000

centros de población en todo el mundo. La Figura 3 resume de manera gráfica la distribución y rango de

⁵⁰ Prüss-Ütün, A. & Corvalán, C. (2006). Ambientes saludables y prevención de enfermedades: hacia una estimación de la carga de morbilidad atribuible al medio ambiente. OMS. Ginebra, Suiza.

concentración de PM_{2.5} para estos asentamientos.

Cuadro 1. Límite de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} según las guías de calidad del aire de la OMS y el Reglamento de Contaminantes Criterios de Costa Rica.^{51,52}

	PM_{2.5}	Costa Rica
Promedio anual	10 µg/m ³	15 µg/m ³
Promedio 24 horas	25 µg/m ³	35 µg/m ³
	PM₁₀	Costa Rica
Promedio anual	20 µg/m ³	30 µg/m ³
Promedio 24 horas	50 µg/m ³	100 µg/m ³

Puede observarse de la Figura 3 que las concentraciones más altas de PM_{2.5} se hallan en la región del sur este asiático y algunas ciudades del continente africano, donde las concentraciones promedio anuales oscilan entre los 40 µg/m³ y más de

100 µg/m³; y donde las densidades poblacionales suelen ser más elevadas, los ingresos suelen ser de medios a bajos o una combinación de ambos factores afecta los promedios obtenidos.⁵³

Por otro lado, en Europa, América y Australia se presentan concentraciones más bajas, entre 19 µg/m³ y menos de 10 µg/m³ con algunas excepciones puntuales, principalmente en América Latina, como es el caso de Ciudad de México. Esta distribución coincide también con el nivel de ingreso de los países, que para estos continentes es mayoritariamente alto en los sitios donde se concentran los promedios más bajos y que disminuye para los sitios donde los promedios van aumentando.⁵³

⁵¹ Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Actualización Mundial 2005. Ginebra, Suiza

⁵² Decreto Ejecutivo N° 39951. (noviembre de 2016). Reglamento de calidad del aire para contaminantes criterio. Diario Oficial La Gaceta N° 209.

⁵³ Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Ginebra, Suiza.

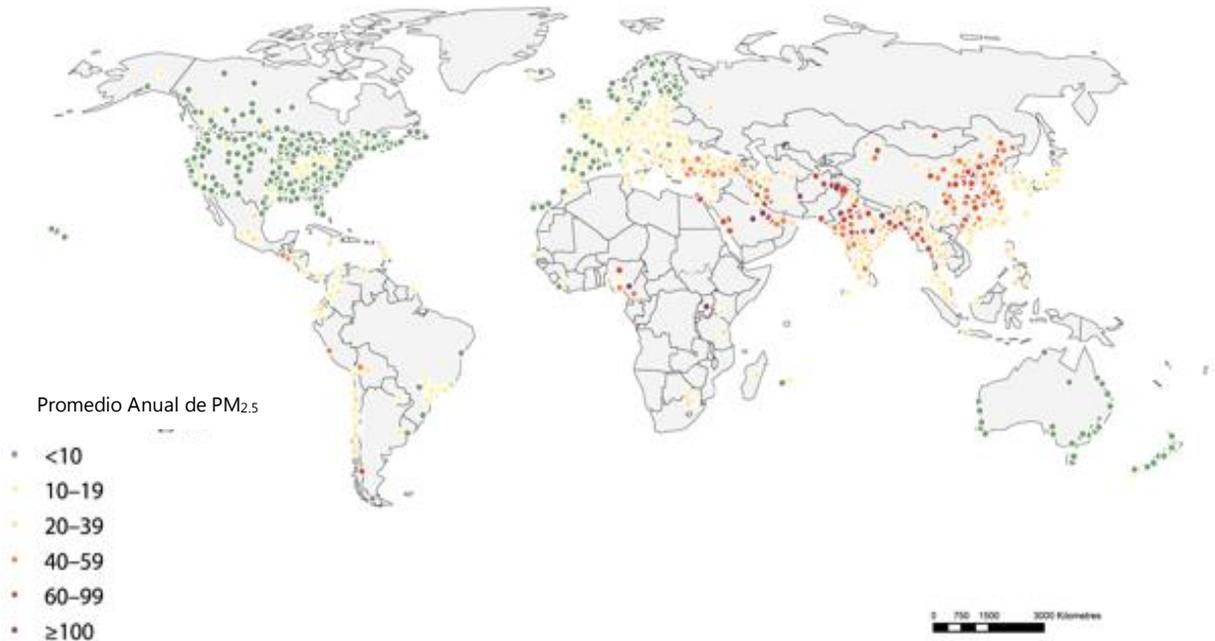


Figura 3. Localización de las estaciones de monitorio y concentración de PM_{2.5} en cerca de 3 000 asentamientos humanos entre 2008 y 2015.⁵⁴

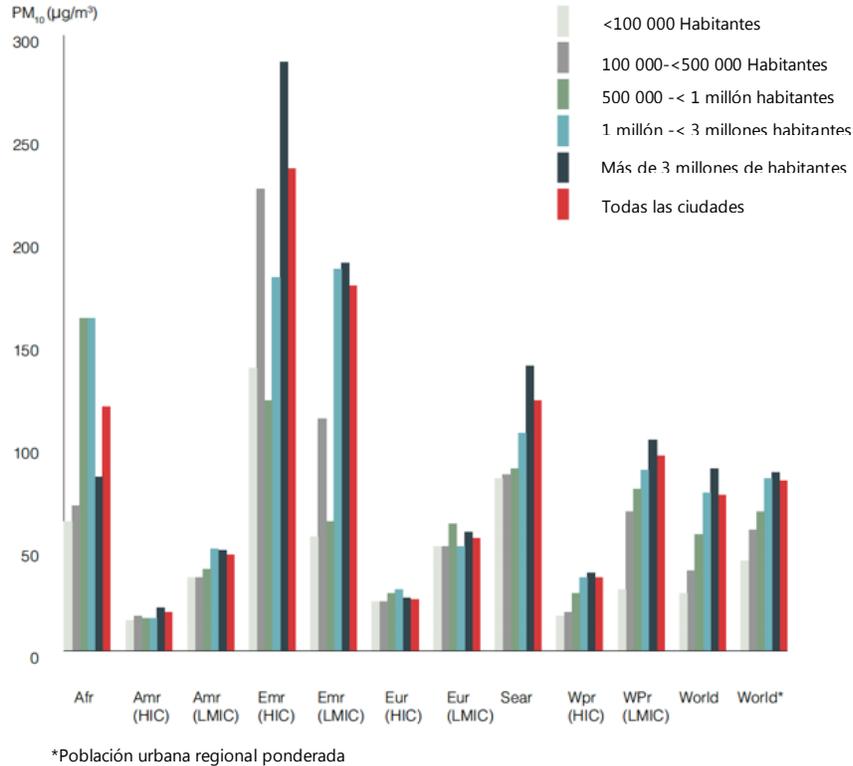
Así mismo, la Figura 4 muestra los niveles de PM₁₀ por regiones y cantidad de habitantes.

De esta se puede ver que la región del mediterráneo oriental presenta las concentraciones más altas, seguido de la región del sur este asiático, mientras que América y Europa presentan concentraciones menores a 50 µg/m³ para un promedio mundial cercano a los 100 µg/m³ en las regiones más pobladas.⁵⁴

Nuevamente la OMS señala que existe una relación importante entre los resultados obtenidos, el ingreso económico y la población cubierta en los centros urbanos. Así las regiones con ingresos altos tienden a presentar concentraciones bajas, pero si la población es grande, la concentración aumenta. Esto se refleja en el hecho de que, para la mayoría de las regiones, las concentraciones más altas se observan en los centros urbanos con más de 3 millones de habitantes donde es posible que exista una mayor

⁵⁴Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Ginebra, Suiza.

concentración de actividades productivas que generan emisiones.⁵⁴



Afr: África; Amr: América; Emr: Mediterráneo Oriental; Eur: Europa; Sear: Sur-este Asiático; Wpr: Pacífico Occidental; LMIC: países de mediano y bajo ingreso; HIC: países de alto ingreso.

Figura 4. Niveles de PM₁₀ por región y tamaño de la ciudad en el período de 2008-2015.⁵⁵

Adicionalmente la Figura 5 muestra el porcentaje de ciudades que superan o cumplen con los límites establecidos por la OMS para calidad del aire en material particulado.

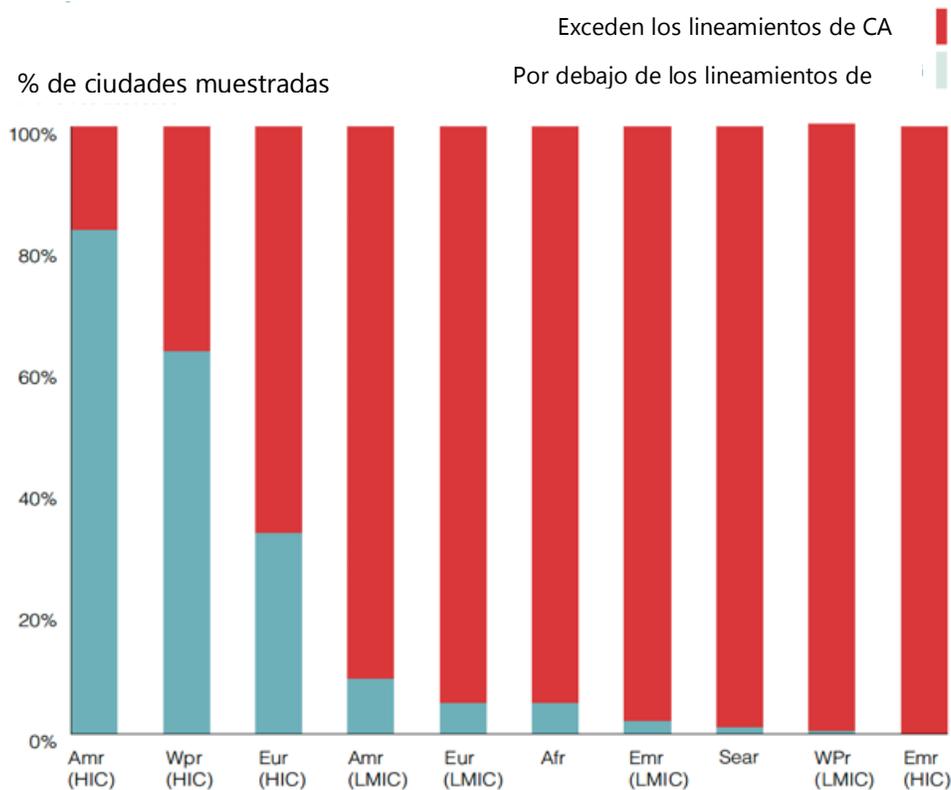
De los resultados que se dependen de esta parte del informe la OMS indica que solo 16% de las ciudades estudiadas cumple con los mínimos

⁵⁵Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Ginebra, Suiza.

establecidos por la OMS para calidad del aire.⁵⁵

Además, de la Figura 5 se observa que solo en las ciudades de alto ingreso de américa y el pacífico oeste más del

50% cumple con los límites de calidad del aire, mientras que las regiones de menor ingreso al contrario presentan altos porcentajes de incumplimiento.



Afr: África; Amr: América; Emr: Mediterráneo Oriental; Eur: Europa; Sear: Sur-este Asiático; Wpr: Pacífico Occidental; LMIC: países de mediano y bajo ingreso; HIC: países de alto ingreso.

Figura 5. Porcentaje de ciudades estudiadas por región cuyo promedio anual de material particulado cumple o incumple con los límites de calidad del aire establecidos por la OMS.⁵⁶

⁵⁶Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Ginebra, Suiza.

Otro dato importante que se desprende de este informe es que a nivel global se observa un incremento en la concentración promedio de PM_{2.5} de 8 % en el período de 2008-2013 y señala que existe una brecha entre las ciudades de alto ingreso y las ciudades de mediano y bajo ingreso (principalmente en países en desarrollo).⁵⁶

Reflejo de esto es que las primeras muestran un patrón de decrecimiento en los niveles de contaminantes del aire mientras que las segundas muestran más bien un incremento, ante lo que la principal recomendación de la OMS es invertir en redes de monitoreo confiables que le generen información de buena calidad a las ciudades como punto clave de partida para la generación de políticas que permitan regular y mitigar esta problemática.⁵⁷

Situación de la calidad del aire a nivel latinoamericano

En América Latina y el Caribe, el Clean Air Institute reporta para la región que por lo menos 100 millones de personas

están expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de los valores máximos recomendados por la OMS.⁵⁸

De igual manera el informe evidencia que de acuerdo con el Observatorio Mundial de Salud de la OMS, la mayoría de los países reportan un incremento en el número de muertes atribuibles a la contaminación del aire del 2004 al 2008. La Figura 6 muestra esta información para las principales ciudades de América Latina y el Caribe.⁵⁸

El Clean Air Institute resalta que la mala calidad del aire tiene un impacto negativo sobre el desarrollo social y económico, pues afecta la competitividad de los países y las afectaciones a la salud cobran un alto costo por gastos médicos y pérdida de la productividad, costo que según el Banco Mundial puede llegar a ser equivalente a 2% del PIB de los países.⁵⁸

Cabe destacar que en la región se han hecho grandes esfuerzos para abordar la problemática de la contaminación del aire en zonas urbanas como es el caso de Ciudad de México, donde la

⁵⁷Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Ginebra, Suiza.

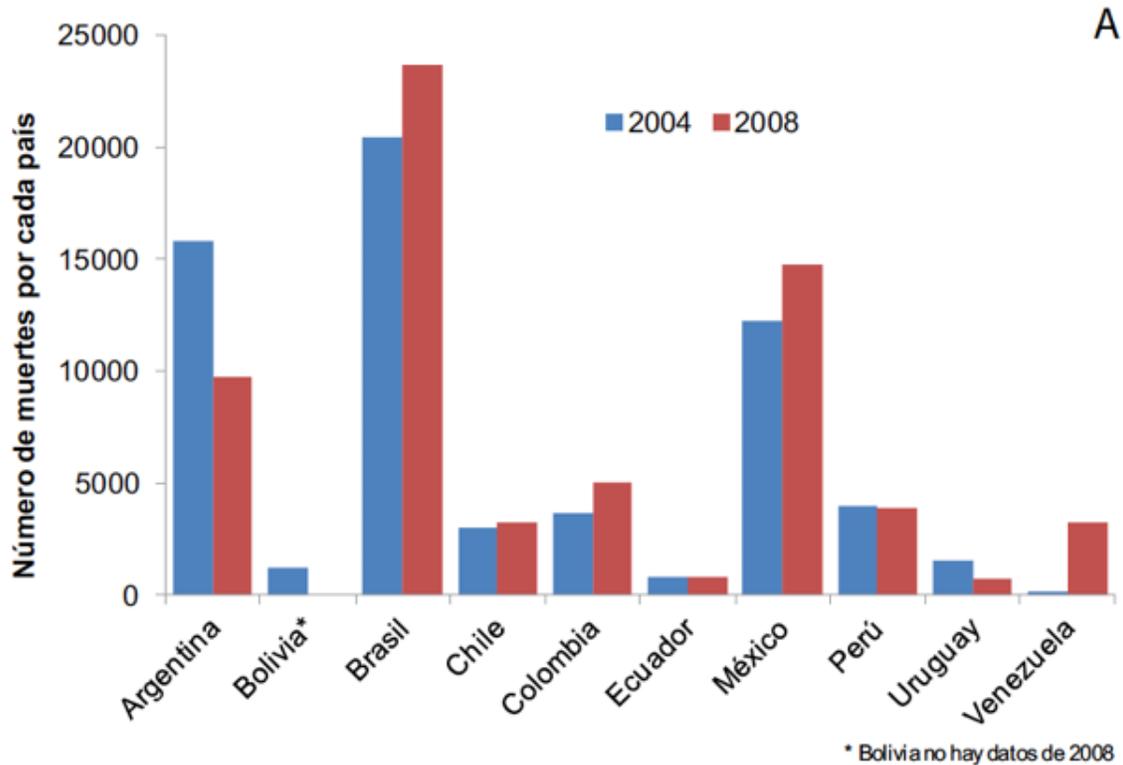
⁵⁸ Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

calidad del aire es un problema importante.⁵⁸

Ciudad de México ha implementado una serie de medidas como fortalecer la infraestructura para la medición de nuevos contaminantes mediante la adquisición de nuevos equipos, facilitar el diseño e implementación de sistemas de monitoreo para la calidad del aire, reforzar la capacidad de análisis generada en las redes y diseñar herramientas para la difusión de esta información. Igualmente ha

implementado o actualizado programas de contingencia ambiental atmosférica y ha promovido la elaboración de inventarios de emisiones de contaminantes junto con la implementación de programas de salud para evaluar el impacto de la calidad del aire sobre la población.⁵⁹

Sin embargo, pese a esfuerzos como el anteriormente ejemplificado, el problema sigue avanzando, tanto en los grandes centros urbanos como en ciudades emergentes de la región.⁶⁰



⁵⁹ Gobierno de México. (2016). Programa de mejoramiento de calidad del aire. Recuperado el 1 de julio de 2019 de Gobierno de México: [https://www.gob.mx/comisionambiental/acciones-y-](https://www.gob.mx/comisionambiental/acciones-y-programas/programa-de-mejoramiento-de-calidad-de-aire)

programas/programa-de-mejoramiento-de-calidad-de-aire

⁶⁰ Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

Figura 6. Número de muertes atribuibles a la contaminación del aire en las principales ciudades de América Latina.⁶⁰

El informe del Clean Air Institute señala que la quema de combustibles fósiles es la principal causa de contaminación del aire en América Latina y el Caribe, y de este rubro el sector de transporte es el que más aporte genera, junto con la generación de energía y los sectores industriales y domésticos. Así mismo destaca que la mala planificación urbana, los sistemas deficientes de

transporte y el inadecuado uso de los suelos solo agrava la situación.⁶¹

En cuanto a la emisión de material particulado, la Figura 7 muestra las concentraciones promedio anuales de PM₁₀ y PM_{2,5} para las principales ciudades de la región, mientras que la Figura 8 evidencia las tendencias para este mismo contaminante.⁶¹

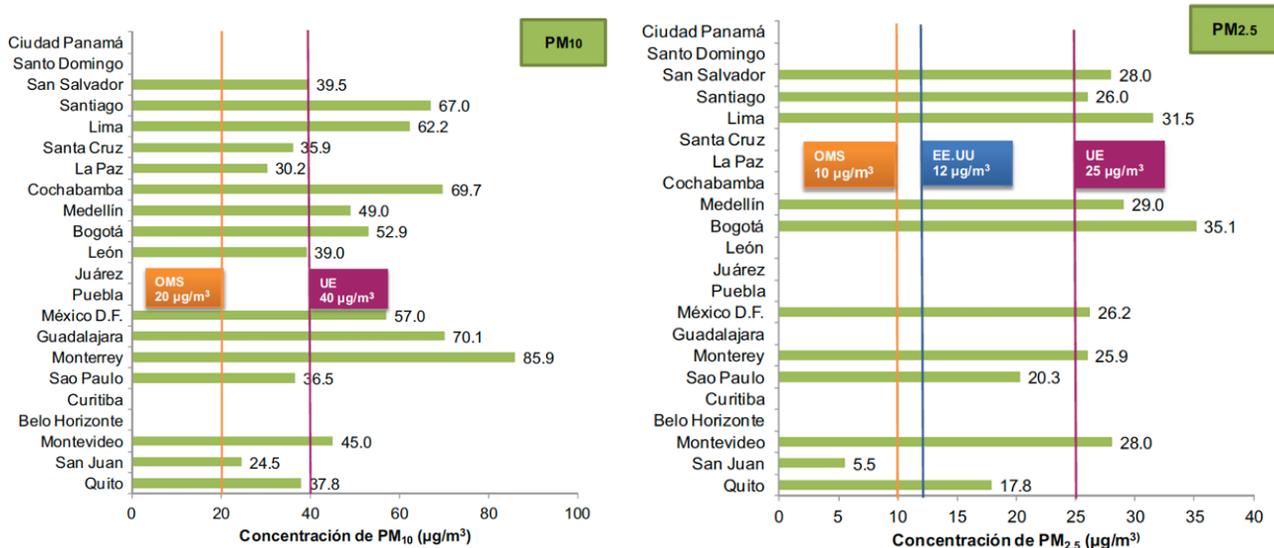


Figura 7. Concentración promedio anual de PM₁₀ y PM_{2,5} en el 2011 para las principales ciudades de América Latina.⁶¹

⁶¹ Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

De la Figura 7 se observan dos detalles importantes, en primera instancia no todas las ciudades cuentan con una adecuada red de monitoreo, razón por la cual no todas reportan y segundo, ninguna ciudad está por debajo del

límite de la OMS para PM_{10} y solo una está por debajo de límite de $PM_{2.5}$.

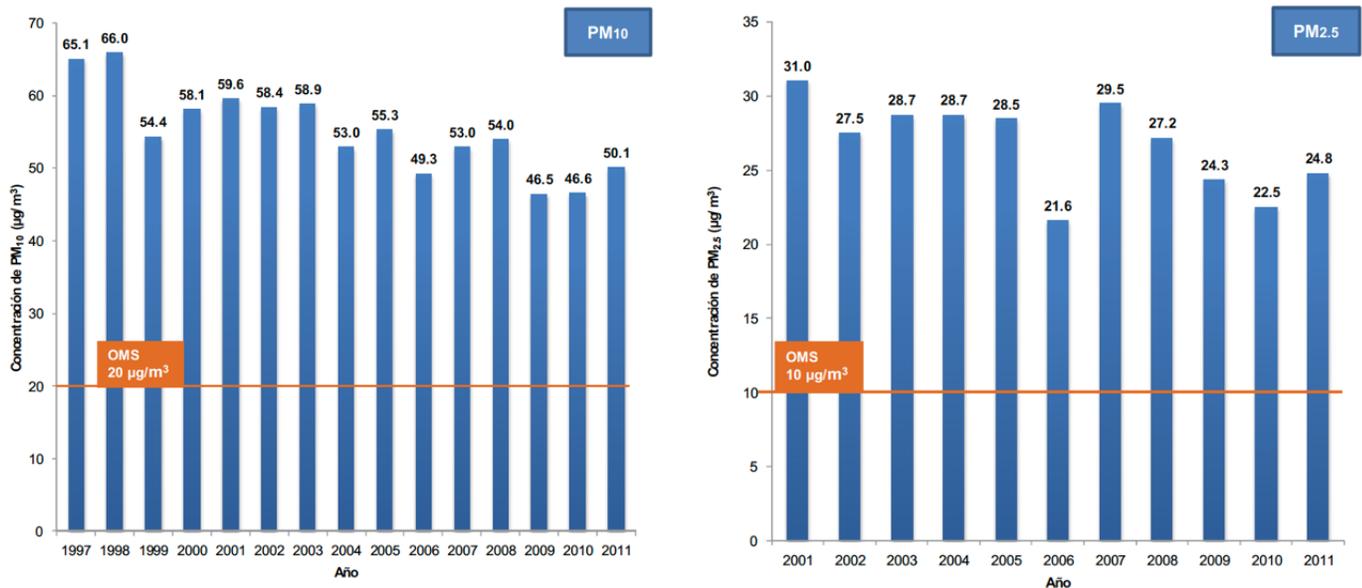


Figura 8. Tendencia en la concentración promedio anual de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la región latinoamericana.⁶²

Así mismo la Figura 8 muestra que para $PM_{2.5}$ las concentraciones no disminuyen consistentemente entre 2001 y 2011. Sí se observa un

decremento entre 2007 y 2010, pero luego se revierte en 2011.

En el caso del PM_{10} se observa una leve tendencia a un decrecimiento lento entre 1998 y 2011, sin embargo, en

⁶² Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

este último año al igual que con PM_{2.5} se observa un ligero incremento con respecto al año anterior.⁶²

Otro de los contaminantes que afecta es el ozono. Este, como se discutió anteriormente, se produce como resultado de las reacciones de otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono con los agentes atmosféricos y tiene

consecuencias más inmediatas por exposición a corto plazo en la salud, agravando padecimientos como asma y ocasionando irritaciones en las vías respiratorias y dificultad para respirar.⁶²

La Figura 9 muestra las concentraciones anuales de ozono para las principales ciudades de la región latinoamericana.

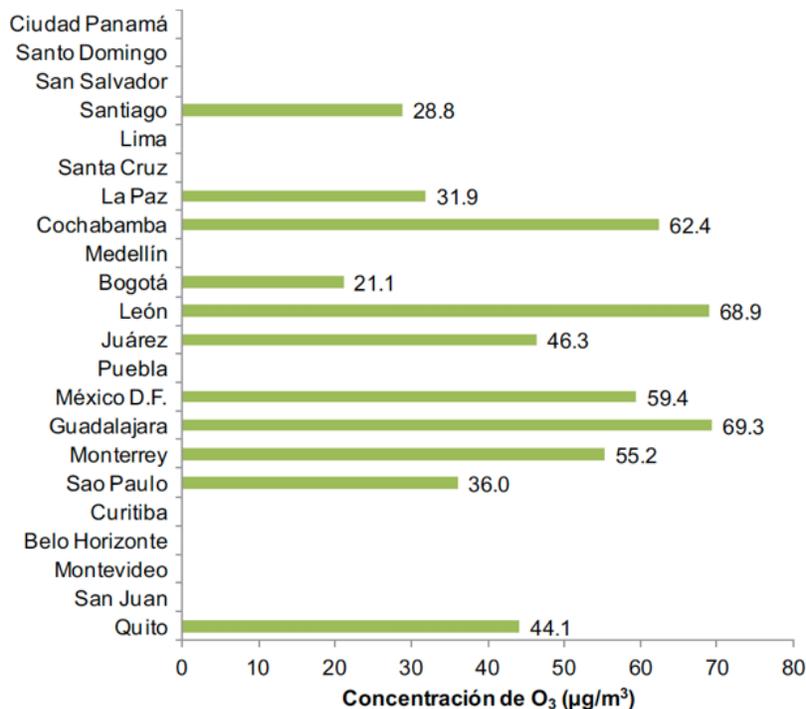


Figura 9. Concentración promedio anual de ozono en las principales ciudades de la región latinoamericana durante el 2011.⁶³

⁶³ Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

Aunque para el ozono no se establecen estándares anuales, puede observarse que su presencia afecta más a unas ciudades que a otras, lo cual puede estar sujeto a distintos factores tanto ambientales como antropogénicos relacionados con la formación del ozono.

Otro de los contaminantes que afecta la calidad del aire es el dióxido de nitrógeno. Para este, la Figura 10 muestra las concentraciones para la región y su tendencia a lo largo de los años.

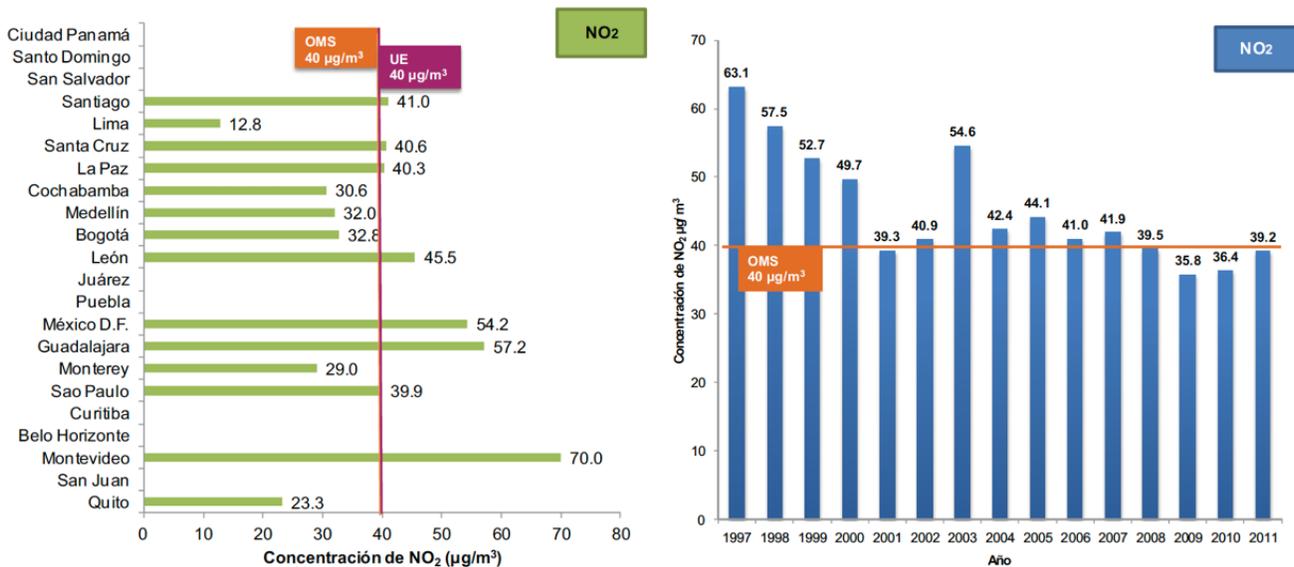
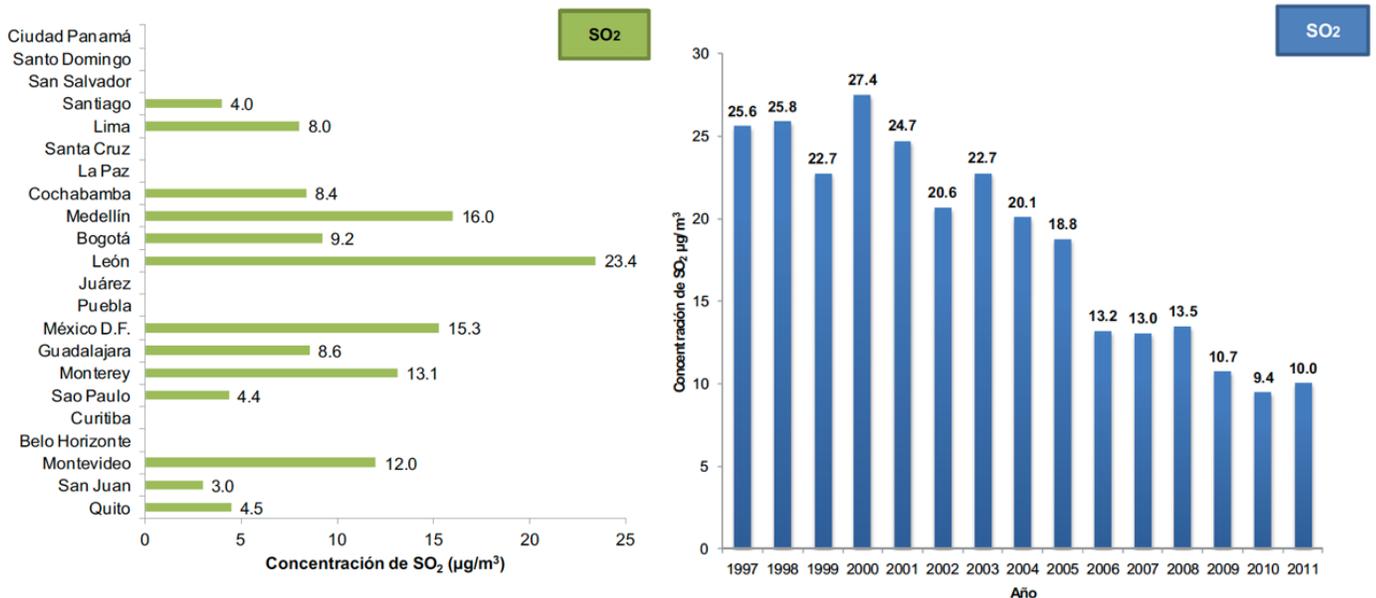


Figura 10. Concentración promedio anual de dióxido de nitrógeno en las principales ciudades de la región latinoamericana durante el 2011 y su tendencia entre los años de 1997 y 2011.⁶⁴

Para este contaminante el panorama es un poco más positivo, pues resulta evidente que la mayoría de las ciudades están por debajo del límite de la OMS o bien ligeramente por encima de dicho límite, aunque para algunas ciudades es un problema importante. Además, la tendencia que se aprecia es que la concentración promedio anual ha ido decreciendo con los años.

Finalmente se tiene que el dióxido de azufre; este al igual que el ozono no cuenta con estándares anuales de la OMS, sin embargo, la Figura 11 muestra la concentración promedio anual para la región y la tendencia de dichas concentraciones durante los años.



⁶⁴ Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

Figura 11. Concentración promedio anual de dióxido de azufre en las principales ciudades de la región latinoamericana durante el 2011 y tendencia entre los años de 1997 y 2011.⁶⁵

Al igual que ocurre con el dióxido de nitrógeno, las concentraciones observadas para el dióxido de azufre son relativamente bajas, aunque constituyen una problemática para algunas ciudades y su tendencia muestra un marcado decrecimiento a lo largo de los últimos años.

Situación de la calidad del aire en Costa Rica

Al igual que para América Latina y para el resto del mundo, la calidad del aire es una problemática que afecta a Costa Rica, motivo por el cual desde el 2004 se ha venido monitoreando la concentración de contaminantes atmosféricos responsables del detrimento de la calidad del aire en la zona del Gran Área Metropolitana que concentra la mayor parte de la población, y los resultados de este monitoreo se han dado a conocer mediante una serie de informes de

calidad del aire de los cuales el presente forma parte.

Así mismo se han generado políticas para regular la calidad del aire en el país, como el reglamento de calidad del aire para contaminantes criterio No. 39951-S. Este reglamento entre otras cosas regula las concentraciones máximas admisibles para cada uno de los contaminantes criterio que afectan la calidad del aire tal como se muestra en el Cuadro 2.⁶⁶

Cuadro 2. Concentraciones máximas permitidas para contaminantes criterio.⁶⁶

Contaminante	Valor de referencia	Tiempo promedio
PM _{2.5}	15 µg/m ³	Anual
	35 µg/m ³	24 horas
PM ₁₀	30 µg/m ³	Anual
	100 µg/m ³	24 horas
Ozono	0,075 ppm	8 horas
	0,100 ppm	1 hora

⁶⁵ Green, J. & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., Estados Unidos.

⁶⁶ Decreto Ejecutivo N° 39951-S. (noviembre de 2016). Reglamento de calidad del aire para contaminantes criterio. Diario Oficial La Gaceta N° 209.

Plomo		0,070	24 horas
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Monóxido de carbono	de	9 ppm	8 horas
		35 ppm	1 hora
Dióxido de nitrógeno	de	53 ppb	Anual
		100 ppb	1 hora
Dióxido de azufre	de	500 ppb	3 horas
		75 ppb	1 hora

Cabe señalar que, aunque el país cuenta con un marco regulatorio nacional para las concentraciones máximas de estos contaminantes, los valores máximos aceptados son mayores a los máximos recomendados por la OMS.

Por otro lado, el último informe de calidad del aire 2016 muestra que entre el período del 2010 al 2016 las concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se mantienen con pocas variaciones a lo largo del año, situación que se atribuye a la mejora de la calidad de los combustibles que se expenden en el país, los cuales tienen menos azufre

que funge como catalizador en la formación de partículas.⁶⁷

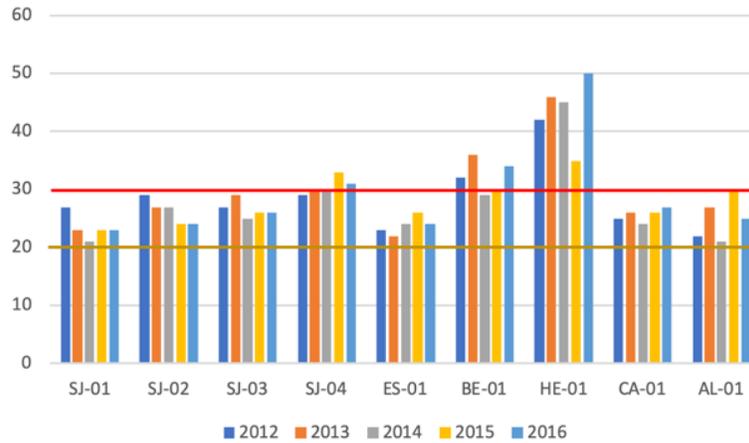
La Figura 12 muestra la variación de la concentración de PM_{10} entre el 2012 y el 2016 para los principales sitios de la red de monitoreo.

Como se menciona anteriormente las variaciones entre años no son grandes y para la mayoría de los sitios se cumple con el límite establecido en el reglamento, aunque en ninguno de los sitios se cumple con el límite de la OMS.

Además de estos Heredia es la ubicación con niveles de PM_{10} más altos correspondiente a una zona comercial con alto tráfico vehicular donde además se ve una tendencia al aumento.

La Figura 13 por otro lado muestra la variación de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en el plantel municipal de San José entre el 2013 y el 2016.

⁶⁷ Universidad Nacional. (2017). Informe de calidad del aire: área metropolitana de Costa Rica, Año 2016. Heredia, Costa Rica.



Nota: SJ-01: Catedral Metropolitana, SJ-02: Sección Parque Municipalidad SJ, SJ-03: Hatillo, SJ-04: La Uruca, ES-01: Municipalidad de Escazú, BE-01: Belén, HE-01: Rectoría UNA, CA-01: Estación del tren Cartago, AL-01: UTN Alajuela.

Figura 12. Variación de la concentración de PM_{10} entre el 2012 y el 2016 para los puntos de la red de monitoreo de la GAM.⁶⁸

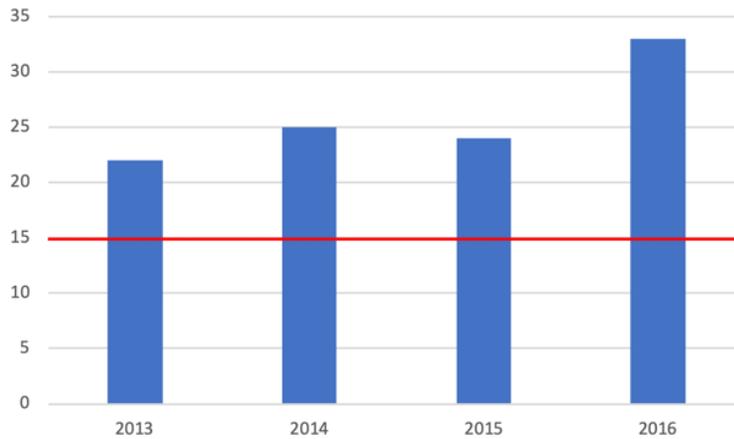


Figura 13. Variación de la concentración de $PM_{2.5}$ entre el 2013 y el 2016 para el punto ubicado en el plantel municipal de San José.⁶⁸

De esta figura puede verse que con excepción del 2016 la variación de $PM_{2.5}$ no suele ser muy amplia al

menos para este punto que se ubica en una zona comercial. Sin embargo, puede observarse que todos los años

⁶⁸ Universidad Nacional. (2017). Informe de calidad del aire: área metropolitana de Costa Rica, Año 2016. Heredia, Costa Rica

se incumple el límite establecido para el reglamento.

En cuanto a la concentración de dióxido de nitrógeno, el informe de calidad del aire del 2016 reporta que en al menos 13 sitios de San José y 5 de Belén la concentración estuvo por encima del límite de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la OMS. Además la mayoría de los sitios que exceden el límite corresponden a zonas comerciales cercanas a sitios de alto flujo vehicular, lo cual según señalan es esperable ya que estas emisiones se asocian a la quema de combustibles en fuentes móviles mas que en fuentes fijas.⁶⁹

Polvos del Sahara

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 2×10^8 toneladas anuales de aerosoles, las cuales son transportadas hacia el Océano Atlántico, el Mar Mediterráneo y el Sur de Europa.⁷⁰

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.

De acuerdo con Poleo & Briceño, estos polvos contienen bacterias, hongos y virus, así como algunos nutrientes, entre ellos nitratos y fosfatos inorgánicos que los convierten en importantes fertilizantes de los bosques tropicales de América.⁷¹

Asimismo, este fenómeno además contribuye como una de las principales fuentes biogénicas de partículas suspendidas con diámetros menores a $10 \mu\text{m}$ y $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$) siendo además la principal fuente de polvo atmosférico.⁷¹

⁶⁹ Universidad Nacional. (2017). Informe de calidad del aire: área metropolitana de Costa Rica, Año 2016. Heredia, Costa Rica

⁷⁰ Kabatas, B.; Unal, A.; Pierce, R.; Kindap, T. & Pozzoli, L. (2014). The Contribution of Sahara dust in PM_{10} concentration levels in Anatolian Peninsula of Turkey. Science of the Total Environment, 488-489, 413-412.

⁷¹ Poleo, D., & Briceño, J. (2014). La intrusión de polvo del Sahara y del Sahel en la capa límite atmosférica del Mar

Caribe: episodio agosto 2013. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 68-89.

Otro aspecto relevante relacionado con los polvos del Sahara es la afectación que pueden tener en la salud. Aunque existe poca investigación sobre esto, la Organización Mundial de la Salud ha establecido que la contaminación con partículas, entre ellas el polvo, tiene efectos nocivos para la salud incluso a concentraciones bajas.⁷²

Según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en su boletín mensual de abril del 2017 indica que del 5 al 8 del abril del 2017 se presentó una incursión en el país de polvos del Sahara que afectó la actividad lluviosa al disminuir las precipitaciones y generó una bruma que afectó la visibilidad en el Valle Central.⁷³

De igual manera el IMN reportó que el 4 de junio del 2018 se presentaron afectaciones por polvo del Sahara en toda la región centroamericana, especialmente en el Caribe centroamericano provocando una importante disminución en las precipitaciones en el país⁷⁴.

La Figura 14 muestra una imagen satelital tomada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) donde se aprecia la nube de polvo sahariano sobre el Océano Atlántico.

Por último, el IMN reporta una última incursión de polvo del Sahara en el país los días 23 y 24 de julio del 2018.⁷⁵

⁷² Poleo, D., & Briceño, J. (2014). La intrusión de polvo del Sahara y del Sahel en la capa límite atmosférica del Mar Caribe: episodio agosto 2013. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 68-89.

⁷³ Chinchilla, G. (2017). *Boletín Meteorológico Mensual*. San José: IMN.

⁷⁴ Poleo, D. (2018). *Boletín Meteorológico Mensual*. San José: IMN.

⁷⁵ Chinchilla, G. (2018). *Boletín Meteorológico Mensual*. San José: IMN.

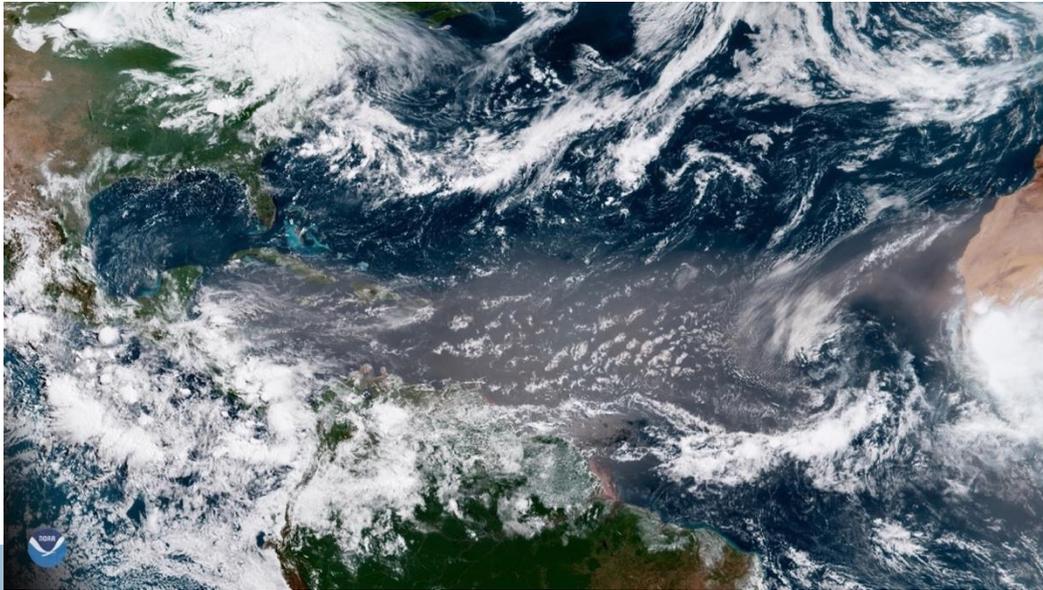


Figura 14. Polvos del Sahara sobre el Océano Atlántico y el Caribe centroamericano en junio del 2018⁷⁶.



⁷⁶ National Oceanic and Atmospheric Administration. (29 de Junio de 2018). Satellite and Information Service. Recuperado el Mayo de 2019, de Saharan dust blows across the Atlantic: <https://www.nesdis.noaa.gov/content/saharan-dust-blows-across-atlantic>

2. Metodología

Red Manual
Red Automática
Red Pasiva

Metodología

La labor de monitoreo continuo de la calidad de aire se ejecuta mediante distintos métodos, entre los cuales están el muestreo manual de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, el uso de estaciones automáticas que ejecutan mediciones de la calidad del aire de manera programada, y la utilización de muestreo mediante difusión pasiva para dióxido de nitrógeno. El Cuadro 3 indica los sitios de las redes manual y automática de monitoreo del Área Metropolitana.

Cuadro 3. Sitios de muestreo manual y automático de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Costa Rica.

Localización	Sitio de muestreo	Localización	Sitio de muestreo
		PM₁₀	PM_{2.5}
Catedral Metropolitana	SJ-01	Plantel Municipalidad de San José	SJ-05
Sección Parques, Municipalidad de San José	SJ-02	Ministerio de Salud, San José	SJ-06
Centro de Reciclaje MSJ, Hatillo ¹	SJ-03		
CNFL, La Uruca	SJ-04	PM₁₀ y PM_{2.5}	
Sede UTN, Alajuela	AL-01	UNA, Heredia	HE-01
La Ribera, Belén	BE-01	Colegio EMVA, Coronado ¹	CO-01
Estación del Ferrocarril, Cartago	CA-01		
Municipalidad de Escazú	ES-01		

¹ Incluye estación automática

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, el Cuadro 4 muestra los sitios de muestreo de la red pasiva de San José y Belén.

Cuadro 4. Sitios de muestreo de la red pasiva de San José y Belén.

San José			
Localización	Sitio de muestreo	Localización	Sitio de muestreo

Costado norte del Hospital San Juan de Dios	SJN-01	Costado norte de la Catedral Metropolitana	SJN-02
50 m este de la bomba La Castellana	SJN-03	150 m norte de la estación del Ferrocarril al Pacífico	SJN-04
Barrio La Cruz, Av. 26 entre calles 13 y 15	SJN-05	75 m este del AyA , Av. 10	SJN-06
50 m sur y 100 m este del MINAE, Barrio Francisco Peralta	SJN-07	Costado este de la iglesia de Santa Teresita	SJN-08
Costado sur, Tribunal Supremo de Elecciones	SJN-09	Frente edificio de JAPDEVA, Av. 9	SJN-10
50 m oeste de la iglesia de Barrio México	SJN-11	200 m sur del parque El Salvador, Barrio Pithaya	SJN-12
Costado norte de la nunciatura, Rohmoser	SJN-13	Costado sureste de Plaza Santa Fe, Pavas	SJN-14
Carnes San Antonio, 100 m norte, Lomas de Bibri, Pavas	SJN-15	Frente a autos JAC, Uruca	SJN-16
Frente a escuela La Peregrina, Uruca	SJN-17	Frente a iglesia del Perpetuo Socorro, Mata Redonda	SJN-18
Frente a escuela Jorge Debravo, Hatillo 8	SJN-19	Frente al Centro de Reciclaje, Hatillo 3	SJN-20
Costado este de la NUMAR, Calle 24, Barrio Cuba	SJN-21	200 m sur de antigua Dos Pinos, Barrio Luján	SJN-22

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4 (Continuación). Sitios de muestreo de la red pasiva de San José y Belén.

San José			
Localización	Sitio de muestreo	Localización	Sitio de muestreo
Autos M. Gamboa 100 m sur, Barrio Córdoba	SJN-23	Frente a Gollo Zapote	SJN-24
Frente a abastecedor Los Sauces, San Francisco de Dos Ríos	SJN-25	Frente a Faro del Caribe, San Francisco de Dos Ríos	SJN-26
50 m este de la iglesia católica, Paso Ancho	SJN-27	Walmart 75 m sur, San Sebastián	SJN-28
Belén			
Frente a Centro Comercial Plaza Belén	BEN-01	Centro Pedagógico Belén, frente al Hotel Marriot	BEN-02
Costado norte de la Municipalidad de Belén	BEN-03	Costado norte de la Firestone	BEN-04
Parque Recreativo Ojo de Agua	BEN-05	Antiguo Hotel Herradura	BEN-06
Frente a iglesia católica de La Ribera	BEN-07	Frente al Colegio Técnico Profesional Privado CIT	BEN-08
50 m este de la plaza La Asunción	BEN-09	Polideportivo Belén	BEN-10
Residencial Cariari Rotonda	BEN-11		

Fuente: Elaboración propia

Así mismo el Cuadro 5 resume las frecuencias con la que se ejecutan los muestreos para cada una de las técnicas durante el año 2018.

Cuadro 5. Frecuencias de muestreo para la red manual y pasiva durante el año 2018.

Muestreo	Frecuencia de muestreo
Red Manual de Monitoreo	3 veces a la semana
Red Pasiva	Cada 21 días

Fuente: Elaboración propia

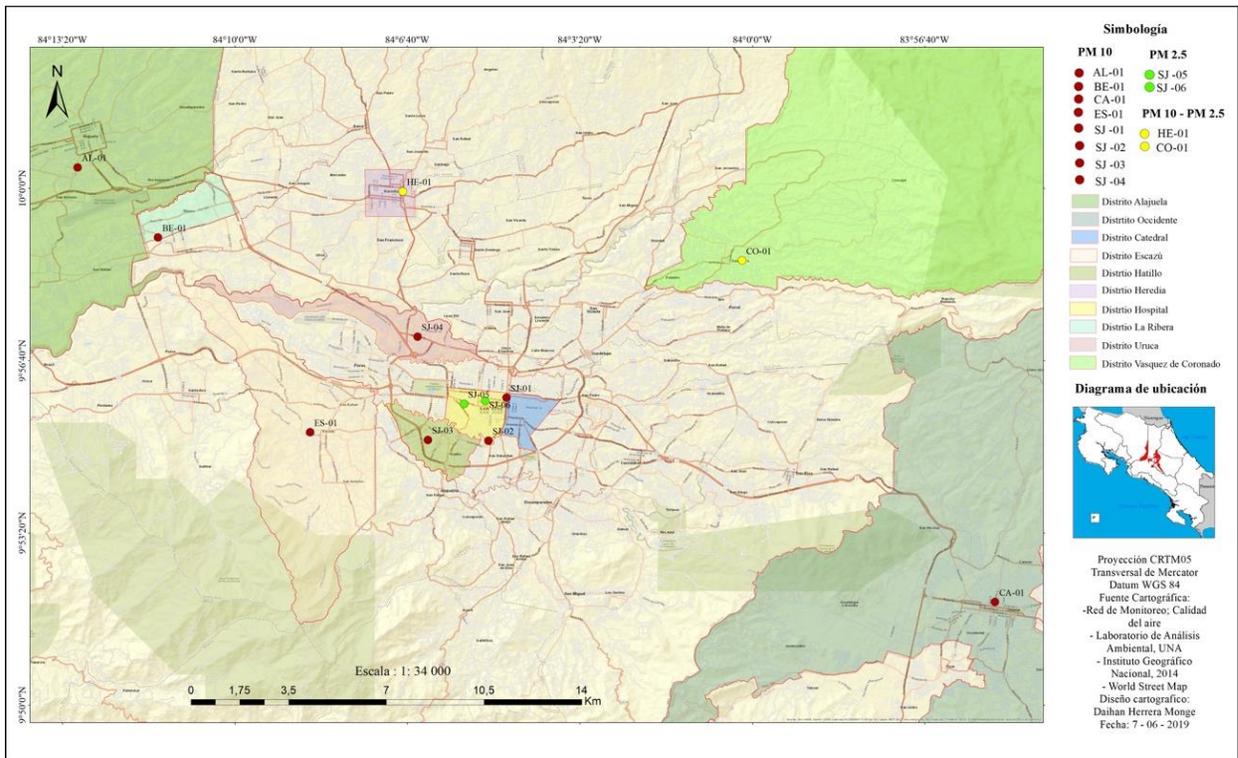
Red Manual

Actualmente la red manual de monitoreo cuenta con nueve sitios, ubicados en las provincias de Cartago (1), San José (5), Heredia (2) y Alajuela (1). La distribución espacial de los equipos, así como el distrito donde están localizados, se muestra en la Figura 15 y se detalla en el Cuadro 3.

El equipo utilizado para este propósito es un muestreador de aire de alto volumen. Este dispositivo cuenta con un motor que ejecuta una succión de aire ambiente a través de la parte superior, el aire atraviesa las boquillas y los tubos de ventilación donde se hace una separación de partículas gruesas. Luego se continúa acarreando a través de la cámara de impactación, únicamente las partículas PM_{10} o $PM_{2.5}$ (en este caso el cabezal funciona bajo el mismo principio solo que los tamaños de las boquillas y tubos de ventilación son diferentes de manera que se asegure la separación de todo lo que tenga un diámetro mayor a $2.5 \mu m$).

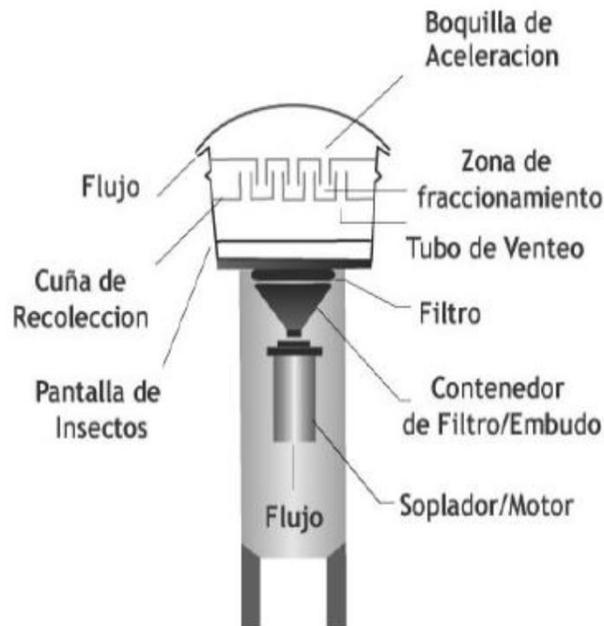
Pasada la cámara de impactación, el aire atraviesa transversalmente el filtro, y todas las partículas que vienen arrastradas por él son retenidas en este medio. Finalmente, el aire sale por la parte inferior del motor, y se mezcla nuevamente con el aire ambiente.

La Figura 16 muestra un esquema del muestreador de alto volumen donde se señalan sus partes principales detalladas anteriormente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Distribución Espacial de la Red Manual y Automática de Monitoreo



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Esquema de un medidor de alto volumen

El proceso para medir material particulado comienza con la preparación de los filtros que serán colocados en campo. Estos pasan por una etapa de acondicionamiento en una desecadora por 24 h, para reducir la cantidad de humedad que contienen, y transcurrido este tiempo se pesan en balanza analítica. Luego los filtros son transportados a campo garantizando que no se contaminen previamente a colocarse en el muestreador de alto volumen, para lo que se colocan en sobres de manila. Cada filtro se coloca en el equipo utilizando guantes y pinzas, de modo que se manipule lo menos posible. El equipo se enciende y se permite el flujo de aire de $(1,13 \pm 10 \%) \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ durante $(24 \pm 1) \text{ h}$.

Transcurrido el tiempo de muestreo, se recolectan los filtros siguiendo nuevamente todas las recomendaciones en cuanto a su manipulación. Una vez en el Laboratorio, se vuelven a colocar en una desecadora por 24 h y se pesan en balanza analítica, de modo que por diferencia se conozca la masa colectada en cada uno, y con el volumen de muestreo se conozca la concentración de partículas de ese día para cada sitio. Posteriormente se almacenan los filtros para la ejecución de los análisis de aniones y metales presentes.

Los aniones que se analizan de los filtros colectados son fluoruro (F^-), cloruro (Cl^-), nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}). Para su determinación, se corta una porción del filtro de $44,45 \text{ cm}^2$ y se coloca en un tubo de vidrio con tapa de rosca. Luego, se prepara una disolución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) $0,0045 \text{ mol/L}$ y carbonato ácido de sodio (NaHCO_3) $0,0014 \text{ mol/L}$ que se utiliza como disolución de extracción. Cada tubo se llena con un volumen de 10 mL de la disolución, utilizando una pipeta de manera que el trozo de filtro quede completamente sumergido. Después el tubo se coloca en un baño ultrasónico por 15 minutos.

Posteriormente se pasa la disolución a través de un filtro de 0,47 mm de diámetro de poro, que permita eliminar partículas gruesas que puedan saturar la columna del cromatógrafo de iones, y se coloca la muestra filtrada en un vial para su lectura.

El equipo utilizado para esta medición corresponde a un cromatógrafo de iones Dionex ICS3000 con columna y precolumna Dionex IonPac AS22, el cual opera con las condiciones indicadas en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Condiciones de operación del cromatógrafo de iones Dionex ICS3000.

Variable de operación	Condición de operación
Temperatura de la columna	30 °C
Temperatura de la celda de conductividad	30 °C
Supresión del equipo	26 mA
Flujo de trabajo	1 mL/min
Eluente	Disolución de Na ₂ CO ₃ (0,0045 mol/L) y NaHCO ₃ (0,0014 mol/L)

Fuente: Elaboración propia

Nótese que la disolución de extracción es la misma que se utiliza como eluente para el proceso de cromatografía. Una vez que el cromatógrafo se halla en condiciones de operación estables, se prepara una curva de calibración que permita relacionar las áreas de los picos encontrados con una concentración de un patrón del ion de interés en el volumen de muestreo.

La curva de calibración se prepara utilizando 7 diferentes concentraciones del patrón del ion de interés, preparados a partir de una disolución intermedia de 20 mg/L para el fluoruro y de 100 mg/L para los demás aniones. La misma debe encontrarse en el

ámbito lineal y su coeficiente de correlación debe ser mayor o igual a 0,9950. El Cuadro 7 muestra las concentraciones para la curva de calibración.

Cuadro 7. Concentraciones utilizadas para la elaboración de la curva de calibración con el cromatógrafo de iones Dionex ICS3000.

Punto de la curva	Concentración del patrón para fluoruro (mg/L)	Concentración del patrón para cloruro, nitrato y sulfato (mg/L)
1	0 (blanco)	0 (blanco)
2	0,2	1,0
3	0,6	3,0
4	1,2	6,0
5	1,8	9,0
6	2,4	12,0
7	3,6	18,0

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los resultados de la cromatografía de iones, se calcula la masa de los iones con la ecuación 1.

$$m_i = C_{n_i} \cdot \frac{V_a}{1000} \cdot \frac{A_{TF}}{A_a} \cdot 1000 \quad (1)$$

Donde:

m_i : masa del ion (μg)

C_{ni} : concentración del ion (mg/L)

V_a : volumen de aforo (mL)

A_{TF} : área total del filtro (cm^2)

A_a : área del filtro analizada (cm^2)

Luego con dicha masa se calcula la concentración de iones en el aire haciendo uso de la ecuación 2.

$$C_{nia} = \frac{m_i}{V_{STD}} \quad (2)$$

Donde:

C_{nia} : concentración del ion en el aire ($\mu g/m^3$)

m_i : masa del ion (μg)

V_{STD} : volumen de aire muestreado estándar (m^3)

Los metales analizados son Berilio (Be), Sodio (Na), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Potasio (K), Calcio (Ca), Titanio (Ti), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Arsénico (As), Selenio (Se), Molibdeno (Mo), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Antimonio (Sb), Bario (Ba), Mercurio (Hg), Talio (Tl) y Plomo (Pb).

Al igual que para el análisis de aniones, se corta una porción del filtro de $44,45 \text{ cm}^2$ y se sitúa en un tubo de teflón para el digestor de microondas. A cada tubo se le añade 20 mL de una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) al 5,55 %v/v y ácido clorhídrico (HCl) al 16,75 %v/v. Una vez colocados los tubos en el digestor, se enciende el mismo y se inicia con una rampa de calentamiento por 15 minutos hasta alcanzar una temperatura de $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Luego dicha temperatura se mantiene por un tiempo de 15

minutos, y transcurrido este el equipo realiza un enfriamiento por otros 15 minutos, tras lo cual se debe esperar a que se alcance la temperatura ambiente para poder retirar las muestras.

A continuación, se filtra cuantitativamente la disolución, y la muestra se afora en un balón de 50 mL. Finalmente, el análisis se hace mediante la técnica de plasma de acoplamiento inductivo con espectrómetro de masas (ICP-MS, por sus siglas en inglés).

Para este análisis se utiliza el equipo ICP-MS ThermoScientific iCAP RQ. El mismo debe cumplir con una serie de especificaciones de fábrica que deben verificarse previo al análisis. Para ello se ejecuta un reporte de rendimiento utilizando la solución "A Tune B" del fabricante que contiene una mezcla de 1ppb de litio (Li), Cobalto (Co), Indio (In), Bario (Ba), Cerio (Ce), Bismuto (Bi) y Uranio (U) en una matriz líquida de ácido nítrico al 2% y ácido clorhídrico al 0,5%. El Cuadro 8 muestra las condiciones con las que debe cumplir el equipo tras el reporte de rendimiento para poder ejecutar los análisis.

Cuadro 8. Condiciones de sensibilidad, estabilidad y prueba de calibración de masa del ICP-MS iCAP RQ.

Sensibilidad		
Analito	Condición	Límite
Bkg 4,5	Menor que	1,0 CPS
Bkg 220,7	Menor que	2,0 CPS
59Co/35Cl.16°	Mayor que	18,0
59Co	Mayor que	30 000,0 CPS
238U	Mayor que	85 000,0 CPS
209Bi	Mayor que	42 500,0 CPS

140Ce.16O/140Ce	Menor que	0,01
115In	Mayor que	35 000,0 CPS

Estabilidad

Analito	Límite (%)
59Co	2
238U	2
209Bi	2
115In	2

Prueba de calibración de masas

Analito	Ancho de pico mínimo (u)	Ancho de pico máximo (u)
59Co	0,650	0,850
115In	0,650	0,850
209Bi	0,650	0,850

Fuente: Elaboración propia

Si el equipo no cumple con alguna de las especificaciones mostradas en el Cuadro 8, debe realizarse un ajuste automático, en el cual se pasa la misma solución y el equipo realiza los ajustes necesarios. Luego se corre nuevamente el reporte de rendimiento para verificar el cumplimiento de los parámetros.

Un aspecto importante de señalar sobre el ICP-MS iCAP RQ es que utiliza el método de discriminación por energía cinética (KED por sus siglas en inglés) con helio (He) como gas de colisión para atenuar las interferencias poliatómicas no deseadas. Este método consiste en que los iones poliatómicos son más grandes que los iones del analito de igual masa, y por este motivo chocan más con el gas de la celda,

emergiendo con una menor energía residual. Estos iones de baja energía son entonces excluidos mediante un voltaje en la celda de salida.⁷⁷

Una vez que se verifican las especificaciones establecidas por el fabricante, se procede a realizar una curva de calibración para los metales de interés utilizando patrones estándar trazables al NIST. Se utilizan 8 puntos de concentración entre (0 – 10,0) µg/L para el mercurio y 18 para los demás metales entre (0-400) µg/L, y se verifica que la curva resultante se encuentre en el ámbito lineal con un coeficiente de correlación mayor o igual a 0,9950. El Cuadro 9 muestra las características de los patrones estándar utilizados y el Cuadro 10 las concentraciones para la curva de calibración de los metales.

Cuadro 9. Características de los patrones estándar de metales para el ICP - MS iCAP RQ

Patrón de Mercurio	
Analitos	Mercurio (Hg)
Número de Patrón	0143-1
Marca	Inorganic Ventures
Concentración certificada	(10,023 ± 0,057) µg/mL
Matriz	Ácido nítrico al 10 %v/v
Concentración de la disolución intermedia	20 µg/L

Cuadro 9 (Continuación). Características de los patrones estándar de metales para el ICP - MS iCAP RQ

Patrón multielemental	
------------------------------	--

⁷⁷ Argilent Technologies. (2010). Collision/Reaction Cells in ICP-MS: Cell Design Considerations for Optimun Performance in Helium Mode with KED. Recuperado el 8 de julio de 2019 de Argilent: https://www.agilent.com/cs/library/articlereprints/public/5990_5955EN%20HR.pdf

Analitos	Aluminio (Al), Antimonio (Sb), Arsénico (As), Bario (Ba), Berilio (Be), Boro (B), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cobre, (Cu), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Potasio (K), Selenio (Se), Silicio (Si), Plata (Ag), Sodio (Na), Talio (Tl), Titanio (Ti), Vanadio (V) y Zinc (Zn)
Número de Patrón	0077-7
Marca	High-Purity Standards
Concentración certificada	(100 ± 1) µg/mL para cada metal
Matriz	Ácido nítrico al 5 %v/v con trazas de ácido fluorhídrico (HF)
Concentración de la disolución intermedia	50 µg/L, 300 50 µg/L y 400 50 µg/L

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 10. Concentraciones utilizadas para la elaboración de la curva de calibración con el ICP-MS iCAP RQ.

Punto de la curva	Concentración del patrón para mercurio (µg/L)	Concentración del patrón multielemental (µg/L)
1	0 (blanco)	0 (blanco)
2	0,2	0,5
3	0,4	1,0
4	1,0	2,5

Cuadro 10 (Continuación). Concentraciones utilizadas para la elaboración de la curva de calibración con el ICP-MS iCAP RQ.

Punto de la curva	Concentración del patrón para mercurio (µg/L)	Concentración del patrón multielemental (µg/L)
5	2,0	5,0
6	4,0	7,5
7	8,0	10,0
8	10,0	15,0
9	-	20,0
10	-	25,0
11	-	30,0
12	-	50,0
13	-	75,0
14	-	100,0
15	-	150,0
16	-	200,0
17	-	300,0
18	-	400,0

Fuente: Elaboración propia

Con las concentraciones de los metales leídos de la muestra se calcula la masa de cada uno haciendo uso de la ecuación 3.

$$m_m = Cn_m \cdot \frac{V_a}{1000} \cdot \frac{A_{TF}}{A_a} \quad (3)$$

Donde:

m_m : masa del metal (µg)

Cn_m : concentración del metal (µg/L)

V_a : volumen de aforo (mL)

A_{TF} : área total del filtro (cm²)

A_a : área del filtro analizada (cm^2)

Finalmente, se calcula la concentración del metal en el aire con la ecuación 4.

$$C_{n_{ma}} = \frac{m_m}{V_{STD}} \quad (4)$$

Donde:

$C_{n_{ma}}$: concentración del metal en el aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

m_m : masa del metal (μg)

V_{STD} : volumen de aire muestreado estándar (m^3)

Red Automática

Adicional a la Red Manual, se cuenta con seis estaciones automáticas, de las cuales dos están en funcionamiento y se encuentran ubicadas en el distrito de Hatillo y el cantón de Coronado. De las cuatro estaciones restantes, una ya se encuentra instalada en Desamparados e inició su operación en el segundo semestre del 2019, mientras que las tres restantes se hallan en proceso de instalación. El Cuadro 11 muestra los contaminantes analizados por cada una de las dos estaciones activas para el periodo 2017-2018.

El procedimiento de validación de los datos implica la identificación de datos extremos y comportamientos temporales o estacionales anómalos. Inicialmente, se ejecuta una limpieza de datos que no son válidos de acuerdo con las banderas asignadas en los sistemas de recopilación de datos de cada analizador. Las banderas son comunes para identificar cuando hay fallas eléctricas o de comunicación en los sistemas, fallas en los equipos de medición o por fallas en las calibraciones o mantenimientos.

Cuadro 11. Contaminantes analizados por las estaciones automáticas de Hatillo y Coronado.

Estación	Contaminantes
Hatillo (SJ-03)	Monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO ₂) y dióxido de nitrógeno (NO ₂)
Coronado (CO-01)	Dióxido de azufre (SO ₂), PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{1.0}
Desamparados	Óxidos de nitrógeno (NO _x), dióxido de azufre (SO ₂), monóxido de carbono (CO), PM ₁₀ , PM _{2.5} , compuestos reactivos de nitrógeno (NO _y), carbono negro (pendiente), BTEX (pendiente) y carbonilo (pendiente)

Fuente: Elaboración propia

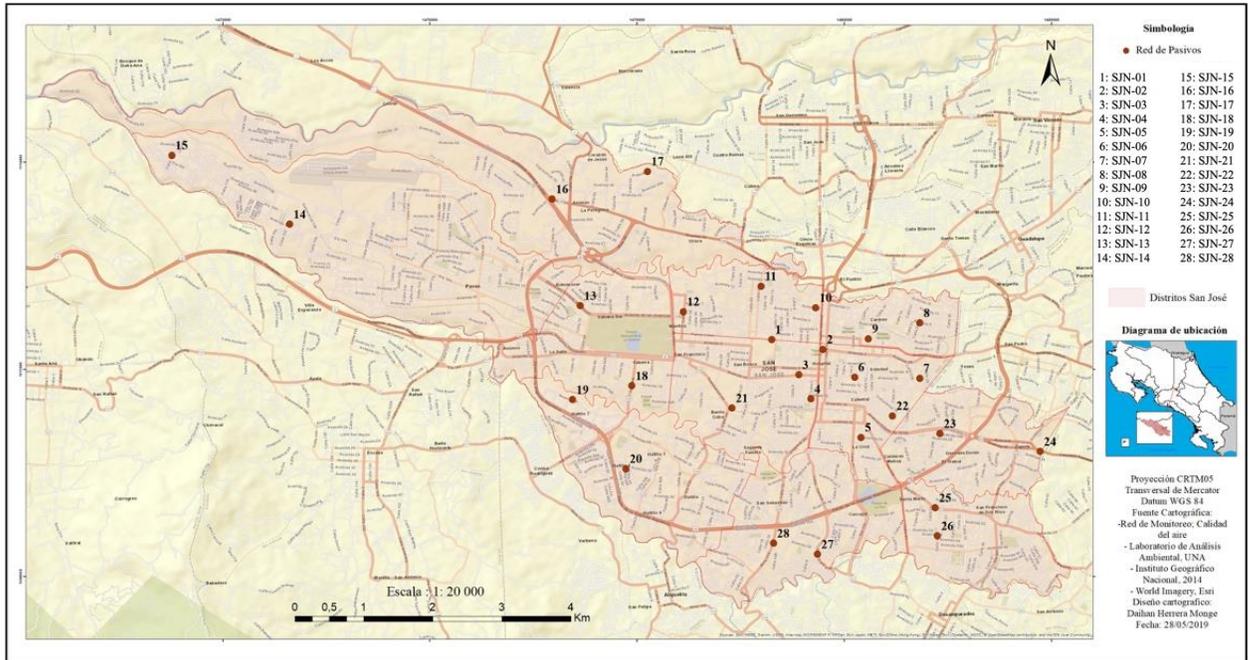
Superada la depuración por las banderas, se utilizan gráficas de series de tiempo para identificar saltos abruptos en la magnitud del parámetro que se mide o comportamientos anómalos temporales de los contaminantes. Esto puede deberse a cambios en el funcionamiento del sensor o analizador. También con las series de tiempo se conoce de la existencia de valores extremos de corta o larga duración, así como corrimientos en la línea base y valores constantes por periodos extensos de tiempo.

Una vez que se explican o tratan los datos encontrados en este proceso, las gráficas temporales permiten observar perfiles del contaminante, los cuales pueden ser diarios, horarios o con una escala temporal mayor.

Luego del proceso de limpieza, revisión y verificación de las bases de datos, y con ayuda de lo estipulado en el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio N° 39951-S, se analizan los valores horarios para todos los contaminantes, y adicional el máximo anual para NO₂, los promedios de 8 h para CO y todas las PM, así como los promedios de 3 h para SO₂. Los límites para dichos contaminantes se presentan en el Cuadro 2 de la Introducción.

Red Pasiva

En cuanto al muestreo de la red pasiva, el Laboratorio coordina con las Municipalidades de San José y Belén para la colocación y retiro de los tubos. En el caso de dichas redes, la de San José está compuesta por 28 sitios y la de Belén por 11. En la Figura 17 se presenta el mapa de distribución de los puntos de la red de San José y en la Figura 18 se presenta el mapa de los puntos de red del cantón de Belén.



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de San José

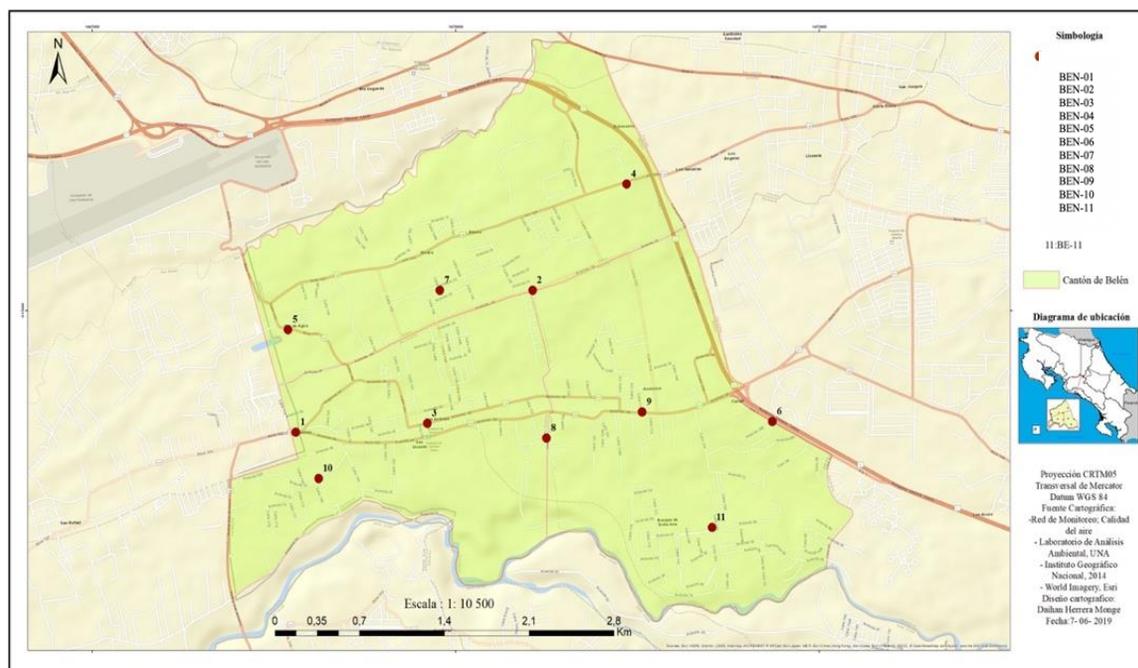
El procedimiento seguido para estas redes consiste en que se colocan tubos, en estos sitios, con mallas tratadas con una mezcla de trietanolamina/acetona en proporción 1:8, que permite la fijación del dióxido de nitrógeno (NO₂) que entra en el tubo. Los tubos se ponen en campo por 21 días, permitiendo la permeación del NO₂ en las mallas.

Luego, los tubos se transportan al Laboratorio y las mallas se procesan con el reactivo de Griess-Saltzman para analizar la concentración de nitritos por la técnica de espectrofotometría ultravioleta-visible a una longitud de onda de 543nm. Para esto se elabora una curva de calibración con 7 puntos de concentraciones distintas del patrón de nitrito a partir de una disolución intermedia de 2000 µg/L, la cual debe hallarse en el ámbito lineal y tener un coeficiente de correlación mayor a 0,9950. El Cuadro 12 muestra las concentraciones para la curva de calibración del nitrito.

Cuadro 12. Concentraciones utilizadas para la elaboración de la curva de calibración de nitrito con el espectrofotómetro ultravioleta-visible.

Punto de la curva	Concentración del patrón ($\mu\text{g/L}$)
1	0 (blanco)
2	100,0
3	200,0
4	300,0
5	500,0
6	640,0
7	750,0

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Belén.

Controles de Calidad

Calibración de la velocidad de flujo de muestreo para el muestreador de alto volumen PM₁₀ y PM_{2.5} utilizado en la red Manual

El equipo se calibra cada seis muestreos. Para realizar esta calibración se utiliza un kit que contiene tres platos provistos de agujeros que varían en número (10, 13 y 18) y que generan una caída de presión conocida que luego se verifica mediante una recta de calibración.

El procedimiento consiste en primero desconectar el motor del equipo del controlador de flujo y conectarlo a una fuente de poder estable de corriente. Luego se retira el portafiltros y se coloca el sujetador de platos del kit, asegurándose de que no hayan fugas. Una vez ajustado el sujetador, se coloca el plato correspondiente entre el cilindro metálico y el sujetado y se enciende el motor. Se deja que el equipo opere por 5 minutos para que alcance equilibrio térmico y transcurrido este tiempo se coloca el manómetro diferencial de agua previamente nivelado con la manguera del kit. Se mide la temperatura ambiente y la presión barométrica, y se anota la lectura del manómetro. Luego se conecta el manómetro a la manguera que conduce al medidor de flujo del equipo y se realiza la lectura correspondiente. Este procedimiento se repite para cada uno de los 3 platos y finalmente con las lecturas del manómetro y las temperaturas y presiones barométricas se calcula la velocidad de flujo en condiciones estándar y la presión manométrica transformada para luego elaborar la curva de calibración, donde el coeficiente de correlación obtenido debe ser mayor a 0,9950.

Adicionalmente el cronómetro, balanza analítica, balanza semimicroanalítica, calibrador de flujo, termómetro y barómetro utilizados para la medición de PM₁₀ y

PM_{2.5} están debidamente calibrados por un laboratorio acreditado para estas magnitudes, según el plan anual de calibración del Laboratorio.

Análisis de disolución patrón para la determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno en aire ambiente por el método de difusión pasiva

Se prepara una disolución madre de nitrito de sodio ya sea a partir del pesado y disolución del reactivo en agua desionizada o bien mediante el uso de una alícuota de una disolución estandar trazable. Luego se elabora una disolución intermedia y con esta se genera una curva de calibración de 6 patrones y un blanco en el ámbito lineal, los cuales se leen por triplicado. La curva resultante debe tener un coeficiente de correlación de 0,9950.

De igual manera la balanza analítica y el espectrofotómetro UV-visible que se utilizan para este análisis están debidamente calibrados por un laboratorio acreditado para estas magnitudes, de acuerdo al plan anual de calibración del Laboratorio.

Calibración de las estaciones de la red automática

Las estaciones de monitoreo automático de calidad del aire cuentan con distintos controles de calidad para garantizar la confiabilidad en los resultados. Algunos de estos controles son críticos, de tipos operacionales y sistemáticos; los cuales varían según el tipo de equipo y contaminantes a medir (gases o partículas).

Los controles críticos están relacionados con la comprobación en el tiempo de la veracidad de las concentraciones reportadas por los equipos. Para los analizadores de gases, esto se hace mediante el uso de gases de concentración certificada con

trazabilidad al NIST u otro equivalente. Esto consiste en revisar la respuesta del equipo en dos puntos:

- Aire cero: se expone el equipo a aire purificado libre del contaminante de interés y otras interferencias.
- "Span": mezcla gaseosa del contaminante de interés y aire a una concentración entre un 70-90 % de la escala completa del equipo.

En cuanto a los controles operacionales, estos son importantes para mantener y evaluar la calidad del sistema de recolección de datos. El más relevante es el relacionado a la calibración multipunto de los analizadores de gases, el cual consiste en una evaluación de la veracidad y linealidad de la respuesta del equipo en su rango de trabajo, utilizando mezclas gaseosas de concentración conocida para el contaminante de interés. Como mínimo contempla 5 puntos: un cero y cuatro puntos distribuidos en el rango de interés. Cuando esta calibración no es satisfactoria, se procede a hacer un ajuste de la respuesta del equipo y una comprobación para determinar si se cumple con los criterios establecidos.

Las calibraciones multipunto se hacen de forma rutinaria o bajo ciertas circunstancias, como por ejemplo:

- Cuando se instal aun equipo nuevo
- Después de mover o trasladar un equipo de una estación a otra
- Después de cualquier reparación o mantenimiento importante
- Después de estar varios días apagados o fuera de servicio
- Cuando haya un incumplimiento de los controles críticos

Para los controles críticos y operacionales mencionados anteriormente se tienen establecidos criterios de cumplimiento que conllevan a una acción de respuesta. Estos criterios se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Criterios de frecuencia y aceptación para los controles de calidad de los analizadores de gases.

Actividad	Frecuencia	Criterio de Aceptación	Acción requerida
Comprobación de 2 puntos (cero y span)	Diaria	< 5 %	No se requiere calibrar
		5 – 10 %	Calibración opcional
		> 10 %	Debe calibrarse
Calibración multi-punto	Cada 3 meses o cuando se requiera	< 2 % en cada punto	Revisión general y ajuste del equipo

Fuente: Elaboración propia

El incumplimiento de alguno de estos criterios podría invalidar la información recolectada en un periodo determinado, previa valoración de la causa e impacto del problema.

Sobre los controles de tipo sistemático, estos son importantes para la correcta interpretación de los datos pero que normalmente no impactan la validez de los resultados en un periodo de tiempo pero sí podrían afectar su incertidumbre. Entre estos controles están la evaluación de la precisión y el error a largo plazo así como el tratamiento de los datos recolectados.

Es importante mencionar que de forma paralela a las acciones de control de calidad se llevan a cabo otras actividades relacionadas al mantenimiento de los equipos y la caseta como tal, de tipo preventivo y correctivo. Algunas de las cuáles involucran revisión de daños externos e internos, reemplazo por desgaste de partes, sustitución

de filtros de protección, limpieza de los colectores de las muestras gaseosas (“manifold” y tuberías), mantenimiento de las bombas de vacío y problemas de comunicación de los equipos, entre otros.



3. Resultados

Red Manual
Red Automática
Red Pasiva

Red Manual

Concentración de material particulado: PM₁₀ y PM_{2.5}

La red manual de monitoreo de calidad del aire está enfocada en el muestreo de partículas de tipo PM₁₀ y PM_{2.5} en 12 sitios (Cuadro 3), algunos de los cuáles cuentan con más de 10 años de monitoreo continuo. En el Cuadro 14 se muestran los resultados obtenidos de los últimos 9 años para los sitios de muestreo que han sido más regulares.

Cuadro 14. Evolución de los valores promedio anual de concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} registradas en los sitios de muestreo del Área Metropolitana, 2010-2018.

Sitio de muestreo	Promedio anual (µg/m ³)								
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
PM₁₀									
SJ-01	28	24	27	23	21	23	23	24	21
SJ-02	28	26	29	27	27	24	24	23	22
SJ-03	37	32	27	29	25	26	26	25	20
SJ-04	35	32	29	30	30	33	31	30	24
ES-01	22	23	23	22	24	26	24	24	-
BE-01	34	33	32	36	29	30	34	32	25
HE-01	56	45	42	46	45	35	50	36	30
CA-01	28	28	25	26	24	26	27	22	23
AL-01	25	26	22	27	21	30	25	23	18
PM_{2.5}									
SJ-05	-	-	-	22	25	24	33	-	-
SJ-06	-	-	-	-	-	-	-	26	22
HE-01	-	-	-	-	-	-	21	20	23

Nota: En rojo se indican los valores que incumplen los valores máximos establecidos en el decreto N° 39951-S.

Fuente: Elaboración propia

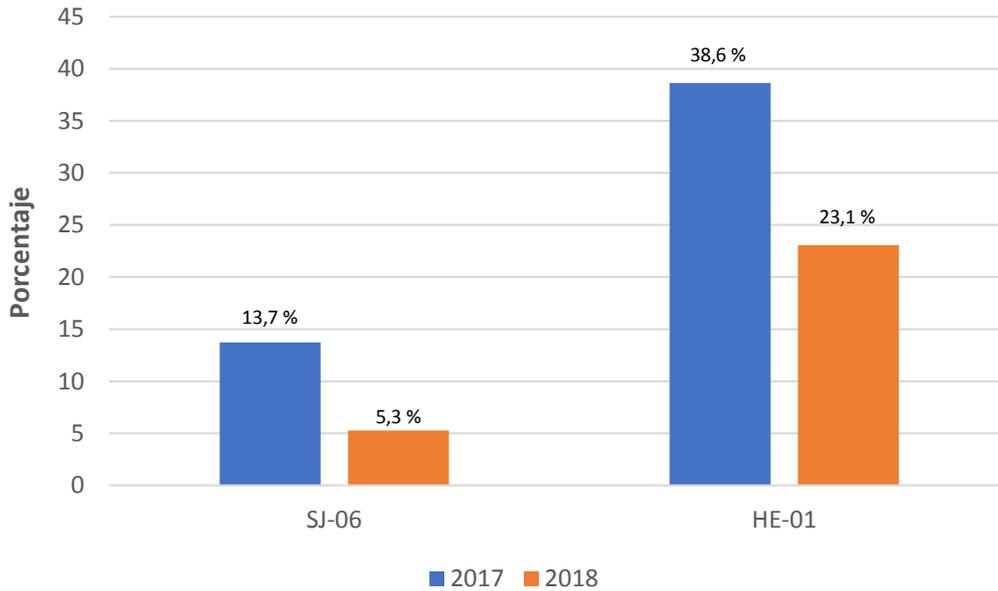
Es importante aclarar que el sitio ubicado en Escazú (ES-01) sufrió una interrupción en el 2018 por razones de fuerza mayor. En el caso del sitio de muestreo en el Plantel de la Municipalidad de San José (SJ-05) también debió ser reubicado y se trasladó a las instalaciones de las oficinas centrales del Ministerio de Salud. Por estas razones se observan cortes en las series de datos anuales mostrados en el cuadro anterior.

Al comparar los resultados obtenidos se puede observar que todos los sitios, a excepción de HE-01, presentaron en 2018 valores promedio anuales menores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que es el límite primario máximo establecido para concentraciones anuales de PM_{10} en el Decreto 39951-S, vigente desde el 2016. Este sitio de muestreo se caracteriza por estar cerca de una vía de alto flujo vehicular en la cual confluyen la mayoría de vehículos y líneas de transporte público que ingresan a la ciudad de Heredia.

Una situación un tanto diferente se presentan para las partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$), en donde todos los sitios de monitoreo registraron valores promedio superiores al límite máximo anual que está fijado en $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según la normativa nacional para exposición crónica. Este último hecho resulta de vital importancia ya que, al igual que en años anteriores, se sigue evidenciando la existencia de una problemática asociada a este contaminante que como se mencionó anteriormente provienen principalmente de procesos de combustión, tanto a nivel de fuentes móviles como estacionarias.

Para los años 2017 y 2018, no se observaron incumplimientos con la norma de 24 horas para partículas PM_{10} . Sin embargo, para el caso de partículas de $\text{PM}_{2.5}$ si se

presentaron, principalmente para el sitio HE-01 ubicado en Heredia. En la Figura 19 se muestra el porcentaje de días de monitoreo que incumplieron la norma.

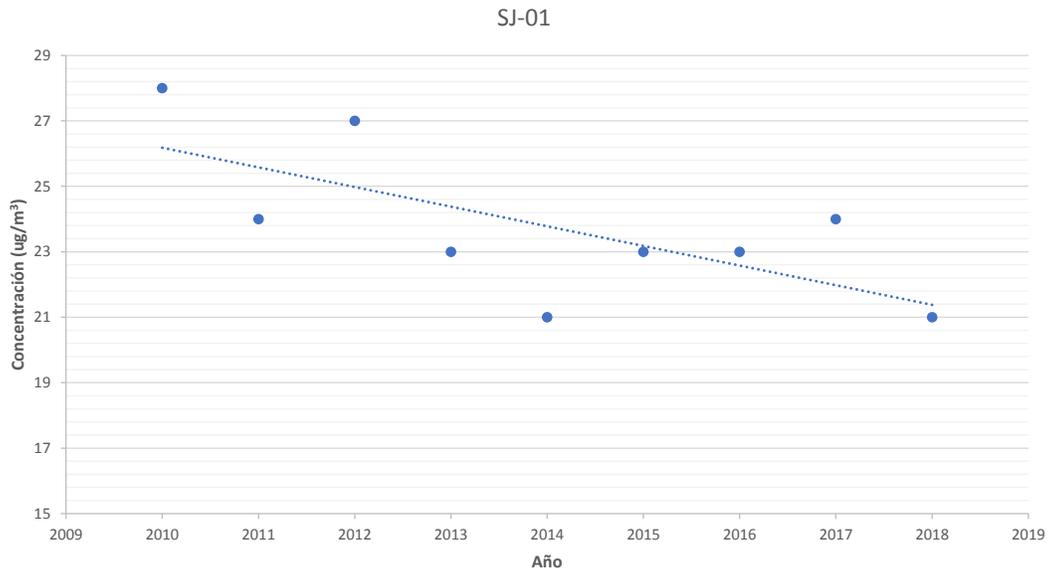


Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Porcentaje de días monitoreados con incumplimiento de la norma de 24 horas para partículas PM_{2.5}.

Es claro que el sitio de muestreo ubicado en Heredia posee el mayor número de incumplimientos debido a que este se encuentra ubicado en una escala micro orientada a una fuente específica, mientras que el punto ubicado en el Ministerio de Salud se ve influenciado tanto por el tránsito vehicular en la zona como por otras fuentes en los alrededores a una escala urbana. A pesar de esto, se dio una mejora en el 2018 donde se observó una disminución en el porcentaje de incumplimientos, cerca de un 50% en promedio. Esto podría estar relacionado con cambios en los patrones de tránsito en los alrededores además de la influencia de variables meteorológicas.

En cuanto a la tendencia de los datos, en promedio la mayoría de los sitios presentaron una disminución en las concentraciones de PM₁₀ a una tasa promedio anual del 3,6%. A excepción del sitio ES-01, ubicado en Escazú, que presentó hasta 2017 un aumento del 1,4% del promedio anual. En la Figura 20 se muestra un ejemplo del comportamiento predominante para el sitio ubicado en Catedral Metropolitana (SJ-01).

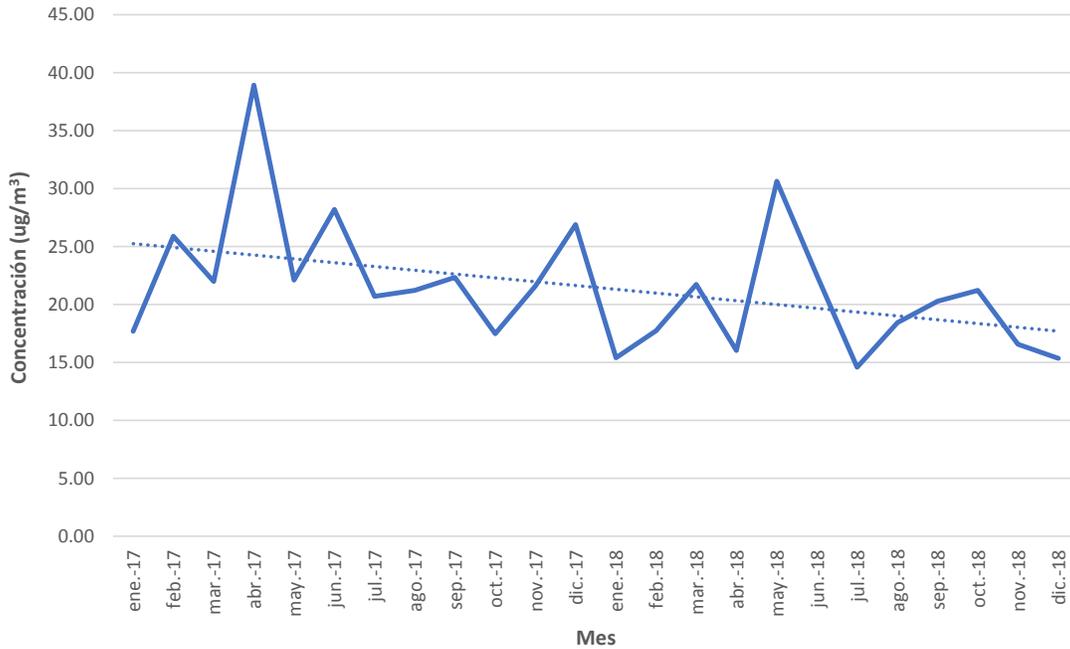


Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Comportamiento de las concentraciones promedio anuales de PM₁₀ en el sitio de muestreo ubicado en Catedral Metropolitana (SJ-01).

Al analizar los promedios mensuales de los últimos dos años se encontró la misma tendencia hacia una disminución sostenida de las concentraciones de PM₁₀. En la siguiente figura se puede observar este comportamiento para el mismo caso de Catedral Metropolitana, donde además se observaron los picos promedio más importantes en los meses de abril 2017 y mayo 2018, los cuales coinciden con las épocas de transición que se caracterizan por cambios en los patrones y velocidades

de los vientos, en conjunto con la influencia de fenómenos naturales como erupciones volcánicas y los polvos provenientes del desierto del Sahara. Esto podría considerarse como un factor estacional a dar seguimiento en el mediano plazo para determinar si puede considerarse como un patrón marcado año con año.



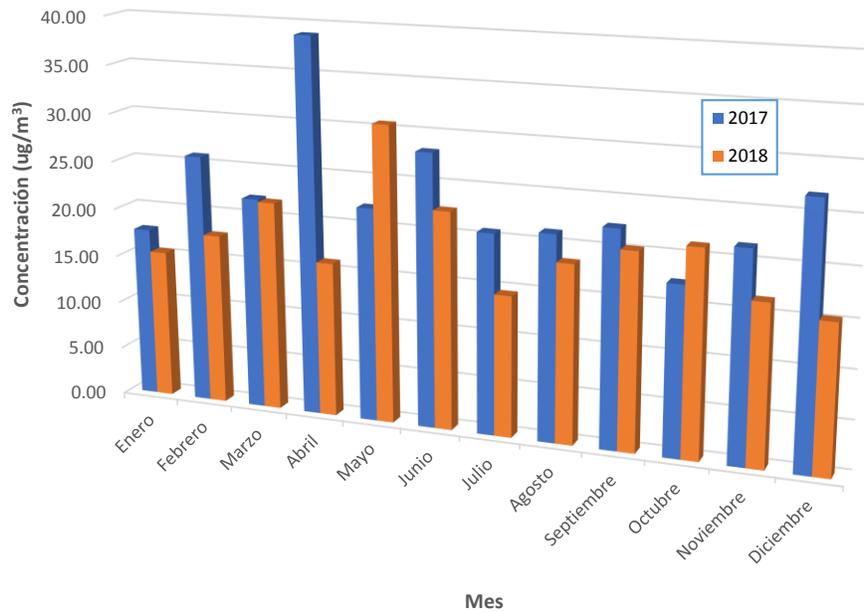
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Concentraciones mensuales de PM₁₀ para el periodo 2017-2018 en el sitio SJ-01.

A nivel mensual, en el 2018 se dio en general una disminución de los niveles de partículas PM₁₀ con respecto al 2017, tal y como se observa en la Figura 22 para el caso del punto ubicado en Catedral Metropolitana.

Es importante destacar que en el 2017 se dieron varios eventos de erupciones volcánicas que afectaron el área metropolitana, y como consecuencia pudieron elevar la mayoría de los promedios mensuales. Adicionalmente la actividad volcánica sufrió un descenso importante en el 2018. Más adelante se analizan los eventos más

importantes que se dieron en el periodo 2017-2018 gracias a los reportes del OVSICORI-UNA.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Comparación 2017-2018 de las concentraciones mensuales de PM₁₀ para el periodo 2017-2018 en el sitio SJ-01.

Para las partículas PM_{2.5} no fue posible establecer una clara tendencia de las concentraciones en los sitios activos debido a que el monitoreo es relativamente reciente. Mientras que en Heredia se dio un aumento, en el punto de MINSA el promedio anual disminuyó en el periodo 2017-2018.

Metales

El Cuadro 15 muestra la concentración de metales encontrada en las partículas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el año 2017 y el Cuadro 16 muestra la misma información en el año 2018. Para cada metal se muestra su concentración promedio anual con su respectivo error estándar como estimador de la desviación correspondiente.

Cuadro 15. Concentración promedio anual de los metales registrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana 2017.

Metales	Concentración promedio anual (ng/m ³)			
	SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Be	ND	ND	ND	0,117 ± 0,011
Na	3 255 ± 160	3 813 ± 285	3 012 ± 221	4 886 ± 523
Mg	365 ± 29	399 ± 44	305 ± 30	461 ± 78
Al	638 ± 66	703 ± 86	550 ± 51	769 ± 101
K	210 ± 10	216 ± 14	196 ± 11	259 ± 23
Ca	1 052 ± 57	1 095 ± 95	880 ± 64	1 165 ± 154
Ti	26,0 ± 2,0	29,5 ± 2,8	23,7 ± 1,4	37,2 ± 4,7
V	4,07 ± 0,49	4,12 ± 0,60	4,40 ± 0,31	6,32 ± 0,98
Cr	4,86 ± 0,96	5,4 ± 1,1	4,8 ± 1,1	24,9 ± 9,4
Mn	6,48 ± 0,41	6,54 ± 0,51	5,93 ± 0,31	21,6 ± 6,3
Fe	461 ± 43	530 ± 70	832 ± 412	772 ± 74
Co	0,201 ± 0,011	0,199 ± 0,011	0,169 3 ± 0,008 6	0,268 ± 0,025
Ni	2,09 ± 0,15	2,15 ± 0,20	2,60 ± 0,17	3,38 ± 0,36
Cu	15,7 ± 1,2	28,7 ± 1,7	45,1 ± 3,4	39,0 ± 3,6
Zn	39,0 ± 2,4	35,3 ± 2,2	34,3 ± 2,1	40,5 ± 3,6
As	0,387 ± 0,039	1,6 ± 1,2	0,452 ± 0,080	0,55 ± 0,19

Se	0,458 ± 0,089	0,412 ± 0,070	0,314 ± 0,038	0,53 ± 0,13
Mo	ND	2,29 ± 0,19	2,28 ± 0,11	8,4 ± 5,6
Ag	1,06 ± 0,35	4,3 ± 1,7	4,7 ± 2,7	1,53 ± 0,34
Cd	0,122 ± 0,010	0,38 ± 0,29	0,27 ± 0,18	0,089 ± 0,015
Sb	1,74 ± 0,17	3,36 ± 0,46	4,55 ± 0,90	3,26 ± 0,30
Ba	24,6 ± 3,4	22,7 ± 1,5	18,5 ± 1,0	30,8 ± 3,0
Hg	0,227 ± 0,022	0,212 ± 0,035	0,323 ± 0,037	0,421 ± 0,095
Tl	0,015 4 ± 0,002 5	0,020 2 ± 0,004 1	0,015 7 ± 0,002 3	0,016 1 ± 0,003 7
Pb	4,65 ± 0,40	4,54 ± 0,46	3,99 ± 0,40	4,80 ± 0,61

Nota: el valor reportado corresponde al promedio anual ± el error estándar de los datos. ND: No Detectable.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 15 (Continuación). Concentración promedio anual de los metales registrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana 2017.

Metales	Concentración promedio anual (ng/m ³)			
	SJ-06	ES-01	BE-01	CA-01
Be	ND	ND	ND	ND
Na	3 126 ± 245	3 347 ± 329	2 397 ± 166	4 310 ± 308
Mg	340 ± 41	411 ± 61	279 ± 32	515 ± 49
Al	433 ± 31	569 ± 82	875 ± 68	554 ± 43
K	171 ± 10	181 ± 17	211 ± 12	256 ± 16
Ca	912 ± 79	879 ± 106	792 ± 71	1 314 ± 108
Ti	19,4 ± 1,2	24,5 ± 2,2	35,8 ± 1,7	19,7 ± 1,3
V	12,8 ± 2,7	1,99 ± 0,15	9,2 ± 1,2	2,46 ± 0,32
Cr	2,79 ± 0,29	9,8 ± 2,6	5,4 ± 1,3	5,2 ± 1,3
Mn	4,64 ± 0,26	6,46 ± 0,80	8,97 ± 0,41	6,17 ± 0,68
Fe	289 ± 23	560 ± 163	671 ± 54	540 ± 51
Co	0,173 ± 0,013	0,146 ± 0,013	0,229 ± 0,011	0,154 1 ± 0,009 1
Ni	6,6 ± 1,5	1,33 ± 0,22	3,18 ± 0,30	1,54 ± 0,14
Cu	33,7 ± 4,5	34,1 ± 3,4	25,8 ± 3,2	29,9 ± 2,8

Zn	43,6 ± 4,9	20,1 ± 1,3	36,8 ± 2,5	31,0 ± 1,9
As	ND	ND	ND	0,394 ± 0,034
Se	0,59 ± 0,18	0,301 ± 0,050	0,259 ± 0,045	0,51 ± 0,11
Mo	2,85 ± 0,26	2,16 ± 0,14	3,7 ± 1,8	2,58 ± 0,42
Ag	ND	ND	ND	ND
Cd	0,108 ± 0,016	0,17 ± 0,11	0,106 ± 0,016	0,071 9 ± 0,005 3
Sb	1,99 ± 0,32	1,49 ± 0,15	2,34 ± 0,19	1,10 ± 0,15
Ba	16,8 ± 1,5	12,72 ± 0,75	27,2 ± 1,6	13,67 ± 0,90
Hg	0,306 ± 0,061	0,137 ± 0,027	0,247 5 ± 0,007 9	0,129 9 ± 0,009 8
Tl	0,016 2 ± 0,003 3	0,016 1 ± 0,003	0,013 1 ± 0,001 9	0,010 4 ± 0,002 0
		0		
Pb	3,23 ± 0,36	2,05 ± 0,16	2,57 ± 0,17	6,0 ± 1,7

Nota: el valor reportado corresponde al promedio anual ± el error estándar de los datos. ND: No Detectable.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 15 (Continuación). Concentración promedio anual de los metales registrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana 2017.

Metales	Concentración promedio anual (ng/m ³)		
	HE-01 PM ₁₀	HE-01 PM _{2.5}	AL-01
Be	ND	ND	ND
Na	1 647 ± 81	3 995 ± 262	3 764 ± 240
Mg	169,0 ± 6,9	454 ± 44	381 ± 36
Al	345 ± 32	483 ± 29	620 ± 59
K	113 ± 11	178 ± 14	265 ± 17
Ca	443 ± 20	930 ± 76	967 ± 82
Ti	19,2 ± 2,0	22,7 ± 1,3	28,7 ± 2,9
V	1,04 ± 0,13	2,59 ± 0,28	9,00 ± 0,60
Cr	1,78 ± 0,11	5,5 ± 1,5	4,5 ± 1,0
Mn	4,58 ± 0,62	5,57 ± 0,40	7,21 ± 0,63
Fe	289 ± 27	420 ± 61	379 ± 33

Informe de Calidad del Aire – Área Metropolitana de Costa Rica

Co	0,110 ± 0,010	0,168 ± 0,023	0,198 ± 0,013
Ni	0,697 ± 0,047	1,530 ± 0,085	3,60 ± 0,25
Cu	72,8 ± 7,1	332 ± 40	19,3 ± 1,6
Zn	15,2 ± 1,5	31,2 ± 2,6	28,4 ± 1,5
As	0,092 ± 0,011	ND	0,377 ± 0,038
Se	0,064 5 ± 0,006 6	0,220 ± 0,020	0,319 ± 0,031
Mo	2,79 ± 0,26	14,1 ± 1,1	1,697 ± 0,035
Ag	ND	ND	ND
Cd	0,038 0 ± 0,004 1	0,070 5 ± 0,008 3	0,120 ± 0,013
Sb	0,701 ± 0,079	0,857 ± 0,085	1,91 ± 0,24
Ba	11,9 ± 1,0	13,7 ± 1,2	15,1 ± 1,0
Hg	0,095 ± 0,032	0,150 ± 0,016	0,091 7 ± 0,009 9
Tl	0,000 92 ± 0,000 34	0,007 9 ± 0,001 5	0,009 5 ± 0,001 7
Pb	0,94 ± 0,13	1,92 ± 0,15	2,20 ± 0,16

Nota: el valor reportado corresponde al promedio anual ± el error estándar de los datos. ND: No Detectable.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 16. Concentración promedio anual de los metales registrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana 2018.

Metales	Concentración promedio anual (ng/m ³)			
	SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Be	ND	ND	0,29 ± 0,12	ND
Na	2 719 ± 246	3 701 ± 831	2 942 ± 201	2 821 ± 150
Mg	219 ± 32	246 ± 36	208 ± 20	243 ± 34
Al	532 ± 65	477 ± 34	415 ± 38	705 ± 179
K	198 ± 18	206 ± 24	194 ± 12	268 ± 37
Ca	830 ± 97	905 ± 118	759 ± 49	812 ± 76
Ti	23,3 ± 2,7	21,4 ± 1,4	17,9 ± 1,4	29,4 ± 8,5
V	4,01 ± 0,75	4,0 ± 1,0	5,48 ± 0,45	5,01 ± 0,90
Cr	2,79 ± 0,24	3,86 ± 0,87	3,08 ± 0,21	5,1 ± 1,0

Mn	6,05 ± 0,52	6,30 ± 0,43	5,75 ± 0,39	9,4 ± 1,8
Fe	428 ± 82	389 ± 33	380 ± 29	670 ± 107
Co	0,220 ± 0,020	0,253 ± 0,042	0,225 ± 0,030	0,276 ± 0,040
Ni	11,4 ± 5,5	2,18 ± 0,30	2,29 ± 0,23	3,83 ± 0,53
Cu	13,55 ± 0,95	24,9 ± 2,5	40,7 ± 3,6	42,1 ± 3,9
Zn	31,9 ± 2,6	41,0 ± 6,9	32,5 ± 2,1	37,0 ± 2,5
As	0,333 ± 0,038	ND	0,483 ± 0,093	0,409 ± 0,050
Se	0,410 ± 0,090	0,451 ± 0,080	0,469 ± 0,067	ND
Mo	ND	2,01 ± 0,20	2,50 ± 0,26	2,30 ± 0,22
Ag	0,95 ± 0,38	21,0 ± 5,8	18,5 ± 3,3	23,7 ± 2,0
Cd	0,186 ± 0,030	0,141 ± 0,030	0,160 ± 0,031	0,091 7 ± 0,009 2
Sb	1,29 ± 0,22	6,0 ± 1,5	4,67 ± 0,80	6,1 ± 2,1
Ba	13,8 ± 1,3	19,7 ± 1,1	15,4 ± 1,1	24,9 ± 1,8
Hg	0,089 ± 0,013	0,078 ± 0,014	0,074 1 ± 0,007 6	0,053 2 ± 0,004 6
Tl	0,038 ± 0,018	0,159 ± 0,065	0,095 ± 0,036	0,030 3 ± 0,006 3
Pb	4,1 ± 1,1	5,24 ± 0,70	5,39 ± 0,99	3,83 ± 0,68

Nota: el valor reportado corresponde al promedio anual ± el error estándar de los datos. ND: No Detectable.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 16 (Continuación). Concentración promedio anual de los metales registrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana 2018.

Metales	Concentración promedio anual (ng/m ³)			
	SJ-06	ES-01	BE-01	CA-01
Be	ND	-	0,176 ± 0,052	ND
Na	3 321 ± 224	-	3 130 ± 266	3 309 ± 273
Mg	423 ± 35	-	224 ± 24	318 ± 38
Al	781 ± 69	-	810 ± 101	771 ± 116
K	184 ± 11	-	245 ± 16	226 ± 15
Ca	1 209 ± 82	-	873 ± 69	1 138 ± 125
Ti	28,1 ± 2,4	-	37,2 ± 4,7	32,7 ± 4,3

V	7,1 ± 2,0	-	9,5 ± 1,4	2,92 ± 0,47
Cr	2,85 ± 0,11	-	3,52 ± 0,29	3,32 ± 0,11
Mn	5,57 ± 0,39	-	9,4 ± 1,1	8,2 ± 1,1
Fe	405 ± 40	-	637 ± 70	594 ± 89
Co	0,160 ± 0,011	-	0,326 ± 0,038	0,231 ± 0,029
Ni	2,46 ± 0,35	-	9,4 ± 3,4	2,08 ± 0,43
Cu	24,8 ± 2,7	-	41,9 ± 6,9	30,2 ± 3,1
Zn	36,2 ± 3,8	-	43,1 ± 4,9	31,2 ± 2,0
As	ND	-	0,349 0 ± 0,007 9	0,524 ± 0,054
Se	0,350 ± 0,053	-	ND	0,41 ± 0,15
Mo	2,55 ± 0,20	-	3,83 ± 0,82	ND
Ag	ND	-	134 ± 32	9,67 ± 0,94
Cd	0,097 ± 0,027	-	0,146 ± 0,024	0,140 ± 0,029
Sb	2,47 ± 0,44	-	3,1 ± 1,1	1,34 ± 0,21
Ba	20,9 ± 2,1	-	22,9 ± 2,4	19,5 ± 2,4
Hg	0,081 0 ± 0,005 0	-	0,100 ± 0,028	0,055 4 ± 0,004 5
Tl	0,012 9 ± 0,001 8	-	0,074 ± 0,027	0,016 3 ± 0,001 5
Pb	7,0 ± 1,2	-	3,28 ± 0,44	8,5 ± 2,7

Nota: el valor reportado corresponde al promedio anual ± el error estándar de los datos. ND: No Detectable.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 16 (Continuación). Concentración promedio anual de los metales registrada en los sitios de muestreo del Área Metropolitana 2018.

Metales	Concentración promedio anual (ng/m ³)		
	HE-01 PM ₁₀	HE-01 PM _{2,5}	AL-01
Be	ND	0,44 ± 0,32	ND
Na	957 ± 61	19 428 ± 16 076	3 234 ± 212
Mg	124,3 ± 9,1	2 328 ± 1 926	379 ± 34
Al	252 ± 33	774 ± 250	633 ± 48
K	60,8 ± 4,4	889 ± 725	186 ± 13

Informe de Calidad del Aire – Área Metropolitana de Costa Rica

Ca	305 ± 22	3 754 ± 2 694	1 024 ± 77
Ti	10,7 ± 1,7	29,6 ± 6,8	22,4 ± 1,7
V	0,73 ± 0,16	2,47 ± 0,45	8,6 ± 1,2
Cr	1,55 ± 0,18	3,69 ± 0,24	2,599 ± 0,076
Mn	2,34 ± 0,40	5,7 ± 1,4	5,38 ± 0,37
Fe	207 ± 36	423 ± 80	334 ± 29
Co	0,077 ± 0,010	0,224 ± 0,079	0,163 3 ± 0,007 7
Ni	0,654 ± 0,071	1,59 ± 0,13	3,42 ± 0,37
Cu	106 ± 12	527 ± 55	13,7 ± 1,0
Zn	10,4 ± 1,2	31,3 ± 2,5	29,8 ± 1,8
As	ND	ND	ND
Se	0,023 4 ± 0,003 0	0,161 ± 0,021	0,165 ± 0,019
Mo	3,71 ± 0,33	19,7 ± 1,3	2,7 ± 1,1
Ag	1,17 ± 0,99	0,870 ± 0,095	ND
Cd	0,017 6 ± 0,001 9	0,153 ± 0,079	0,065 0 ± 0,006 2
Sb	0,57 ± 0,11	1,19 ± 0,24	1,87 ± 0,25
Ba	10,6 ± 1,8	22,6 ± 4,1	18,8 ± 1,7
Hg	0,133 ± 0,023	0,121 ± 0,016	0,089 4 ± 0,007 8
Tl	0,001 71 ± 0,000 18	0,011 5 ± 0,004 1	0,012 4 ± 0,003 3
Pb	0,581 ± 0,076	2,80 ± 0,42	2,46 ± 0,25

Nota: el valor reportado corresponde al promedio anual ± el error estándar de los datos. ND: No Detectable.

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que algunos metales como el berilio (Be), la plata (Ag) y el arsénico (As) presentan concentraciones bastante bajas en diferentes sitios a lo largo de los dos años, inclusive en algunos de ellos estando por debajo del límite de detección del ICP-MS utilizado para la medición de la concentración de estas especies.

Otros metales como el sodio (Na), magnesio (Mg), aluminio (Al), potasio (K), calcio (Ca), hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) presentan concentraciones más elevadas, sin embargo, varios de estos son elementos abundantes que forman parte de la corteza terrestre, por lo que es de esperar que su concentración sea mayor.

También cabe destacar que la concentración de plomo (Pb), cuyo valor máximo establecido por el Decreto 39951-S corresponde a 70 ng/m^3 , se mantiene bastante por debajo del límite, con un valor máximo de $(6,0 \pm 1,7) \text{ ng/m}^3$ en el 2017 y de $(8,5 \pm 2,7) \text{ ng/m}^3$ para el 2018, ambos valores ubicados en el punto CA-01 correspondiente a la estación del ferrocarril en Cartago.

Análisis de Varianza (ANOVA) para los metales

Además de conocer las concentraciones de los metales en las partículas suspendidas, también interesa saber si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de concentración para cada metal en los distintos sitios.

Para esto, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor, donde se parte de la hipótesis nula (H_0) de que las medias de la concentración del metal en cuestión son iguales para todos los sitios y la hipótesis alternativa (H_A) de que existe diferencia entre las medias de concentración del metal en los diferentes lugares.

El análisis se realiza con ayuda del software Minitab 18, el cual calcula el estadístico de prueba llamado valor-p. Este debe ser comparado con el valor de significancia (α) que para este estudio es de 0,05 de manera que el porcentaje de confianza sea de un 95%.

Si al comparar el valor-p con α , el primero es menor o igual al segundo, entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, lo que indica que cuando el valor-p $\leq \alpha$ existe suficiente evidencia estadísticamente significativa para afirmar

que las medias de concentración del metal en cuestión difieren para los distintos sitios.

Por el contrario si ocurre que el valor- $p > \alpha$ entonces se acepta la hipótesis nula. En este caso no se puede afirmar que todas las medias sean iguales, sino que, lo que se comprueba es que no existe suficiente evidencia estadísticamente significativa para probar lo contrario.

El Cuadro 17 muestra los resultados del análisis de varianza para los diferentes metales en ambos años.

Cuadro 17. Resultado de los análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales en los diferentes sitios para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	0,42	0,05	No
Na	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,411	0,05	No
Mg	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,345	0,05	No
Al	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,009	0,05	Sí

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 17 (Continuación). Resultado de los análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales en los diferentes sitios para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
K	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,499	0,05	No
Ca	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,313	0,05	No
Ti	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,001	0,05	Sí
V	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Cr	2017	0,001	0,05	Sí
	2018	0,001	0,05	Sí
Mn	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Fe	2017	0,15	0,05	No
	2018	0	0,05	Sí
Co	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Ni	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,002	0,05	Sí
Cu	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Zn	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 17 (Continuación). Resultado de los análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales en los diferentes sitios para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
As	2017	0,573	0,05	No
	2018	0,611	0,05	No
Se	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Mo	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Ag	2017	0,558	0,05	No
	2018	0	0,05	Sí
Cd	2017	0,624	0,05	No
	2018	0,023	0,05	Sí
Sb	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Ba	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Hg	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,002	0,05	Sí
Tl	2017	0,001	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí
Pb	2017	0	0,05	Sí
	2018	0	0,05	Sí

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro anterior se puede apreciar que para la mayoría de los metales sí existe suficiente evidencia estadísticamente significativa para afirmar que las medias de concentración son diferentes, siendo que para el año 2017, 20 de los 24 metales para los cuales se tienen datos presentan medias de concentración distintas entre sitios y para el año 2018, 19 de los 25 metales presentan el mismo resultado.

Aunque los ANOVA nos permiten determinar si existen o no medias distintas, no nos indica cuáles son los sitios donde se presentan estas. Por este motivo, también se realizó un análisis de Tuckey para cada metal con un 95 % de confianza, el cual indica entre cuáles sitios se presentan las diferencias. El Cuadro 18 muestra los sitios que difieren para cada metal en el 2017 y 2018.

Cuadro 18. Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018
Be	-	-
Na	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-04 difiere de SJ-01, SJ-06, SJ-03, BE-01 y HE-01 PM₁₀ •CA-01 difiere de SJ-03, BE-01 y HE-01 PM₁₀ •HE-01 PM_{2.5}, SJ-02 y AL-01 difieren de BE-01 y HE-01 PM₁₀ •ES-01 difiere de HE-01 PM₁₀ 	-

- SJ-01, SJ-06 y SJ-03 difieren de HE-01 PM₁₀

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18 (Continuación). Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018
Mg	<ul style="list-style-type: none"> •CA-01 difiere de SJ-03, BE-01 y HE-01 PM₁₀ •SJ-04, HE-01 PM_{2.5}, SJ-02, AL-01 y SJ-01 difieren de HE-01 PM₁₀ 	-
Al	<ul style="list-style-type: none"> •BE-01 difiere de CA-01, SJ-03, SJ-06 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-04 difiere de SJ-06 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-01 y SJ-02 difieren de SJ-06 y HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> •BE-01 difiere de HE-01 PM₁₀
K	<ul style="list-style-type: none"> •AL-01 difiere de SJ-03, SJ-06 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-04 y CA-01 difieren de SJ-06 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-01, SJ-02 y BE-01 difieren de HE-01 PM₁₀ 	-

	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-03 y HE-01 PM_{2.5} difieren de HE-01 PM₁₀
Ca	<ul style="list-style-type: none"> •CA-01 difiere de SJ-03, BE-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, SJ-06, AL-01, ES-01 y HE-01 PM_{2.5} difieren de HE-01 PM₁₀

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18 (Continuación). Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018
Ti	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-04 difiere de SJ-01, SJ-03, SJ-06, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •BE-01 difiere de SJ-03, SJ-06, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} 	<ul style="list-style-type: none"> •BE-01 difiere de SJ-03 y HE-01 PM₁₀ •CA-01 difiere de HE-01 PM₁₀
V	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-06 difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, CA-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •BE-01 y AL-01 difieren de SJ-01, SJ-02, SJ-03, CA-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} 	<ul style="list-style-type: none"> •BE-01 difiere de SJ-01, SJ-02, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •AL-01 difiere de CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-06 difiere de HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-03 difiere de HE-01 PM₁₀

	●SJ-04 difiere de CA-01 y HE-01 PM ₁₀ y PM _{2.5}	
Cr	●SJ-04 difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-02, SJ-06, BE-01, CA-01, AL-01 y HE-01 PM ₁₀	●SJ-02 y SJ-04 difieren de HE-01 PM ₁₀
Mn	●SJ-04 difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-06, BE-01, AL-01, ES-01, CA-01 y HE-01 PM ₁₀ y PM _{2.5}	●SJ-04, BE-01 y CA-01 difieren de HE-01 PM ₁₀
Fe	-	●SJ-04 y BE-01 difieren de AL-01 y HE-01 PM ₁₀ ●CA-01 difiere de HE-01 PM ₁₀

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18 (Continuación). Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018
Co	●SJ-04 difiere de SJ.-01, SJ-02, SJ-03, SJ-06, AL-01, CA-01, ES-01 y HE-01 PM ₁₀ y PM _{2.5} ●BE-01 difiere de CA-01 y HE-01 PM ₁₀ ●SJ-01, SJ-02 y AL-01 difieren de HE-01 PM ₁₀	●BE-01 difiere de AL-01, SJ-06 y HE-01 PM ₁₀ ●SJ-02, SJ-04 y CA-01 difieren de HE-01 PM ₁₀

Ni	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-06 difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, AL-01, BE-01, CA-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •AL-01 difiere de CA-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-04 y BE-01 difieren de CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-03 difiere de HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-01 difiere de CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5}
Cu	<ul style="list-style-type: none"> •HE-01 PM_{2.5} difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, SJ-06, ES-01, CA-01, BE-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> • HE-01 PM_{2.5} difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, SJ-06, CA-01, BE-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ • HE-01 PM₁₀ difiere de SJ-01 y AL-01

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18 (Continuación). Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018
Zn	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-04 y SJ-06 difieren de AL-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ •SJ-01, SJ-02 y BE-01 difieren de ES-01 y HE-01 PM₁₀ 	

	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-03, CA-01 y HE-01 PM_{2.5} difieren de HE-01 PM₁₀ •AL-01 difiere de HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> • HE-01 PM₁₀ difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, SJ-06, BE-01, CA-01, AL-01 y HE-01 PM_{2.5}
As	-	-
Se	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-01, SJ-02, SJ-04, SJ-06 y CA-01 difieren de HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-03 difiere de AL-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-01, SJ-02, SJ-06 y CA-01 difieren de HE-01 PM₁₀
Mo	<ul style="list-style-type: none"> • HE-01 PM_{2.5} difiere de SJ-02, SJ-03, SJ-06, BE-01, CA-01, ES-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ •SJ-04 difiere de SJ-03 	<ul style="list-style-type: none"> • HE-01 PM_{2.5} difiere de SJ-02, SJ-03, SJ-04, SJ-06, BE-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀
Ag	-	<ul style="list-style-type: none"> •BE-01 difiere de SJ-01, SJ-02, SJ-03, SJ-04, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5}
Cd	-	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-01 difiere de HE-01 PM₁₀

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18 (Continuación). Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018

Sb	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-03 difiere de SJ-01, SJ-06, BE-01, AL-01, ES-01, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-02 difiere de SJ-01, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-04 difiere de CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} 	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-02 y SJ-04 difieren de SJ-01, CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5}
Ba	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-04 y BE-01 difieren de SJ-03, SJ-06, AL-01, CA-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-01 difiere de AL-01, CA-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-02 difiere de CA-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} 	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-04 difiere de SJ-01, SJ-03 y HE-01 PM₁₀ •BE-01, SJ-06 y HE-01 PM_{2.5} difieren de HE-01 PM₁₀
Hg	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-04 difiere de SJ-01, SJ-02, ES-01, CA-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-03 difiere de CA-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-06 difiere de AL-01 y HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> •HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} difieren de CA-01 y SJ-04

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18 (Continuación). Sitios de muestreo de la red manual de monitoreo cuya concentración promedio anual de metales difieren significativamente con un valor de confianza del 95 % para los años 2017 y 2018.

Metal	Sitios que difieren significativamente	
	2017	2018
Tl	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-02 difiere de HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} 	<ul style="list-style-type: none"> •SJ-02 difiere de SJ-01, SJ-04, SJ-06, CA-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5}
Pb	<ul style="list-style-type: none"> •CA-01 difiere de BE-01, AL-01, ES-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-04 difiere de HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-01, SJ-02 y SJ-03 difieren de HE-01 PM₁₀ 	<ul style="list-style-type: none"> •CA-01 difiere de BE-01, AL-01 y HE-01 PM₁₀ y PM_{2.5} •SJ-06 difiere de HE-01 PM₁₀

Fuente: Elaboración propia

Uno de los principales motivos por los cuales la concentración de metales entre sitios puede diferir, es la naturaleza de las actividades realizadas en el área circundante, las cuales afectan la cantidad de emisiones generadas así como su posible composición.

De esta manera se definen áreas urbanas, donde existe alta actividad comercial, así como un elevado nivel de tránsito vehicular. Dentro de esta categoría se hallan los sitios SJ-01, SJ-06, CA-01 y HE-01.

Luego están las áreas de transición ubicadas en lugares entre las zonas urbanas y residenciales. En estas la actividad comercial es ligeramente menor, pero por su cercanía con las zonas urbanas y al ser lugares de paso, aun existe un alto nivel de tránsito vehicular. En esta categoría se halla el sitio SJ-02.

Así mismo se definen las zonas residenciales las cuales se caracterizan por ser regiones habitacionales con una menor concentración de comercios y flujo vehicular. En esta categoría se hallan los sitios SJ-03, ES-01, BE-01 y AL-01.

Finalmente se definen las zonas industriales, que son aquellas donde predominan las actividades de carácter productivo industrial, tales como fábricas y centros de producción. El punto SJ-04 pertenece a esta categoría.

Además de analizar las diferencias entre medias por sitio, también surge el interés de conocer si existen por época estacional, es decir entre la época seca y la lluviosa.

En este caso se realiza un análisis de varianza para cada sitio y metal en ambos años, de manera que se pueda determinar si en cada uno de los lugares de muestreo de la red de monitoreo la concentración de cada metal varía significativamente entre ambas épocas.

En los Anexos 1 al 10 se muestran los cuadros con los resultados del análisis de varianza para cada uno de los sitios detalladamente, sin embargo el Cuadro 19 muestra un resumen de los resultados de los análisis de varianza para cada metal en cada sitio durante el 2017 y el 2018.

Cuadro 19. Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes			
		SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Be	2017	-	-	-	No
	2018	-	-	-	-
Na	2017	No	No	Sí	No
	2018	No	No	No	Sí

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes			
		SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Mg	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	Sí	No
Al	2017	No	Sí	Sí	Sí
	2018	No	Sí	Sí	No
K	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Ca	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Ti	2017	No	Sí	Sí	Sí
	2018	No	Sí	Sí	Sí
V	2017	Sí	Sí	No	No
	2018	No	No	No	No
Cr	2017	Sí	Sí	Sí	Sí
	2018	No	No	No	No
Mn	2017	No	Sí	Sí	Sí
	2018	No	No	No	No
Fe	2017	No	Sí	No	Sí
	2018	No	No	Sí	No
Co	2017	Sí	Sí	No	Sí
	2018	No	No	No	No
Ni	2017	Sí	No	No	No
	2018	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes			
		SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Cu	2017	Sí	No	Sí	No
	2018	No	No	No	No
Zn	2017	No	No	Sí	No
	2018	No	No	No	No
As	2017	-	No	No	No
	2018	-	-	-	No
Se	2017	No	No	Sí	No
	2018	No	No	No	-
Mo	2017	-	Sí	Sí	No
	2018	-	-	No	No
Ag	2017	-	No	No	No
	2018	-	No	No	Sí
Cd	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Sb	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Ba	2017	No	Sí	No	No
	2018	No	No	No	Sí
Hg	2017	Sí	No	No	Sí
	2018	No	No	No	No
Tl	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No

Pb	2017	Sí	No	No	No
	2018	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes			
		SJ-06	BE-01	CA-01	HE-01 PM _{2.5}
Be	2017	-	-	-	-
	2018	-	No	-	-
Na	2017	No	No	Sí	Sí
	2018	No	No	No	No
Mg	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Al	2017	Sí	No	No	No
	2018	Sí	No	Sí	No
K	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Ca	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Ti	2017	No	No	No	No
	2018	Sí	No	No	No
V	2017	No	Sí	Sí	Sí
	2018	No	Sí	No	Sí
Cr	2017	No	Sí	No	No
	2018	No	No	No	No
Mn	2017	No	No	No	No

	2018	No	No	No	No
Fe	2017	No	No	No	No
	2018	Sí	No	No	No
Co	2017	No	No	No	No
	2018	Sí	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes			
		SJ-06	BE-01	CA-01	HE-01 PM _{2.5}
Ni	2017	No	Sí	No	No
	2018	No	No	No	No
Cu	2017	No	Sí	Sí	Sí
	2018	No	No	No	No
Zn	2017	No	No	Sí	Sí
	2018	No	No	No	No
As	2017	-	-	-	-
	2018	-	-	-	-
Se	2017	No	No	Sí	No
	2018	No	-	No	No
Mo	2017	No	-	No	Sí
	2018	-	-	-	No
Ag	2017	-	-	-	-
	2018	-	No	No	No
Cd	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No

Sb	2017	No	Sí	No	Sí
	2018	No	No	No	No
Ba	2017	No	Sí	No	Sí
	2018	No	No	No	No
Hg	2017	No	Sí	No	No
	2018	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes			
		SJ-06	BE-01	CA-01	HE-01 PM _{2.5}
Tl	2017	No	No	No	No
	2018	No	No	No	No
Pb	2017	No	No	No	Sí
	2018	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes	
		HE-01 PM ₁₀	AL-01
Be	2017	-	-

	2018	-	-
Na	2017	Sí	No
	2018	Sí	No
Mg	2017	No	No
	2018	Sí	No
Al	2017	No	Sí
	2018	No	No
K	2017	Sí	No
	2018	No	No
Ca	2017	No	No
	2018	No	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes	
		HE-01 PM ₁₀	AL-01
Ti		No	Sí
		No	No
V		Sí	No
		No	Sí
Cr		Sí	No
		No	No
Mn		No	Sí
		No	No
Fe		No	Sí
		No	No
Co		Sí	No

	No	No
Ni	Sí	Sí
	Sí	Sí
Cu	Sí	Sí
	No	Sí
Zn	Sí	Sí
	Sí	No
As	No	No
	-	-
Se	No	No
	Sí	No

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19 (Continuación). Resumen del resultado de los análisis de varianza entre época seca y lluviosa para la concentración de metales por sitio analizados en los años 2017 y 2018.

Metal	Año	Medias estadísticamente diferentes	
		HE-01 PM ₁₀	AL-01
Mo		Sí	No
		No	-
Ag		-	-
		No	-
Cd		Sí	No
		No	No
Sb		Sí	No
		No	No
Ba		Sí	No
		No	No

Hg	No	No
	No	No
Tl	No	No
	No	No
Pb	Sí	Sí
	No	No

Fuente: Elaboración propia

Para la mayoría de los sitios en ambos años, no hay suficiente evidencia estadísticamente significativas para afirmar que la concentración de los metales entre época seca y época lluviosa difieran. Solamente el sitio HE-01 para PM₁₀ muestra una mayoría de metales donde sí hay diferencias significativas en el año 2017, y aun en este sitio, dicha condición se revierte en el 2018.

Si bien, para la mayoría de los metales la concentración no varía entre épocas, no es el caso para todos ellos. Algunos como el cobre, cromo, vanadio, zinc y aluminio sí presentan diferencias significativas en su concentración entre épocas climáticas para la mayoría de los sitios monitoreados durante el año 2017, sin embargo, durante el 2018 esta misma situación no se repite para los mismos metales, de manera que no es posible afirmar que esta sea una condición recurrente o común para los mismos.

Factores de enriquecimiento

Existe particular interés en conocer la concentración y sobre todo el origen de los metales hallados en muestras de partículas suspendidas en el aire. La razón de esto se debe a que gracias al avance tecnológico y con ello el incremento en el consumo y producción de bienes, las emisiones generadas en estos procesos y otra actividades

humanas podrían estar cambiando la composición y distribución de las partículas suspendidas en el aire.⁷⁸

Los factores de enriquecimiento consisten en calcular la relación entre la concentración de un metal de interés con respecto a un metal de referencia en el aire, y comparar dicho resultado con la misma relación de metales en el suelo, y se calcula mediante la siguiente ecuación.⁷⁸

$$FE = \frac{(X/R)_{\text{aire}}}{(X/R)_{\text{suelo}}} \quad (5)$$

Donde,

FE: Factor de enriquecimiento

X: concentración del metal de interés

R: concentración del metal de referencia

Así los factores de enriquecimiento constituyen una herramienta sencilla para determinar si la concentración del metal en el aire se debe estrictamente a la suspensión de partículas provenientes del suelo, o si por el contrario podría haber influencia de alguna fuente antropogénica.⁷⁸

La interpretación del resultado es la siguiente. Si la relación expresada por el factor de enriquecimiento es cercana a la unidad, esto quiere decir que es muy probable que la fuente de dicho metal en el aire sea la suspensión de partículas del suelo por causas naturales.

Sin embargo cuando se aleja de la unidad no siempre es posible determinar con certeza que la causa del incremento de la concentración de la especie de interés en el aire se deba a causas antropogénicas, debido a que existe una diferencia entre la

⁷⁸ Duce, R. (1975). *Atmospheric Traces Metals at Remote Northern and Southern Hemisphere Sites: Pollution or Natural?*. Science (187): p. 59-61.

concentración promedio de los metales en la corteza terrestre, y la concentración real en distintas regiones. Por este motivo los valores comprendidos entre 1 y 10 para el factor de enriquecimiento se consideran también de origen natural.⁷⁹

Los metales utilizados como referencia para el cálculo del factor de enriquecimiento suelen ser aquellos que se hallan en abundancia en la corteza y se ven poco afectados por la contaminación. Es por este motivo que para efectos de este estudio, se escoge el hierro como metal de referencia pues es un metal abundante y en Costa Rica no hay industrias dedicadas a la extracción y procesamiento de este metal, que puedan afectar la concentración del mismo en el aire, de manera que tampoco se ve afectado significativamente por fuentes de contaminación.

Para el cálculo de los factores de emisión se utilizó como referencia la composición crustal continental superior reportada por Taylor & McLennan (1985) y recopilada y actualizada por Rudnick & Gao (2003) cuyas tablas se muestran en los Anexos 11 y 12.^{80,81}

Los cuadros 20 y 21 muestra los resultados obtenidos para el factor de enriquecimiento de los metales estudiados para los distintos sitios de la red de monitoreo en los años 2017 y 2018.

Cuadro 20. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas de los sitios de muestreo de la red de monitoreo para el año 2017.

Metales

Factor de enriquecimiento

⁷⁹ Duce, R. (1975). *Atmospheric Traces Metals at Remote Northern and Southern Hemisphere Sites: Pollution or Natural?*. Science (187): p. 59-61.

⁸⁰ Taylor, S. & McLennan, S. (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell.

⁸¹ Rudnick, R. & Gao, S. (2003). *Composition of Continental Crust*. *Treatise on Geochemistry* (4): p. 1-51

	SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Na	8,54	8,71	4,38	7,66
Mg	2,08	1,98	0,96	1,57
Al	0,60	0,58	0,29	0,43
K	0,57	0,51	0,29	0,42
Ca	2,66	2,41	1,23	1,76
Ti	0,66	0,65	0,33	0,56
V	2,88	2,54	1,72	2,67
Cr	4,33	4,20	2,39	13,24
Mn	0,90	0,79	0,46	1,80
Co	0,89	0,77	0,42	0,71
Ni	3,59	3,22	2,48	3,47
Cu	47,63	75,59	75,58	70,57
Zn	41,52	32,72	20,24	25,78
Se	693,05	543,12	263,17	476,28
Mo	ND	100,76	63,73	254,51
Cd	94,56	256,82	116,68	41,14
Ba	3,39	2,72	1,41	2,53
Hg	306,73	249,57	241,64	339,77
Tl	1,56	1,77	0,88	0,97
Pb	20,69	17,60	9,83	12,77

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 20 (Continuación). Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas de los sitios de muestreo de la red de monitoreo para el año 2017.

Metales	Factor de enriquecimiento			
	SJ-06	ES-01	BE-01	CA-01
Na	13,08	7,23	4,32	9,65

Informe de Calidad del Aire – Área Metropolitana de Costa Rica

Mg	3,10	1,93	1,09	2,51
Al	0,65	0,44	0,57	0,45
K	0,74	0,40	0,39	0,59
Ca	3,68	1,83	1,38	2,84
Ti	0,78	0,51	0,62	0,43
V	14,46	1,16	4,50	1,49
Cr	3,96	7,21	3,30	3,92
Mn	1,03	0,74	0,86	0,74
Co	1,23	0,54	0,70	0,59
Ni	18,17	1,89	3,76	2,26
Cu	162,53	85,09	53,68	77,41
Zn	74,09	17,66	26,97	28,23
Se	1429,56	374,65	269,73	664,86
Mo	229,02	89,59	128,55	111,12
Cd	132,64	108,94	56,25	47,39
Ba	3,69	1,44	2,57	1,61
Hg	659,35	152,31	229,91	149,92
Tl	2,60	1,34	0,91	0,90
Pb	22,94	7,53	7,87	22,95

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 20 (Continuación). Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas de los sitios de muestreo de la red de monitoreo para el año 2017.

Metales	Factor de enriquecimiento		
	HE-01 PM₁₀	HE-01 PM_{2,5}	AL-01
Na	6,89	11,50	12,00
Mg	1,54	2,84	2,64
Al	0,52	0,50	0,71
K	0,49	0,53	0,87
Ca	1,79	2,58	2,97
Ti	0,77	0,63	0,88
V	1,17	2,01	7,74
Cr	2,54	5,33	4,86
Mn	1,02	0,85	1,22
Co	0,78	0,82	1,07
Ni	1,91	2,89	7,53
Cu	351,45	1102,84	70,92
Zn	25,89	36,53	36,87
Se	155,80	366,26	586,70
Mo	224,39	780,68	104,11
Cd	46,79	59,73	113,13
Ba	2,62	2,06	2,53
Hg	204,70	222,50	150,64
Tl	0,15	0,87	1,16
Pb	6,69	9,36	11,89

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 21. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas de los sitios de muestreo de la red de monitoreo para el año 2018.

Metales	Factor de enriquecimiento			
	SJ-01	SJ-02	SJ-03	SJ-04
Na	7,69	11,52	9,35	5,10
Mg	1,34	1,66	1,44	0,95
Al	0,54	0,53	0,47	0,46
K	0,57	0,66	0,63	0,50
Ca	2,26	2,71	2,33	1,41
Ti	0,63	0,64	0,55	0,51
V	3,06	3,39	4,70	2,44
Cr	2,68	4,08	3,32	3,13
Mn	0,91	1,04	0,97	0,91
Co	1,06	1,34	1,21	0,85
Ni	21,09	4,46	4,78	4,54
Cu	44,20	89,30	149,20	87,76
Zn	36,65	51,92	42,05	27,19
Se	668,19	809,48	860,51	ND
Mo	ND	120,36	152,71	79,77
Cd	154,90	129,04	150,09	48,77
Ba	2,05	3,21	2,58	2,36
Hg	129,65	125,26	121,44	49,57
Tl	4,14	19,00	11,67	2,10
Pb	19,75	27,71	29,10	11,75

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 21 (Continuación). Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas de los sitios de muestreo de la red de monitoreo para el año 2018.

Metales	Factor de enriquecimiento		
	SJ-06	BE-01	CA-01
Na	9,91	5,94	6,73
Mg	2,75	0,92	1,41
Al	0,84	0,55	0,56
K	0,56	0,48	0,47
Ca	3,48	1,60	2,23
Ti	0,81	0,68	0,64
V	5,71	4,87	1,60
Cr	2,89	2,27	2,29
Mn	0,89	0,95	0,89
Co	0,81	1,05	0,80
Ni	4,81	11,71	2,77
Cu	85,50	91,78	70,95
Zn	43,92	33,22	25,80
Se	603,14	ND	476,83
Mo	146,39	139,86	ND
Cd	85,16	81,46	84,10
Ba	3,27	2,28	2,08
Hg	124,61	98,28	58,04
Tl	1,49	5,39	1,28
Pb	35,69	10,57	29,35

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 21 (Continuación). Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas de los sitios de muestreo de la red de monitoreo para el año 2018.

Metales	Factor de enriquecimiento		
	HE-01 PM₁₀	HE-01 PM_{2.5}	AL-01
Na	5,59	55,51	11,72
Mg	1,58	14,47	2,99
Al	0,53	0,79	0,83
K	0,36	2,60	0,69
Ca	1,71	10,34	3,58
Ti	0,60	0,81	0,78
V	1,16	1,90	8,43
Cr	3,07	3,58	3,20
Mn	0,73	0,87	1,04
Co	0,76	1,09	1,00
Ni	2,50	2,98	8,13
Cu	717,02	1739,33	57,30
Zn	24,58	36,36	43,90
Se	78,75	266,35	345,11
Mo	416,67	1083,53	186,91
Cd	30,25	128,48	69,36
Ba	3,23	3,39	3,57

Hg	400,88	178,15	167,02
Tl	0,38	1,27	1,73
Pb	5,75	13,56	15,15

Fuente: Elaboración propia

De los cuadros anteriores se obtiene que para el año 2017 los metales en orden decreciente según sus factores de enriquecimiento son: Se > Hg > Mo > Cu > Cd > Zn > Pb > Na > Cr > Ni > V > Ba > Ca > Mg > Tl > Mn > Co > Ti > K > Al.

De estos, desde el plomo hasta el selenio, presentan valores en el rango de 10 a 550 lo que indica que la concentración de estos metales en las partículas suspendidas es enriquecida por fuentes antropogénicas como combustión de hidrocarburos, emisiones industriales, tráfico vehicular, etc.

De igual manera para el año 2018 se tiene que los metales en orden decreciente según sus factores de enriquecimiento son: Se > Cu > Mo > Hg > Cd > Zn > Pb > Na > Ni > Tl > V > Ca > Cr > Mg > Ba > Co > Mn > K > Ti > Al.

En este caso, desde el sodio hasta la selenio presentan valores en el rango de 10 a 520 indicando que para los mismos, la concentración de metales en las partículas se debe a causas no crustales como las antes mencionadas.

Red Pasiva

En el cantón de San José funciona la más amplia y antigua red de monitoreo pasivo de dióxido de nitrógeno en el país. Esta red tiene como propósito identificar los “puntos calientes” dentro del casco central donde existe una alta afluencia vehicular. En el Cuadro 22 se muestra la evolución de los promedios anuales en el periodo 2011-2018.

Cuadro 22. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno obtenidos en el cantón de San José durante el periodo 2011-2018.

Sitio de muestra	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018
SJN-01	55	59	65	63	65	71	75	69
SJN-02	43	46	56	51	50	57	57	57
SJN-03	42	44	54	58	54	64	66	62
SJN-04	29	31	37	39	40	41	47	47
SJN-05	21	23	37	31	32	33	35	33
SJN-06	29	31	43	43	43	47	47	48
SJN-07	26	25	31	29	27	29	35	29
SJN-08	23	21	23	28	28	31	36	31
SJN-09	19	17	31	26	29	30	38	31
SJN-10	40	42	47	45	47	52	53	57
SJN-11	26	28	50	34	38	48	52	41
SJN-12	29	32	34	34	35	38	41	39

Sitio de muestra	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018
SJN-13				32	29	35	39	33
SJN-14				34	33	36	38	36
SJN-15				20	19	23	25	19
SJN-17				21	18	21	25	19
SJN-16				36	37	40	45	35
SJN-18				32	31	39	47	37
SJN-19				28	29	33	36	30
SJN-20				44	33	38	41	34
SJN-21	41	40	44	42	43	50	49	48
SJN-22	26	28	30	30	29	33	36	31
SJN-23				30	30	33	35	31

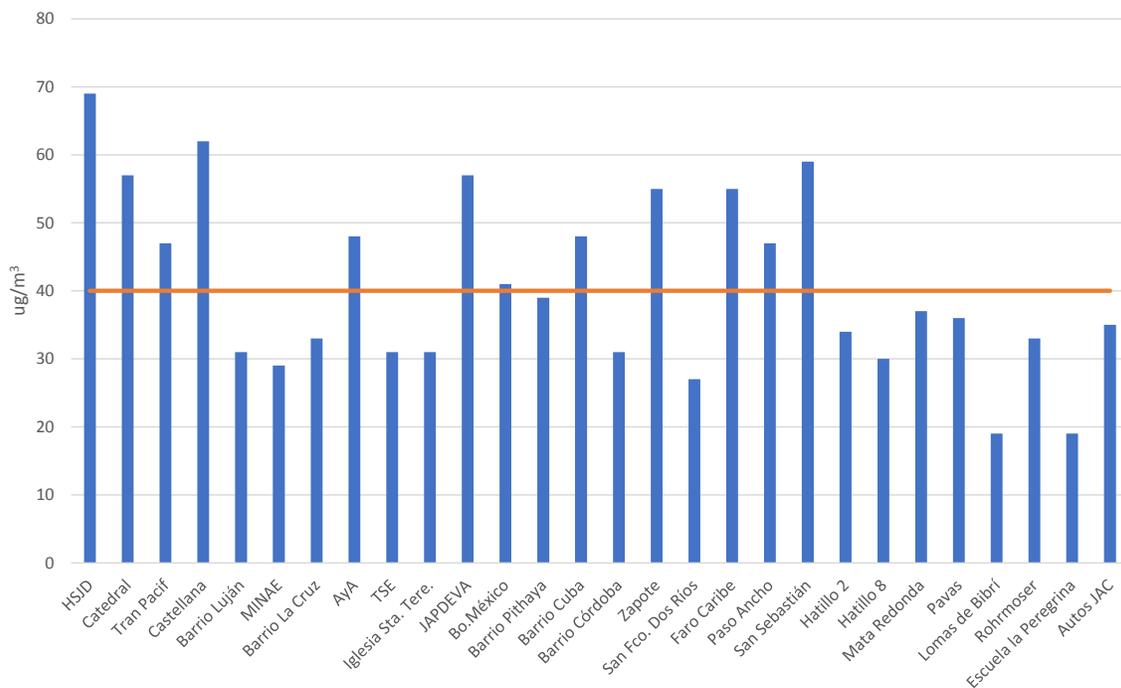
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 22 (Continuación). Promedios anuales de dióxido de nitrógeno obtenidos en el cantón de San José durante el periodo 2011-2018.

Sitio de muestra	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018
SJN-24				47	45	50	58	55
SJN-25				27	27	30	33	27
SJN-26				46	46	56	56	55
SJN-27				41	38	42	47	47
SJN-28				51	55	61	59	59

Fuente: Elaboración propia

Al 2018 cerca de un 40% de los sitios de monitoreo de NO₂ presentan un incumplimiento con el criterio anual de la OMS situado en 40 µg/m³. De todos estos, 9 llevan 5 años consecutivos presentando valores superiores a este criterio, y 5 llevan 8 años consecutivos bajo esta misma condición. Estos últimos son los sitios localizados en: Hospital San Juan de Dios (SJN-01), Catedral Metropolitana (SJN-02), Bomba La Castellana (SJN-03), JAPDEVA (SJN-10) y Barrio Cuba (SJN-21). Como se puede apreciar en la Figura 23 los valores más altos se siguen encontrando en las inmediaciones del Hospital San Juan de Dios (HSJD), un sitio con alto tránsito vehicular al estar frente a una arteria principal del sistema de transporte del centro de San José (Avenida Segunda). Sobre esta misma avenida está otro punto con altas concentraciones localizado frente a La Catedral Metropolitana. Las diferencias entre ambos puntos podrían deberse a que cerca del HSJD hay mayor congestión por la constricción que se da en ese punto por el cambio en la dirección de la avenida.

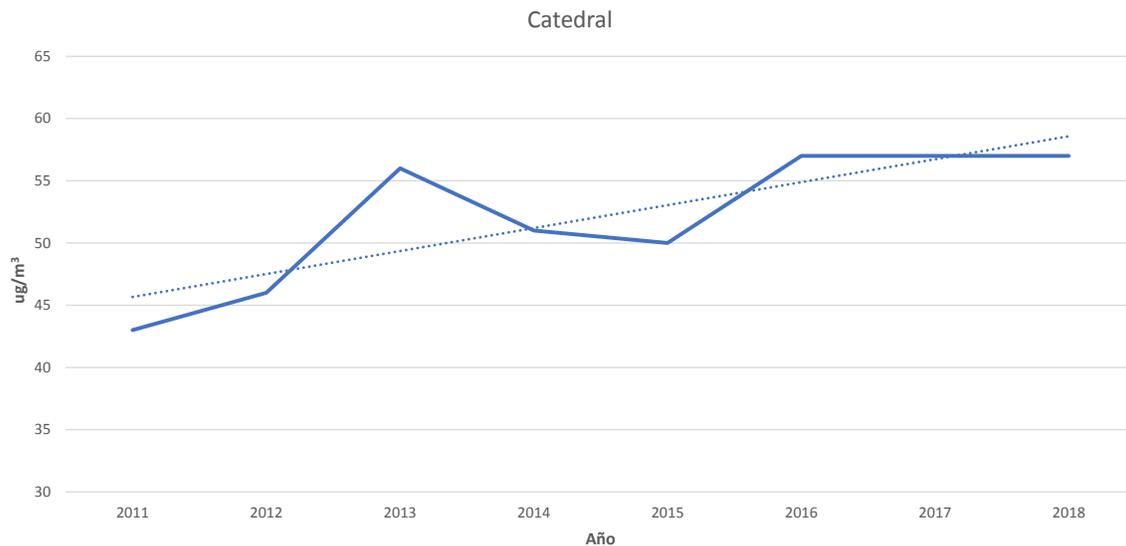


Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Concentración de NO₂ en los distintos sitios de la red pasiva, año 2018

Otros sitios que también presentaron niveles altos de NO₂, como AyA (SJN-06), JAPDEVA (SJN-10), San Sebastián (SJN-28) y San Francisco de Dos Ríos (SJN-25), se ubican frente a vías principales de acceso al casco central.

Analizando los promedios anuales de los últimos años se encontró una tendencia hacia el aumento, a una tasa anual promedio de aproximadamente 4%. Con sitios que alcanzan valores de crecimiento promedio cercanos al 11% anual como el Costado sur parque de Barrio México (SJN-11) y el Costado sur edificio Tribunal Supremo de Elecciones (SJN-09), y otros con tasas moderadas como lo es Catedral Metropolitana (SJN-01). La Figura 24 muestra estas tendencias.



Fuente: Elaboración propia

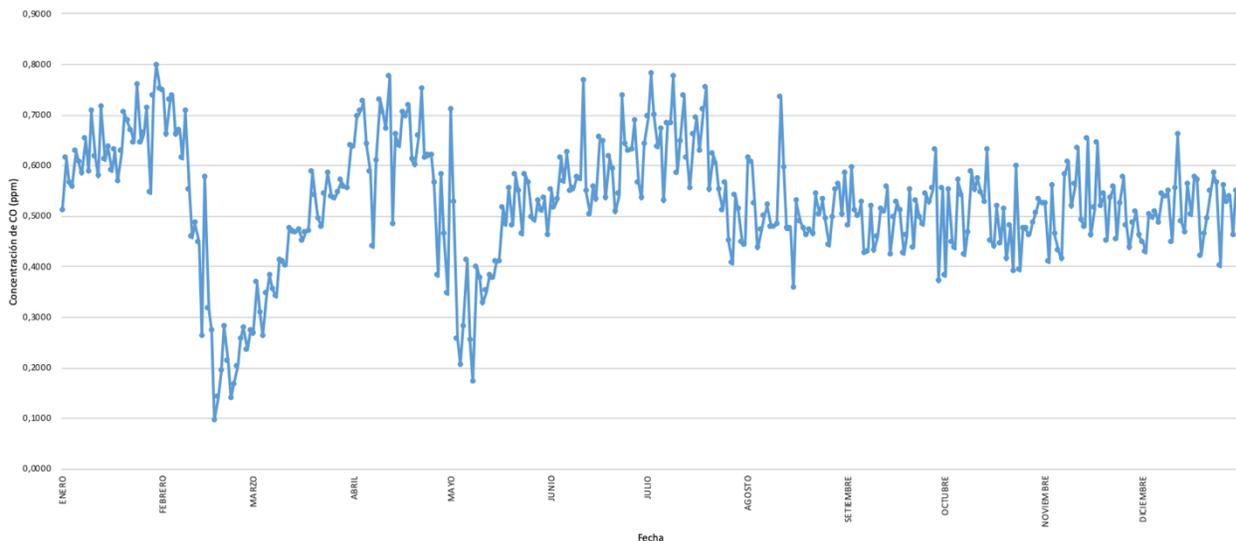
Figura 24. Evolución de los promedios anuales de NO₂ en Catedral Metropolitana, periodo 2011-2018.

Red automática

Monóxido de Carbono

La estación SJ-03 se encuentra ubicada en el centro de reciclaje de la municipalidad de San José, localizado en el distrito de Hatillo desde el 8 de abril del 2017, por este motivo no se cuenta con la totalidad de los datos de monóxido de carbono para ese año. El reglamento establece que para que un año sea considerado como válido, debe cumplir con el requisito de contar con al menos el 75% de los datos anuales, es decir con 274 de los 365 datos. Para este sitio el requisito no se cumple, pues en el 2017 solo se cuenta con 268 datos válidos. Aún así, los valores diarios sí cumplen con el mínimo de 75% de los valores horarios para todas las fechas muestreadas. Ninguno de los promedios horarios y de 8 horas medidos superan los límites máximos establecidos en el reglamento. De igual manera, el quinto máximo anual obtenido con los datos válidos para este año es 0,95 ppm.

Para el año 2018 en este mismo sitio, los datos obtenidos por la estación automática para monóxido de carbono cumplen en su totalidad con los requisitos establecidos en el reglamento. No se superan los límites máximos establecidos estando las

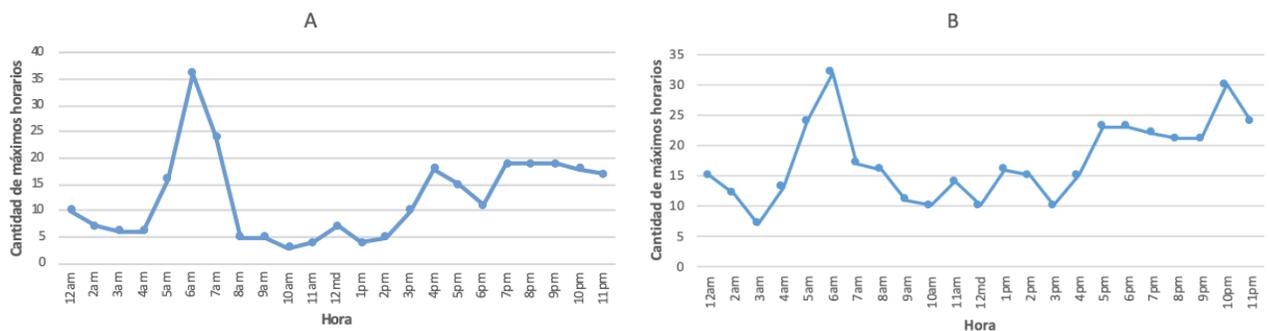


concentraciones muy por debajo de lo permitido tal como se muestra en la Figura 25. El quinto máximo anual para este año es de 1,13 ppm.

Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Concentración promedio diaria de CO en la estación de Hatillo (SJ-03) para el año 2018.

Por otro lado la Figuras 26 muestra la cantidad de concentraciones máximas horarias de CO para ambos años y resulta evidente de los patrones observados que la mayor cantidad de máximos se alcanza en horas de la mañana con el pico máximo a las 6am. En ambos casos la cantidad de máximos disminuye hacia el medio día, para incrementar nuevamente en horas de la tarde – noche. Este comportamiento coincide en los incrementos con los rangos horarios de mayor tránsito vehicular, lo cual es esperable, ya que el CO es un subproducto de la combustión incompleta de combustibles fósiles.



Fuente: Elaboración propia

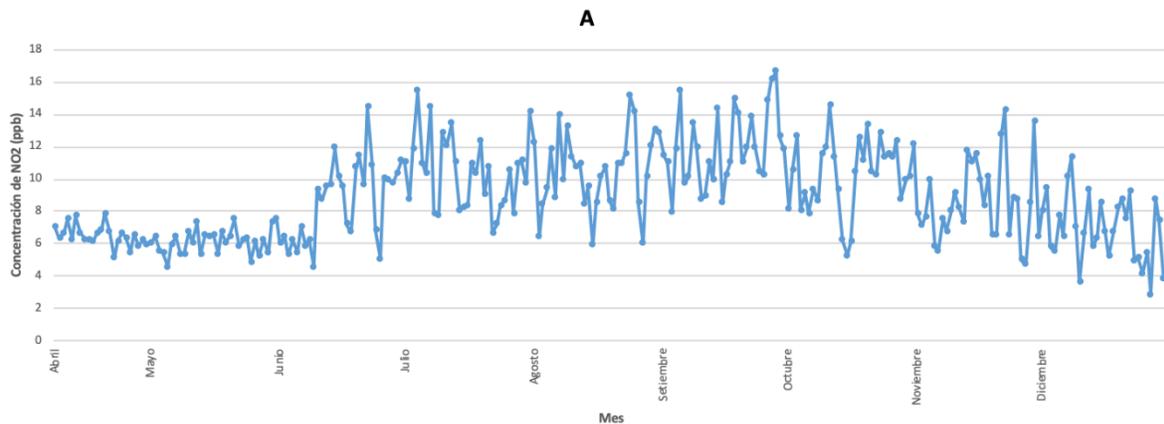
Figura 26. Cantidad de concentraciones máximas de CO por hora para el 2017 (A) y 2018 (B) en la estación de Hatillo (SJ-03).

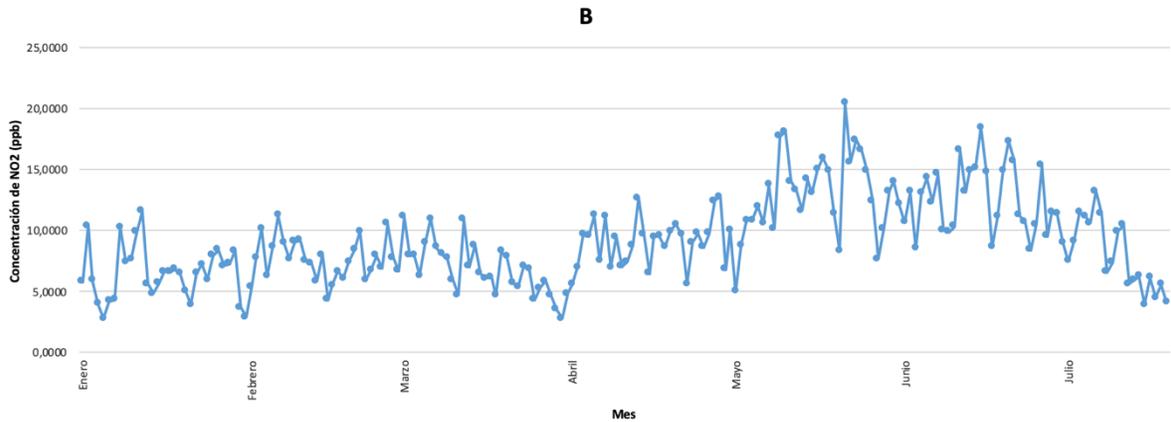
Dióxido de nitrógeno

En la estación SJ-03 se mide la concentración de dióxido de nitrógeno. Para el año 2017 como se comentó en el apartado de monóxido de carbono no se cuenta con la totalidad de los datos requeridos para validar el año debido a la fecha de inicio de monitoreo en este sitio, sin embargo, los días registrados cumplen con el mínimo de 75% de los valores horarios para todas las fechas muestreadas.

Así mismo los valores horarios medidos por la estación no superan los límites máximos de 1 hora y anual. Igualmente el quinto máximo anual obtenido con los datos con los que se cuenta para este año es de 15,13 ppb.

Para el año 2018 en este mismo sitio, los datos obtenidos por la estación automática para dióxido de nitrógeno cumplen con los requisitos establecidos en el reglamento, en tanto no supera los límites máximos, estando las concentraciones muy por debajo de lo permitido tal como se muestra en la Figura 27 . El quinto máximo anual para este año es de 17,44 ppb.

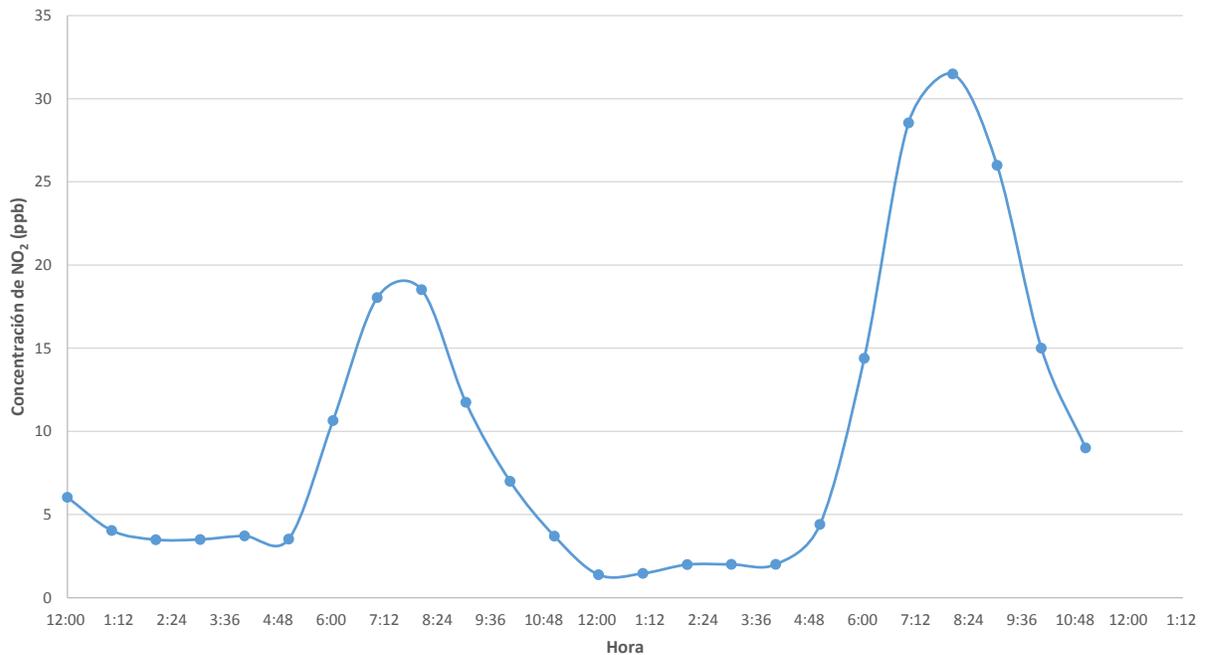




Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Variación de la concentración promedio de dióxido de nitrógeno durante el año 2017 (A) y 2018 (B).

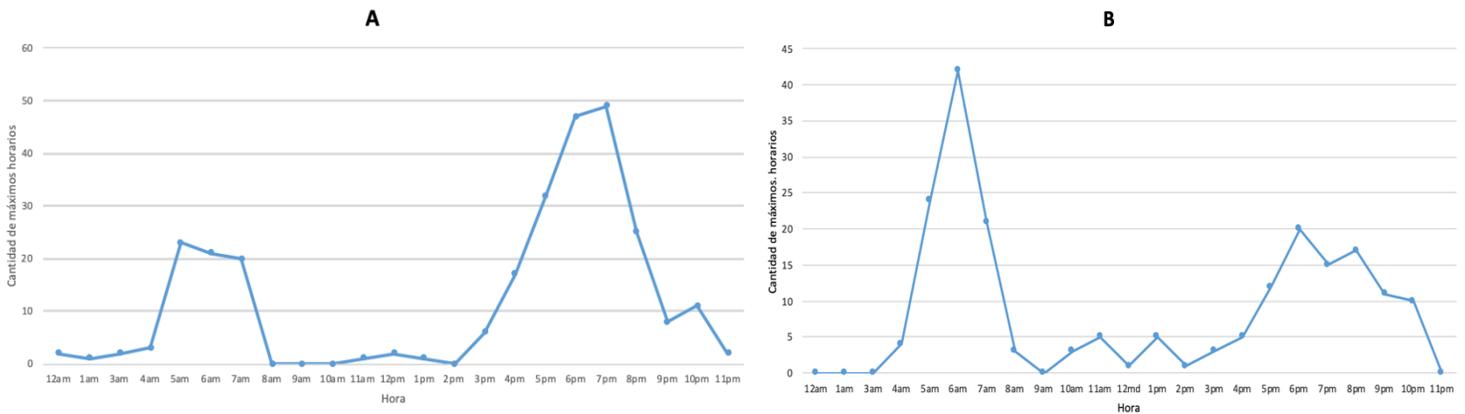
El dióxido de nitrógeno es un gas que se deriva principalmente de las emisiones de combustión de los autos, por lo cual es de esperar que exista una variación o perfil horario asociado a las horas de más tránsito. La Figura 28 muestra el comportamiento típico de NO₂ durante un día entre semana.



Fuente: Elaboración propia

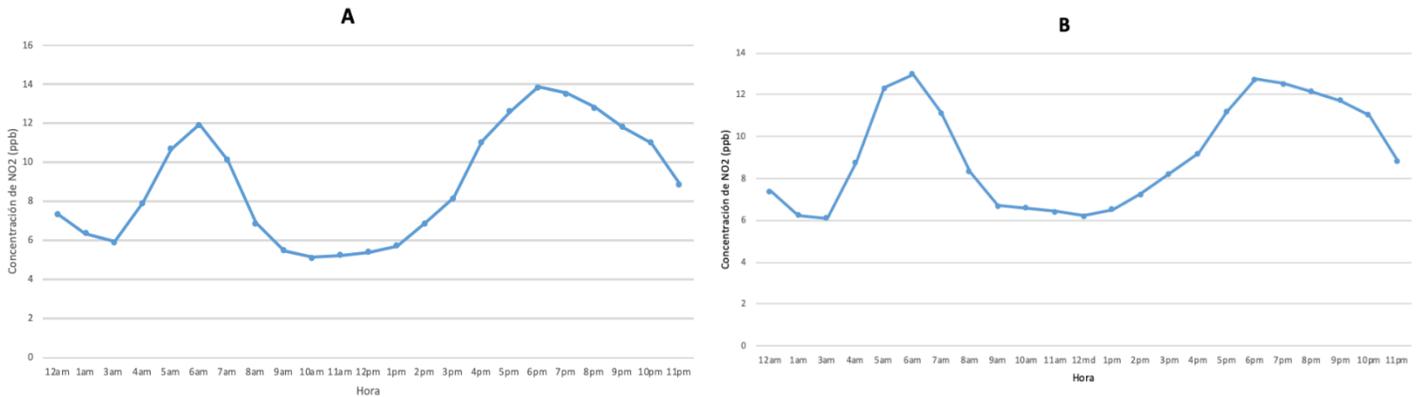
Figura 28. Comportamiento típico de las concentraciones de NO₂ durante un día entre semana.

Si se observa la cantidad de valores máximos por hora registrados para la estación de Hatillo (SJ-03) en ambos años (Figura 29) así como las concentraciones promedio horarias anuales (Figura 30) se puede apreciar que para ambos años existe una concordancia con el comportamiento esperado para la concentración de NO₂, con dos picos bien definidos uno en horas de la mañana entre las 5am y las 7am, y otro en horas de la tarde – noche entre las 5pm y las 10pm.



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Cantidad de concentraciones máximas de NO₂ por hora para el 2017 (A) y 2018 (B) en la estación de Hatillo (SJ-03).



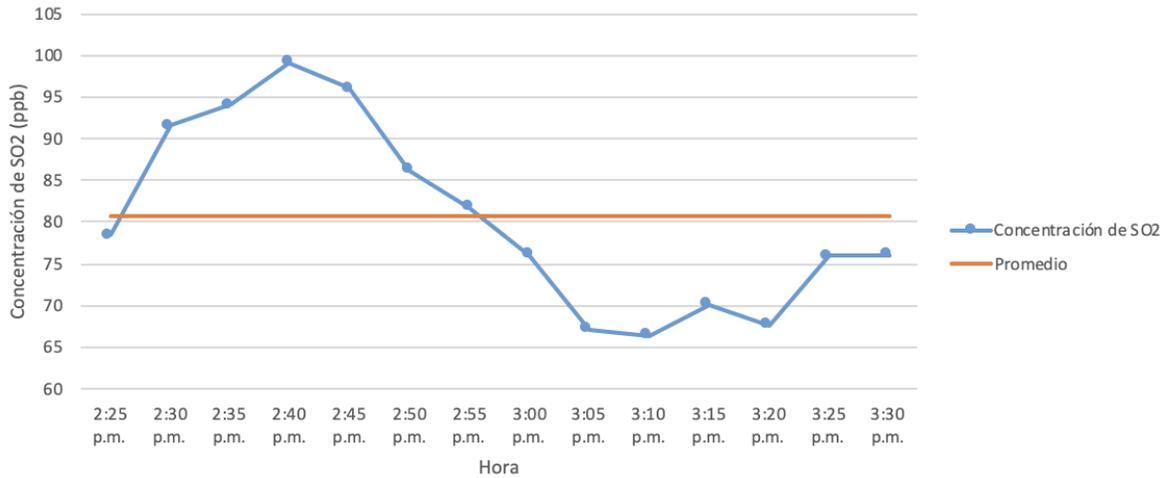
Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Concentraciones promedio de NO₂ horarias para el 2017 (A) y 2018 (B) en la estación de Hatillo (SJ-03).

Dióxido de azufre

Para SO₂ en la estación de Hatillo (SJ-03) en el año 2017 ocurre lo mismo que para CO y NO₂, al instalarse la estación a partir de abril, se cuenta con 268 datos de los 274 requeridos por el reglamento para validar el año. Aún así todos los días muestreados cuentan con el 75% mínimo diario requerido.

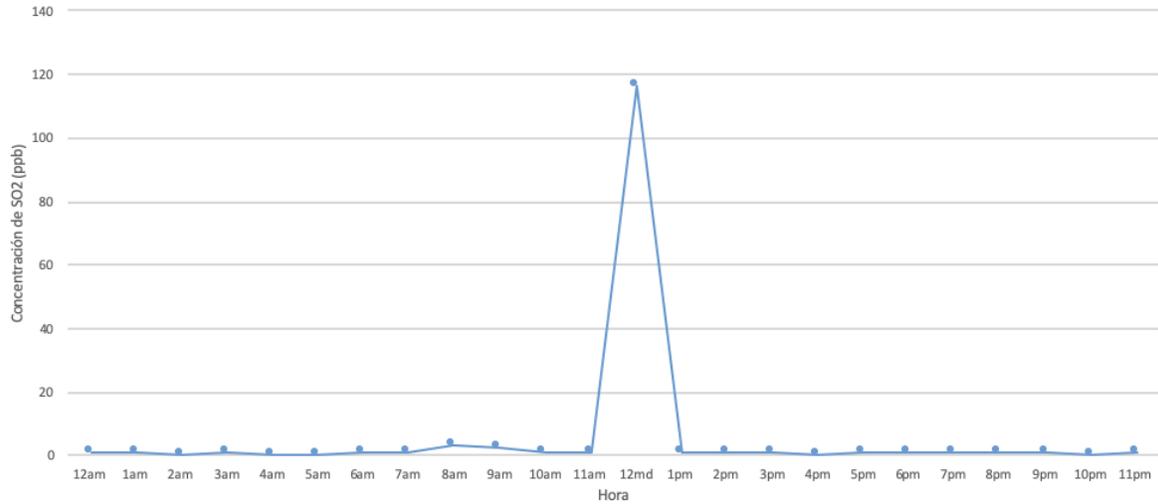
En cuanto al cumplimiento de los valores horarios, el reglamento de calidad del aire establece que el límite máximo para una hora es de 75 ppb. En el 2017 este límite se sobrepasó en dos ocasiones. Una de ellas fue el 13 de abril el cual coincide con una de las principales erupciones del Volcán Poás. Entre las 2:30pm y 3:30pm se obtuvo una concentración promedio de 81 ppb, con un pico máximo de 99,1 ppb tal como se observa en la Figura 31 para la concentración de SO₂ en el rango horario del pico observado.



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Concentración de SO₂ horaria para el día 13 de abril de 2017 en la estación de Hatillo (SJ-03).

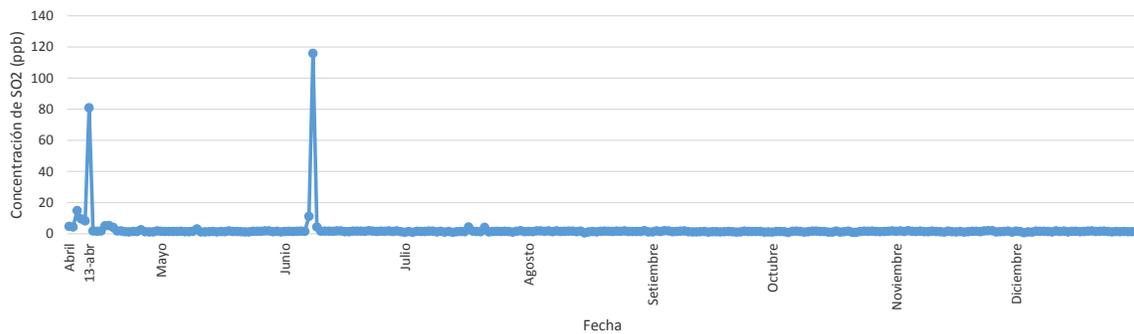
El segundo incumplimiento ocurrió el 8 de junio donde se obtuvo un valor promedio de 116 ppb entre las 11am y 12pm, el cual está relacionado con la actividad eruptiva del Volcán Turrialba que se dio alrededor de esas fechas. La Figura 32 muestra las concentraciones horarias de SO₂ para el 8 de junio, donde se observa con claridad el pico en cuestión.



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Concentración de SO₂ horaria para el día 8 de junio de 2017 en la estación de Hatillo (SJ-03).

La Figura 33 muestra la cronología de estos eventos para el año 2017 y en ella se aprecian claramente ambos eventos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Variación de la concentración promedio diaria de SO₂ en la estación de Hatillo (SJ-03) para el año 2017.

Finalmente para el año 2017 el quinto máximo anual observado corresponde a 5,37 ppb, valor claramente inferior a los límites establecidos por el reglamento. Cabe mencionar que al contabilizar el quinto máximo anual, no se consideran los valores de los picos debido a erupción, pues aunque son datos válidos, los mismos representan eventos no predecibles de carácter temporal y que no son representativos de la actividad volcánica anual.

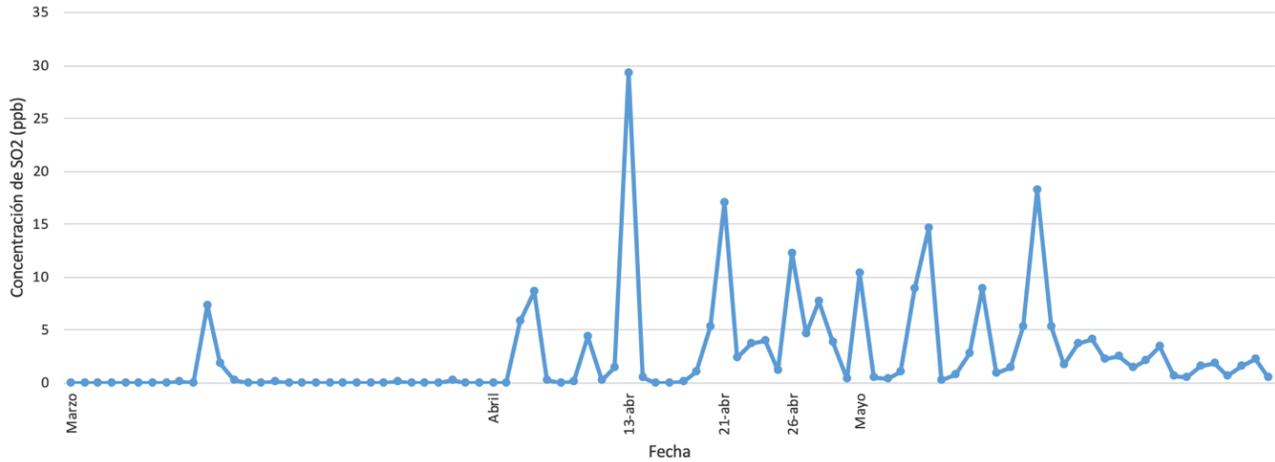
Para el año 2018 en la estación de Hatillo (SJ-03) no se observaron incumplimientos con la norma horaria, las concentraciones se mantuvieron por debajo de los límites para SO₂ y el quinto máximo anual para este año corresponde a 6,80 ppb.

Aunque en este año también se presentaron algunos eventos volcánicos tanto en el volcán Poás como en el Turrialba, no se registraron incrementos significativos de la concentración de SO₂ a lo largo del año.

La otra estación que monitorea SO₂ corresponde a la estación de Coronado (CO-01), donde durante el 2017 se cumplieron los requisitos establecidos en el reglamento, ya que las concentraciones horarias y los promedios móviles se hallaron por debajo de los límites establecidos. Además para este año el quinto máximo anual corresponde a 10,07 ppb.

En lo referente a los eventos volcánicos de este año, el principal evento correspondiente a la erupción del volcán Poás generó 3 picos importantes siendo el más significativo el observado el 13 de abril con un promedio máximo diario de 29,33 ppb, seguido del 21 de abril (16,97 ppb) y 26 de abril (12,23 ppb). La Figura 34 muestra los picos en cuestión.

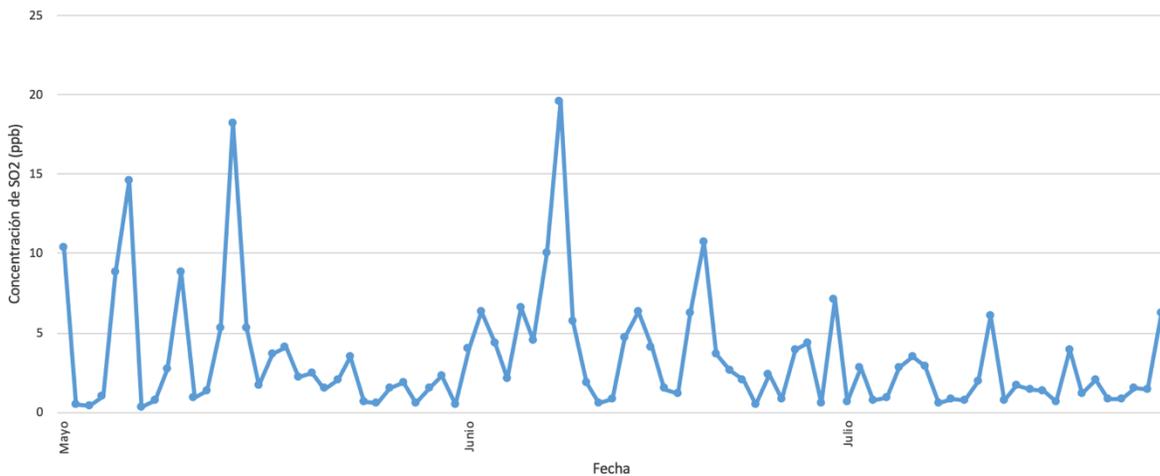
De igual manera el volcán Turrialba registró dos erupciones, una a finales de mayo y otra a finales de setiembre y principios de octubre.



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Variación de la concentración promedio máxima diaria de SO₂ en la estación de Coronado (CO-01) durante el mes de abril del año 2017.

Para la primera, se aprecia un pico de 19,60 ppb el 8 de junio, unos pocos días después de la erupción, tal como se observa en la Figura 35.



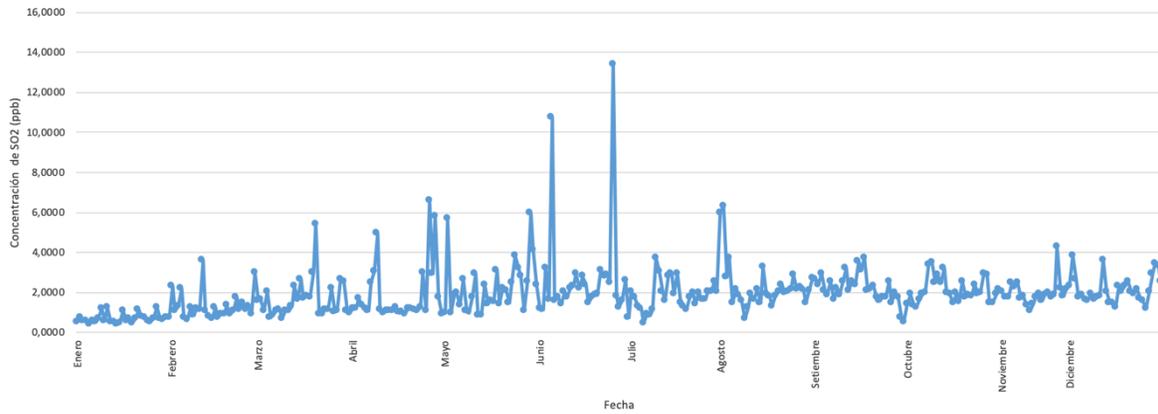
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Variación de la concentración promedio máxima diaria de SO₂ en la estación de Coronado (CO-01) durante los meses de mayo y junio para el año 2017.

En cuanto a la segunda erupción, no se detecta un incremento significativo en la concentración de SO₂ durante los meses de setiembre y octubre que es cuando la misma ocurre. Esto puede deberse a distintos factores meteorológicos como la dirección del viento con respecto a la ubicación de la estación, las precipitaciones entre otros factores.

Finalmente para el SO₂ en la estación de Coronado durante el 2018, no se observan incumplimientos de la norma, los valores horarios y los promedios móviles se hallan por debajo de los límites establecidos y el quinto máximo anual para este año corresponde a 6,00 ppb.

En lo referente a los eventos volcánicos, en este año se registran dos importantes. Uno del Turrialba a inicios de mayo y otro del Poás a inicios de octubre. De este último no se detectan picos ni variaciones significativas de la concentración de SO₂ en la estación, sin embargo de la erupción del Turrialba, si se observa la Figura 36 resulta evidente que los picos más grandes se obtienen en las fechas cercanas a esta erupción, alcanzando los 10,77 ppb a inicos de junio, aunque esto ocurre casi 2 semanas posterior a la erupción y sin rebasar el límite permitido por el reglamento.

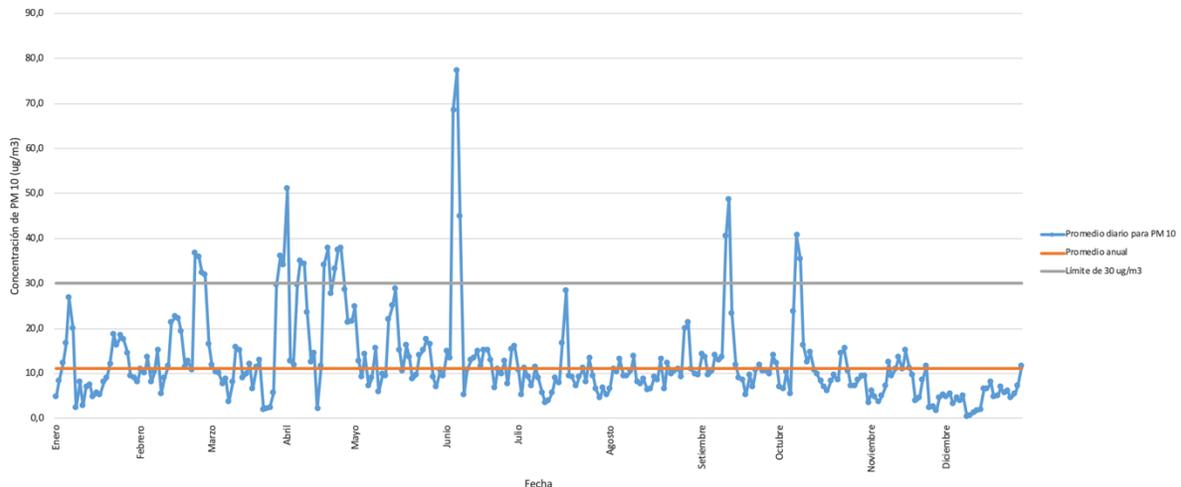


Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Variación de la concentración promedio máxima diaria de SO₂ en la estación de Coronado (CO-01) durante el año 2018.

Partículas PM₁₀

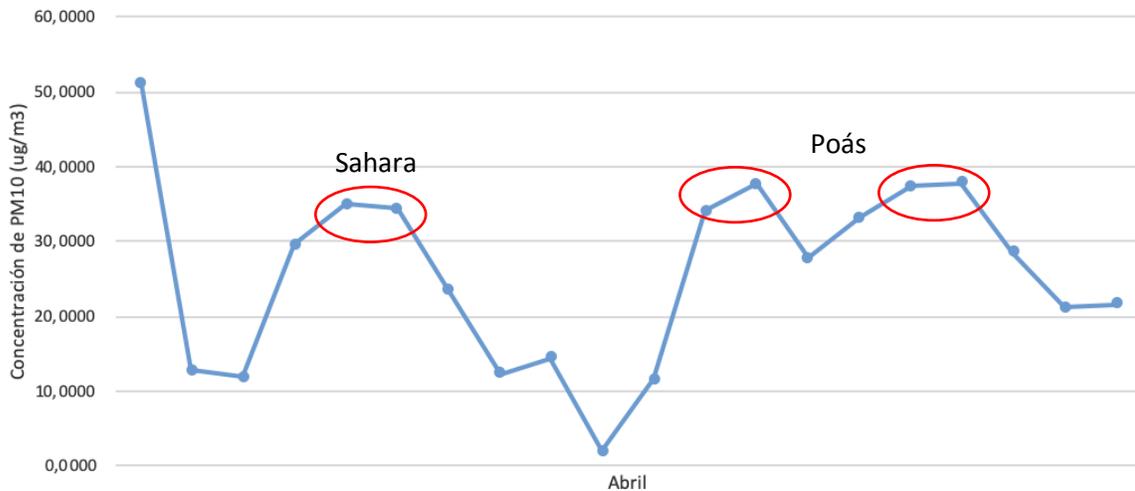
En la estación de Coronado (CO-01) durante el año 2017 no se observó un incumplimiento con respecto a la norma de 24 horas y anual, cuyo promedio fue de 11,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hallándose por debajo del límite de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en el reglamento. En la Figura 37 se aprecia el comportamiento que tuvieron las concentraciones para el año 2017, donde se muestran distintos picos, los cuales están asociados a la actividad volcánica y otros atribuidos a variaciones de las fuentes de emisión local cercanas al sitio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para el año 2017.

En lo referente a los eventos volcánicos del 2017, del 10 al 24 de abril se presenta la erupción del volcán Poás, cuyo evento principal ocurre el 13. La Figura 38 muestra la concentración de PM₁₀ para este mes y puede observarse, como se señala en las áreas marcadas, que entre el 23 y el 27 de abril, justo después de la erupción, se presenta un pico en la concentración con un máximo de 37,88 µg/m³.

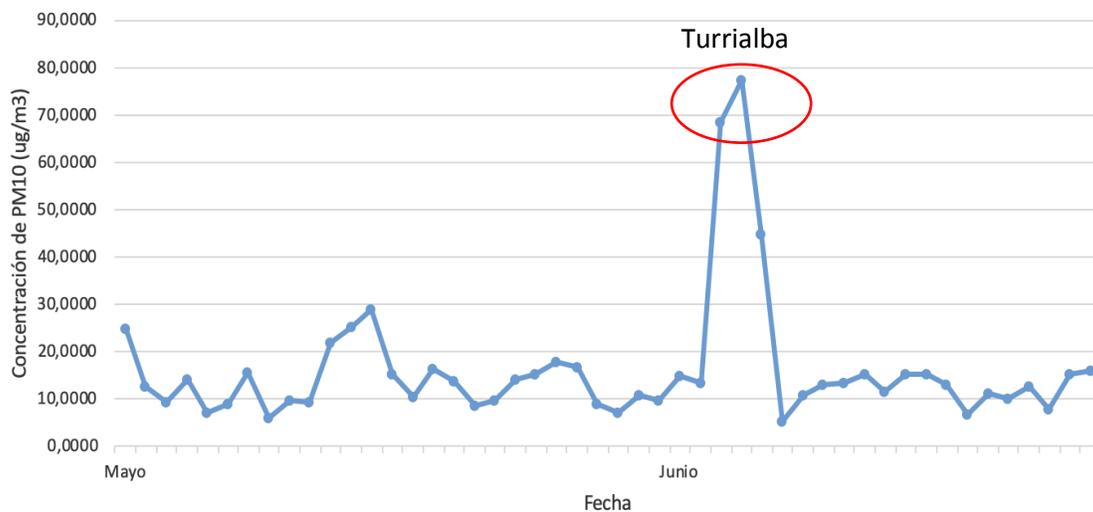


Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de abril del año 2017.

Además en abril del 2017 se presentó el fenómeno de polvos del Sahara que según reporta el IMN afectó al país entre el 5 y el 8 de abril. En este rango de fechas, se puede observar también de la Figura 38, que ocurre un pico en la concentración el 5 y 6 de abril, donde se alcanzan concentraciones promedio de $34,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $34,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

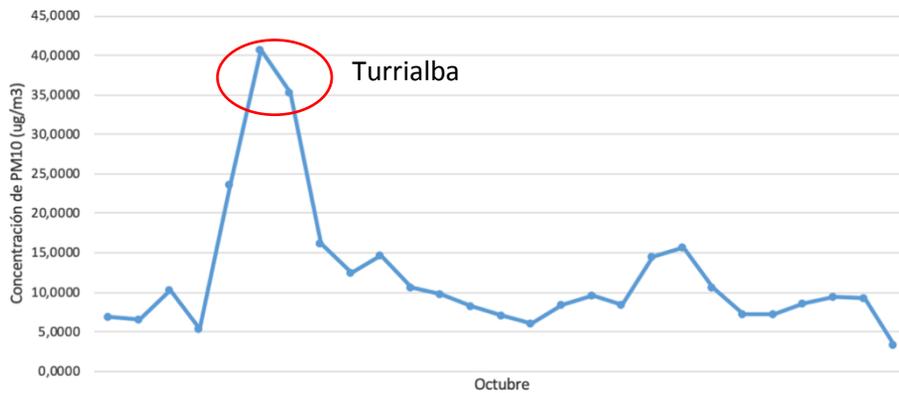
En este mismo año se reportan dos erupciones del Volcán Turrialba, una el 29 de mayo y otra entre el 25 de setiembre y el 2 de octubre. Para la primera erupción no se observa un pico propiamente el día del evento, pero de la Figura 39 se aprecia un pico importante a inicios de junio, pocos días después de la erupción, que alcanza una concentración promedio máxima de $77,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para los meses de mayo y junio del año 2017.

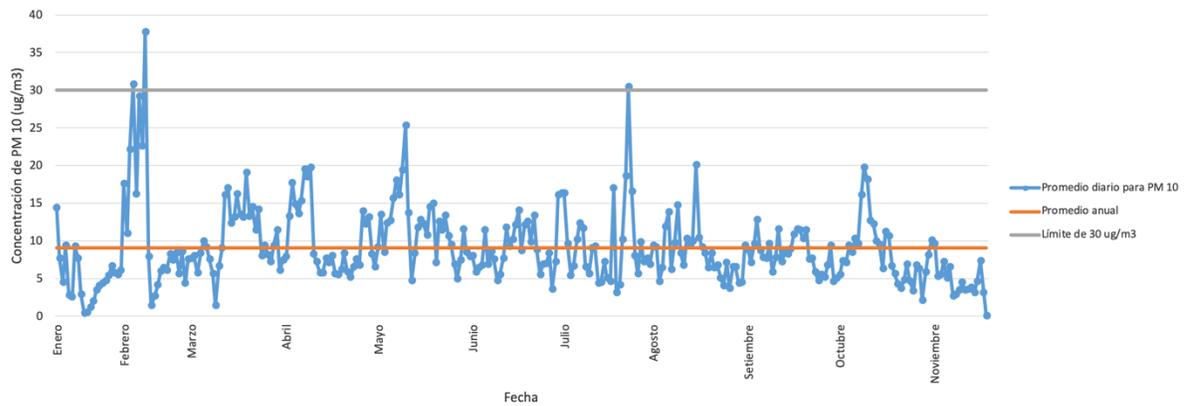
Para la segunda erupción la Figura 40 muestra que hay un pico de concentración entre el 7 y el 8 de octubre, unos días después de finalizada la erupción, donde la concentración máxima promedio alcanzada fue de 40,62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de octubre del año 2017.

En esta misma estación automática de monitoreo, pero durante el 2018 no se observan incumplimientos respecto a la norma de 24 horas y anual para PM₁₀. En este año la concentración promedio anual corresponde a 9,04 µg/m³ y la Figura 41 muestra el comportamiento de las concentraciones durante el año, donde los picos observados se corresponden con eventos volcánicos y meteorológicos o con variaciones de las fuentes de emisión local cercanas.

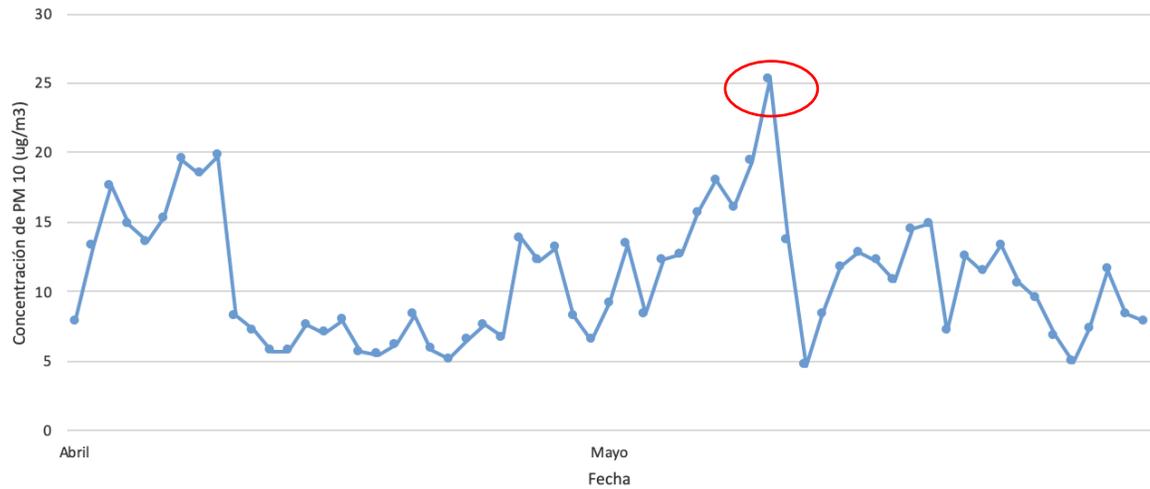


Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para el año 2018.

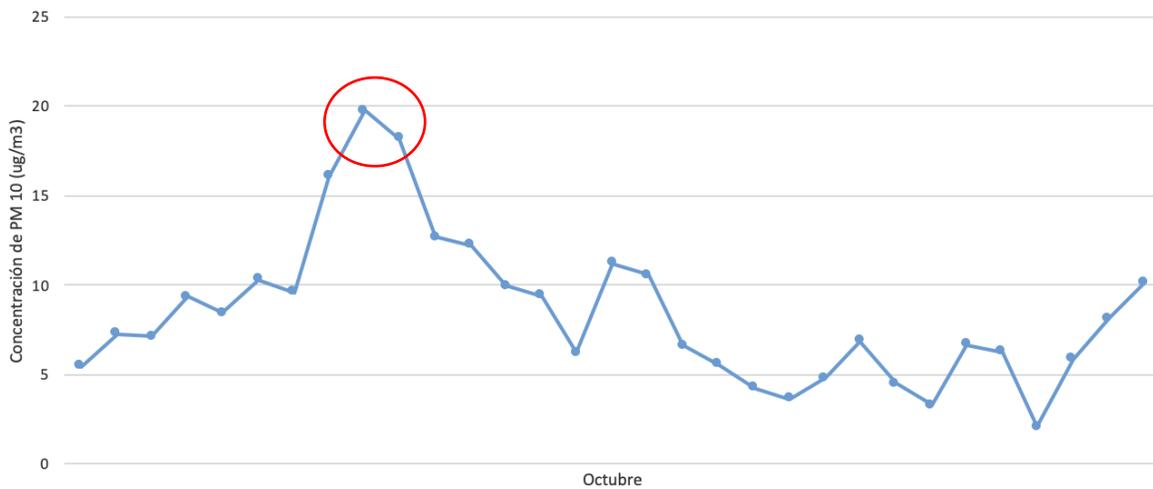
Este año se registran dos eventos volcánicos. El primero de ellos corresponde a una erupción del Volcán Turrialba en las fechas entre el 7 y el 21 de mayo. Si se observa la Figura 42, se puede apreciar que a partir de finales de abril la concentración comienza a incrementar paulatinamente hasta alcanzar su pico máximo en los días de la erupción con una concentración promedio de 25,29 µg/m³ el 10 de mayo.

El segundo evento volcánico corresponde a una erupción del Volcán Poás en el mes de octubre que genera un pico en la concentración promedio de partículas tal como se muestra en la Figura 43, alcanzando un valor máximo de 19,71 µg/m³.



Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para los meses de abril y mayo del año 2018.

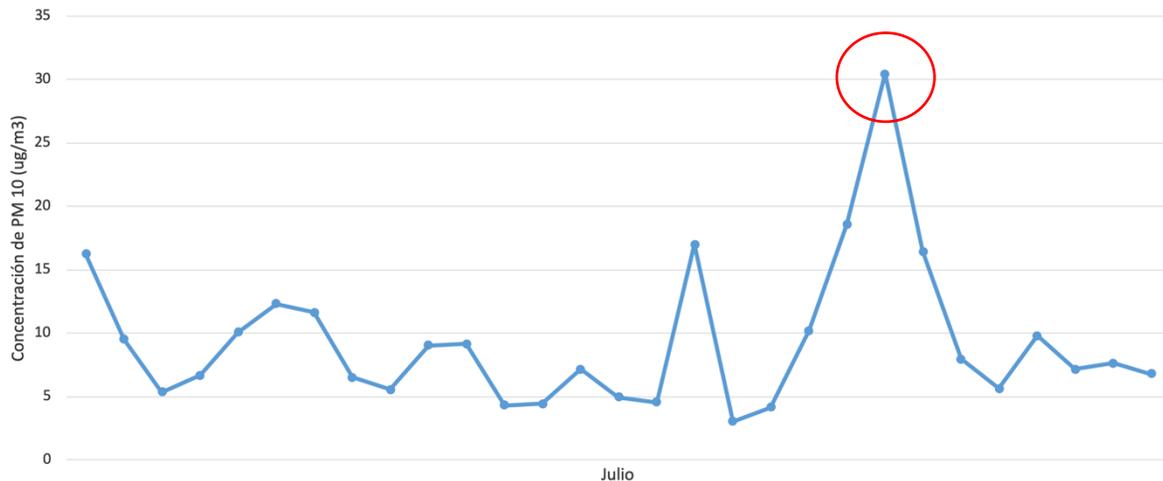


Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de octubre del año 2018.

Finalmente el IMN reportó que durante este año se presentaron dos eventos de polvos del Sahara, uno el 4 de junio y otro entre el 23 y 24 de julio.

Para el primer evento de junio, puede observarse de la figura 41 que en dicho mes no se aprecian picos significativos que indiquen un incremento en la concentración de partículas, sin embargo para el evento de julio, la Figura 44 muestra un pico significativo justo en las fechas del evento alcanzando una concentración promedio máxima de 30,44 µg/m³.



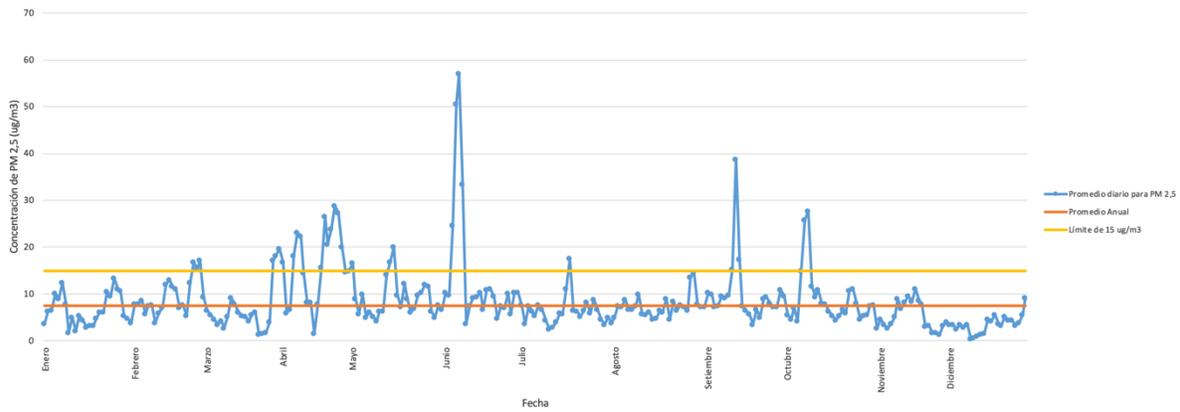
Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀ en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de octubre del año 2018.

Partículas PM_{2,5}

En la estación de Coronado (CO-01), en el año 2017 no se observa incumplimiento en la norma anual, obteniéndose una concentración promedio para el año en cuestión de 7,53 µg/m³, por debajo del límite establecido de 15 µg/m³. La Figura 44

muestra el comportamiento de las concentraciones promedio de PM_{2.5} a lo largo del año y resulta evidente por algunos de los picos observados que se incumple la norma

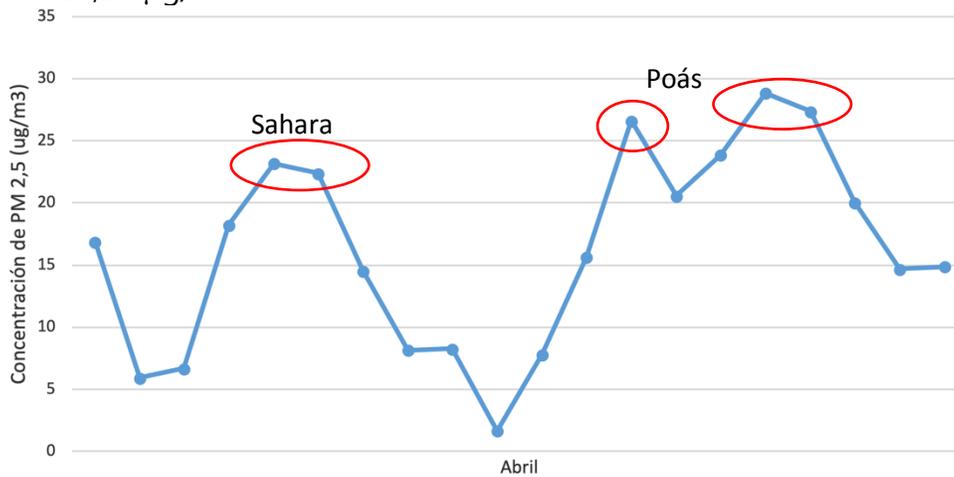


de 24 horas en algunas ocasiones, sin embargo estos están relacionados con eventos volcánicos, meteorológicos o con variaciones de las fuentes de emisión locales. De igual manera al ser el PM_{2.5} una fracción del PM₁₀, los picos observados en la Figura 44 coinciden en tiempo con los vistos en la Figura 41 para los principales eventos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5} en la estación de Coronado (CO-01) para el año 2017.

Los primeros eventos observados este año ocurren en el mes de abril, iniciando con el fenómeno de polvos del Sahara reportado por el IMN. La Figura 45 muestra un pico en la concentración promedio de partículas entre el 4 y 6 de este mes en coincidencia con el rango de fechas del evento, alcanzando una concentración máxima de 23,18 µg/m³.

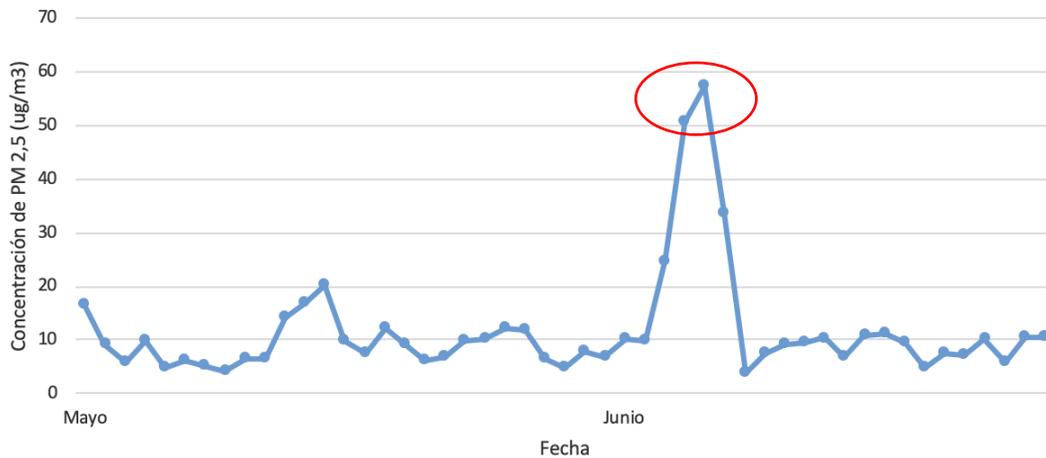


Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5} en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de abril del año 2017.

Posteriormente en el mismo mes se reporta una erupción del Volcán Poás entre el 10 y el 24 de abril y de la misma Figura 45 se aprecia que a finales de mes entre el 25 y el 27 justo después de la erupción se presenta un pico en la concentración promedio que alcanza un valor máximo de 28,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

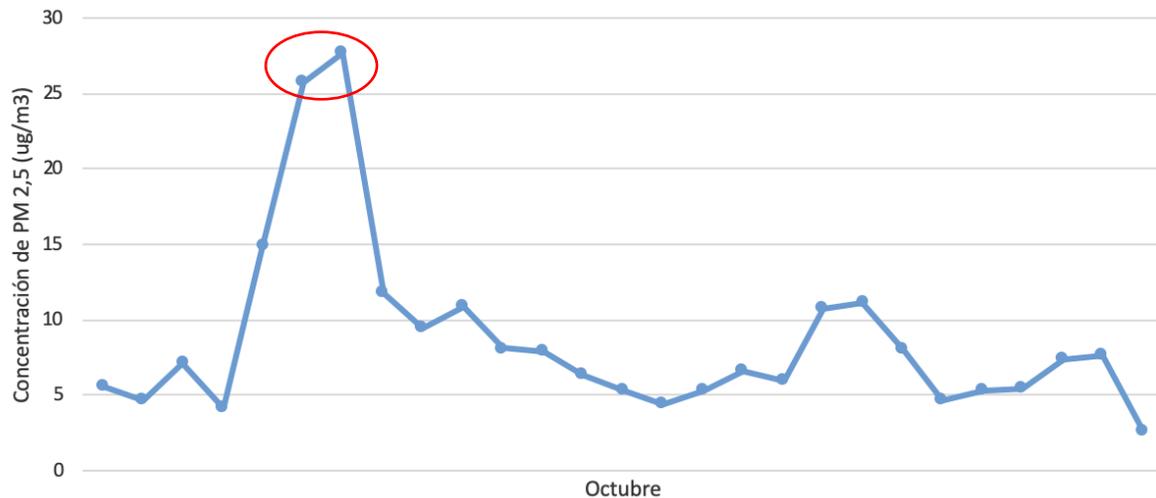
Luego el OVSICORI registra dos erupciones del Volcán Turrialba. La primera de ellas ocurre el 29 de mayo y si se observa la Figura 46 se puede apreciar que a inicios de junio pocos días después de la erupción hay un pico en la concentración promedio de partículas que supera en dos días el límite de 24 horas establecido por el reglamento de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, llegando a alcanzar un valor máximo de 57,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Variación de la concentración promedio diaria de $PM_{2.5}$ en la estación de Coronado (CO-01) para los meses de mayo y junio del año 2017.

La segunda erupción del Volcán Turrialba ocurre entre el 25 de setiembre y el 2 de octubre, y de la Figura 47 se puede observar que hay un incremento en la concentración promedio de partículas debido al evento, lo que se refleja en el pico obtenido entre el 7 y 8 de octubre, alcanzando un valor máximo de $27,70 \mu g/m^3$.



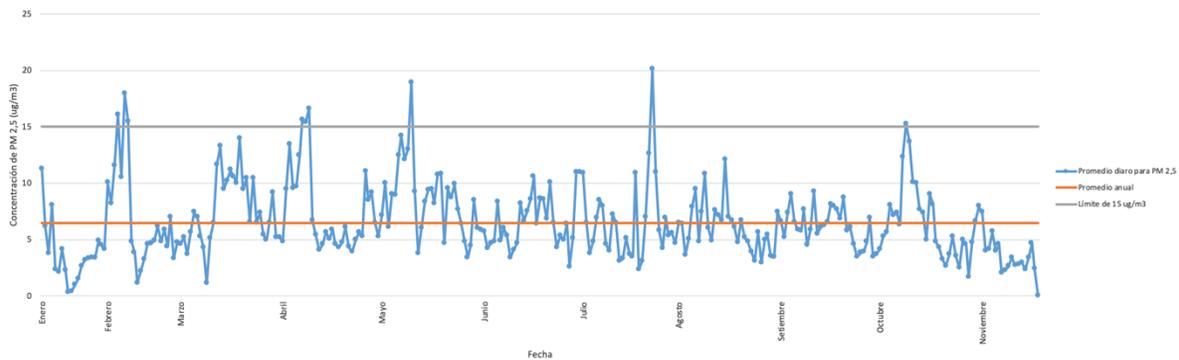
Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Variación de la concentración promedio diaria de $PM_{2.5}$ en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de octubre del año 2017.

Finalmente en la Figura 44 se puede apreciar que a mediados de setiembre hay un pico que incumple con la norma de 24 horas en un día. Este pico no ocurre durante o posterior a un evento volcánico ni meteorológico, sin embargo, ocurre unos días antes de la erupción del Volcán Turrialba a finales de setiembre y no es extraño que días previos a una erupción se incremente la liberación de gases que pueden

suspender partículas en la atmósfera y que por efectos meteorológicos sea arrastrado por el viento y registrado en la estación.

Para el año 2018 en la misma estación de Coronado (CO-01) no se observaron incumplimientos en la norma de 24 horas ni en la anual, obteniendo una concentración promedio para el 2018 de 6,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La Figura 47 muestra la variación de la concentración promedio de PM_{2.5} a lo largo de dicho año.

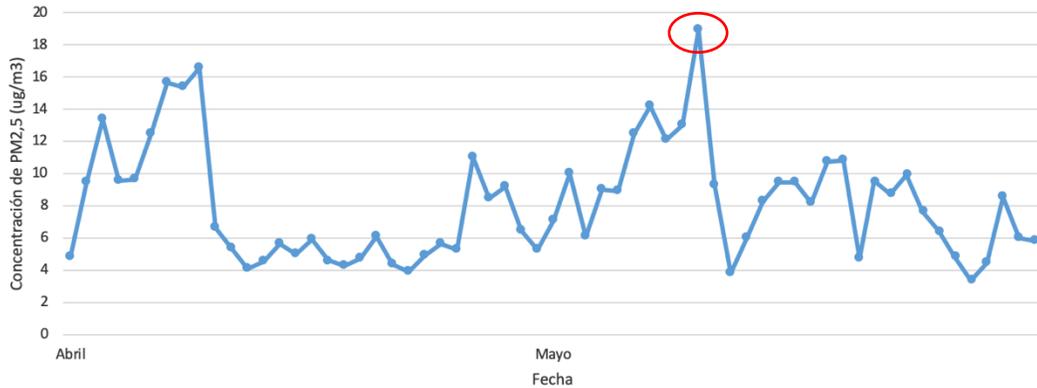


Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5} en la estación de Coronado (CO-01) para el año 2018.

En lo referente a eventos naturales que afecten la concentración de partículas para este año se encuentra en primer lugar una erupción del Volcán Turrialba entre el 7 y 21 de mayo. La Figura 48 permite observar la variación de la concentración promedio

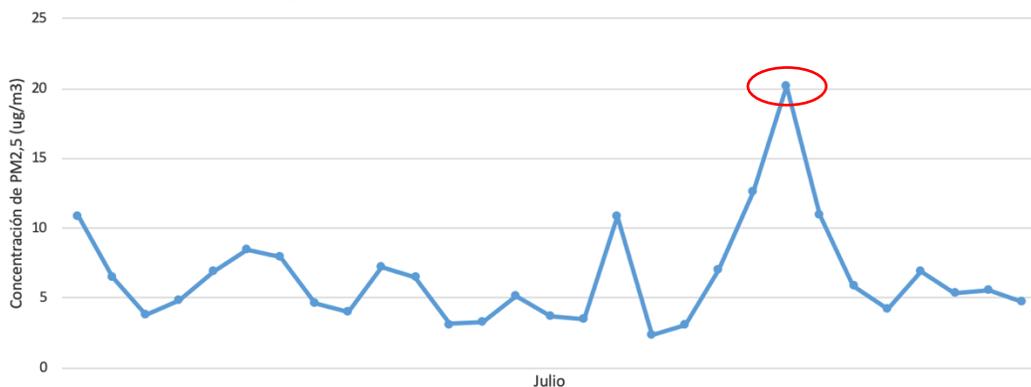
para este mes y resulta evidente que efectivamente a inicios de mayo hay un pico que indica un incremento en la concentración con un valor máximo de $18.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5} en la estación de Coronado (CO-01) para los meses de abril y mayo del año 2018.

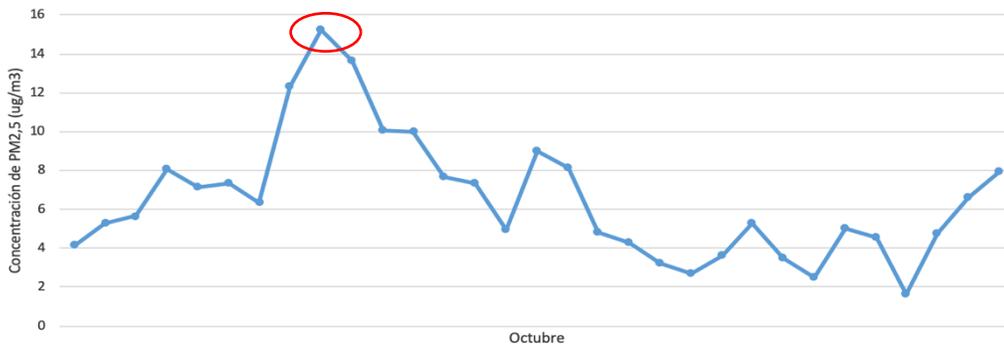
Luego durante los meses de junio y julio el IMN reportó la influencia del evento de polvos del Sahara en el país. Para el primero ocurrido el 4 de junio no se observó ningún incremento significativo en la concentración de PM_{2.5} pese a la influencia del evento, sin embargo para el correspondiente a las fechas del 23 y 24 de julio la Figura 49 permite constatar que hay un pico en la concentración llegando a alcanzar un valor máximo de $20,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5} en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de julio del año 2018.

Finalmente el 8 de octubre se reportó una erupción del Volcán Poás, lo que ocasionó un incremento en la concentración promedio de partículas que se ve reflejado en el pico observado en la Figura 50 y cuyo valor máximo corresponde a 15,21 µg/m³.



Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5} en la estación de Coronado (CO-01) para el mes de octubre del año 2018.

Resumen

En el Cuadro 23 se muestran las concentraciones anuales obtenidas para las mediciones con instrumentación de monitoreo automático, con los correspondientes límites y la metodología utilizada para la obtención de dichos promedios de acuerdo a lo establecidos en el reglamento 39951-S.

Cuadro 23. Promedios anuales de las concentraciones de gases y partículas para los años 2017 y 2018.

Informe de Calidad del Aire – Área Metropolitana de Costa Rica

Sitio	SO ₂ (ppbv)		NO ₂ (ppbv)		CO (ppmv)		PM _{2.5} (µg/m ³)		PM ₁₀ (µg/m ³)	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
SJ-03	5.37 (0.99)	6.80 (2.02)	15.13 (6.68)	17.44 (6.11)	0.95 (0.12)	1.13 (0.30)	-	-	-	-
CO-01	10.07 (3.02)	6.00 (1.34)	-	-	-	-	7,53 (4,67)	6,48 (3,30)	11,17 (7,95)	9,04 (5,04)
Límite establecido en el reglamento 39951-S	1 hora	3 horas	1 hora	Anual	1 hora	8 horas	24 horas	Anual	24 horas	Anual
	75 ppbv	500 ppbv	100 ppbv	53 ppbv	35 ppmv	9 ppmv	35 µg/m ³	15 µg/m ³	100 µg/m ³	30 µg/m ³
Metodología de obtención del promedio anual	Quinto promedio máximo anual		Quinto promedio máximo anual		Quinto promedio máximo anual		Promedio anual de los promedios diarios		Promedio anual de los promedios diarios	

Fuente: Elaboración propia

Nota: Entre paréntesis se indica la desviación estándar observada.



4. Mejoras Implementadas

Acciones implementadas para mejorar la Calidad de Aire

Acciones implementadas para mejorar la Calidad de Aire

En el año 2016 Costa Rica derogó el Reglamento sobre Inmisión de Contaminantes Atmosféricos, N° 30221-S del 18 de enero del 2002 y publicado en La Gaceta N° 57 del 21 de marzo del 2002, y entró en vigencia el nuevo Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio, N° 39951-S del 9 de agosto del 2016, y publicado en La Gaceta N° 239 del 1 de noviembre del 2016, donde las autoridades del Ministerio de Salud con ayuda de expertos de otras instituciones, se encargaron de actualizar la normativa, incluyendo aspectos que hasta ese momento no se encontraban en ninguna regulación nacional de materia ambiental.⁸²

Entre los aspectos más importantes que se incorporaron en esta actualización del Decreto Ejecutivo, están los siguientes.⁸³

- Disposición de la organización y funcionamiento de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire como la figura encargada de lo dispuesto en este Reglamento, administrada por la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud.
- Creación de la Comisión de la Calidad del Aire, coordinada por el Ministerio de Salud y con participación del Ministerio de Ambiente y Energía, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, la Caja Costarricense del Seguro Social, la Municipalidad de San José y otra Municipalidad, un representante de las Universidades que realicen monitoreo de la calidad del aire, un representante de los Laboratorios Privados que también brinden el servicio de monitoreo de la calidad de aire en inmisión, y la Defensoría de los Habitantes. Además de su

⁸² Decreto Ejecutivo N° 30221-S. (marzo de 2002). Reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos. Diario Oficial La Gaceta N° 57.

⁸³ Decreto Ejecutivo N° 39951. (noviembre de 2016). Reglamento de calidad del aire para contaminantes criterio. Diario Oficial La Gaceta N° 209.

creación, se definen sus responsabilidades, donde destaca la colaboración con la Red de Monitoreo así como el aporte en la elaboración y actualización del Plan Nacional de Calidad del Aire.

- Se definen las responsabilidades del Ministerio de Salud, donde destacan la coordinación y diseño de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire, la oficialización y divulgación de los datos provenientes de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire.
- Se definen las concentraciones máximas para los contaminantes criterios, así como los métodos de análisis y muestreo que deberán ser los aceptados como Métodos de Referencia o alguno equivalente. Se incluyen como contaminantes criterio: $PM_{2.5}$ (partículas con diámetros menores de $2,5 \mu m$), PM_{10} (partículas con diámetros menores de $10 \mu m$), ozono, plomo, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.
- En el artículo 8 se actualizan las concentraciones de cumplimiento para partículas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) y se realizan variaciones en la metodología para verificar la observancia de estos valores.
- El artículo 9 define métodos equivalentes para la medición de contaminantes criterio, tarea que le compete al Ministerio de Salud, siempre que estén acreditados por parte del ente encargado de la materia en Costa Rica. Se define una lista de requisitos para los métodos equivalentes manuales (como la estabilidad del flujo, la prueba estadística de repetibilidad de los datos, la selectividad de los datos) y automáticos (como la estimación de la desviación estándar de la repetibilidad, la sensibilidad y el límite de detección del equipo, entre otros).
- Los requisitos de ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire se detallan en el artículo 11, incluyendo las distancias de colocación vertical

y horizontal de la sonda, la separación de obstrucciones, árboles y caminos por volumen de tránsito.

- En el artículo 12 se presenta el Índice Costarricense de Calidad del Aire (ICCA) como una herramienta para que el Poder Ejecutivo, los gobiernos locales, la academia, demás instituciones del Estado y los operadores de la red de monitoreo del país informen a la ciudadanía sobre el estado de la calidad del aire con respecto a los contaminantes criterio, de manera que sea más sencillo de comprender. Se detalla el método para hacer el cálculo, y la significancia del resultado para comunicarlo a la población.
- A partir del cálculo del ICCA se plantean las acciones preventivas a tomar en cada uno de los sitios, de acuerdo con su calificación y el tipo de contaminante.

La regulación de la contaminación de aire de una manera coordinada está delegada a nivel nacional en el Consejo Técnico de Normas de Emisiones e Inmisiones, el cual incluso ha ampliado sus funciones para la revisión y actualización de la normativa de emisiones e inmisiones.

En Costa Rica se ha trabajado en distintos documentos que tienen que ver con la calidad del aire, tales como el Inventario de compuestos tóxicos peligrosos del aire en el Gran Área Metropolitana del año 2007, el Primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire del 2007, el Sexto Informe de la Calidad del Aire de la Gran Área Metropolitana del 2013-2014 y el Primer Informe de la Calidad de Aire de la Ciudad de San José, años 1993-2003, entre otros muchos.

También, algunas leyes importantes en materia de calidad ambiental y monitoreo de la misma son el Decreto Ejecutivo 39951-S: Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio, el Decreto Ejecutivo 39136-S-MINAE: Reglamento sobre condiciones de operación y control de emisiones de instalaciones para coincineración de residuos sólidos ordinarios, el Decreto Ejecutivo 39724-MOPT-

MINAE-S: Reglamento de Control y Revisión Técnica de Emisiones Vehiculares, y el Decreto Ejecutivo 36551-S-MINAET-MTSS: Reglamento sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos provenientes de calderas y hornos de tipo indirecto. Con estas leyes mencionadas se contempla las emisiones de residuos, de las calderas y hornos, de los combustibles usados para transporte y el modo de medir y monitorear los contaminantes criterios de la atmósfera.

En el caso del Decreto 26789-MTSS: Reglamento de Calderas del 16 de febrero de 1998 y publicado en La Gaceta N° 65 del 2 de abril de 1998, éste sufrió una modificación recientemente por medio del Decreto 40306-S-MTSS del 13 de febrero del 2017 y publicado en La Gaceta N° 78 del 26 de abril del 2017, donde se facultó al Ministerio de Salud con el ejercicio del control integral de la instalación, la operación y el funcionamiento de las calderas en el país, y ya no al Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Esta modificación permitirá al Ministerio de Salud seguir con sus programas y su política de control y reducción de emisiones atmosféricas y la gestión ambiental. También se llevará un registro de los inspectores caldereros, reconocidos por los Colegios Profesionales correspondientes.⁸⁴

Por otro lado, el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica elaboró normas actualizadas para las especificaciones de calidad del diésel y las gasolinas que se utilizan en el transporte de Costa Rica. Estas son la INTE 41-01-01:2016 para las gasolinas y la INTE 41-01-03:2016 para el diésel. A partir del 1° de septiembre del 2017 los combustibles han salido a la venta con estos nuevos parámetros de calidad, de modo que se cumpla con lo establecido en el Decreto Ejecutivo N° 39724-MOPT-MINAE-S, Reglamento de Control y Revisión Técnica de Emisiones Vehiculares, que demanda la importación de vehículos con tecnología más rigurosa para el control de las emisiones a partir del 1° de enero del 2018 y con una de las metas del VII Plan

⁸⁴ Decreto Ejecutivo N° 40306-S-MTSS. (abril de 2017). Reforma Reglamento de Calderas. Diario Oficial La Gaceta N° 78.

Nacional de Energía, que pretende mejorar la calidad del aire utilizando combustibles más limpios que permitan la adquisición de máquinas de transporte más eficientes y menos contaminantes.⁸⁵

Dentro de los cambios más importantes que se presentan en las nuevas normas técnicas están que se reduce el contenido permitido de azufre de 1000 ppm a 50 ppm, tanto para la gasolina Plus 91 como para la Súper. También en ambas gasolinas se regula el contenido de compuestos orgánicos volátiles, de modo que se prevenga la afectación de los sistemas de control de las emisiones.

También, en el caso de las gasolinas se ponen límites de tolerancia a sustancias que dañan la salud, como benceno y los otros compuestos aromáticos, y las olefinas. Cabe destacar que los parámetros de INTECO en cuanto a azufre se ajustan a la normativa europea sobre emisiones contaminantes Euro 4, del año 2005; mientras que los otros mencionados a la Euro 5, del año 2009 y modificada en 2011.

En cuanto al diésel, los cambios más destacados es el aumento en el número de cetano de 45 a 51, lo que reduce la emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos al iniciar la combustión más rápidamente. También se mejora la lubricidad, que ayuda a los sistemas de inyección de los motores y se previenen las pérdidas de energía en el transporte del combustible del tanque hacia la cámara de combustión del vehículo. Se limita a un 8 % en masa de poliaromáticos, ajustado con la norma Euro 6 de septiembre del 2014, la más actualizada norma europea en cuanto a emisiones contaminantes.

Finalmente aunque para la fecha de este informe solo se contaba con dos estaciones automáticas en operación, RECOPE cuenta con una estación nueva ubicada en el

⁸⁵ Decreto Ejecutivo N° 39724-MOPT-MINAE-S. (mayo de 2016). Reglamento para el control de las emisiones contaminantes producidas por los vehículos automotores con motor de combustión interna. Diario Oficial La Gaceta N° 103.

plantel de Ochomogo, la cual está pronta a iniciar su operación durante el segundo semestre del 2019, lo que permitirá generar más datos sobre la calidad del aire en distintas regiones del área metropolitana.



5. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones y Recomendaciones

1. Los niveles de concentración de partículas de PM_{10} en la red manual de la GAM cumplen con la normativa nacional (Decreto N° 39951) para la mayoría de los sitios con excepción de SJ-04 y BE-01 en el 2017 y HE-01 en ambos años. Sin embargo ningún sitio cumple con la normativa internacional dictada por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Este incumplimiento se da de forma generalizada para los años 2017 y 2018 (promedios anuales) estudiados en este informe con la excepción del promedio anual del sitio AL-01 para el 2018.
2. Los niveles de concentración de partículas de $PM_{2.5}$ en la red manual de la GAM no cumplen con la normativa nacional (Decreto N° 39951) y por consiguiente tampoco lo hacen para la normativa internacional dictada por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Este incumplimiento se da de forma generalizada para los años 2017 y 2018 (promedios anuales) estudiados en este informe.
3. Los niveles de concentración de partículas de PM_{10} en la red automática de la GAM cumplen con la normativa nacional (Decreto N° 39951) así como la normativa internacional dictada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para los años 2017 y 2018 con excepción de 3 incumplimientos de la norma internacional para el promedio de 24 horas durante el 2017.
4. Los niveles de concentración de partículas de $PM_{2.5}$ en la red automática de la GAM cumplen con la normativa nacional (Decreto N° 39951) así como la normativa internacional dictada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para los años 2017 y 2018 con excepción de 6 incumplimientos de la norma internacional para el promedio de 24 horas durante el 2017.

5. Los sitios de muestreo que presentan mayor concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ corresponden a lugares con impacto dominado por el sector industrial y zonas con alto flujo vehicular.
6. En los últimos años no se registra ninguna tendencia al aumento o descenso importante del material particulado (PM_{10}). Algunos sitios muestran descensos significativos, pero no se observa una tendencia general en la red de monitoreo que pruebe algún efecto significativo en este tema.
7. Los niveles de dióxido de nitrógeno en la GAM superan los límites dictados por la OMS en un 54 % de los sitios de muestreo pasivo para el 2017 y un 40 % para el 2018. Se recomienda con base en estas mediciones hacer un esfuerzo por la medición automática de este contaminante en más sitios de la red pues en la actualidad solo la estación ubicada en Hatillo (SJ-03) mide esta variable de forma automática. Esto permitiría constatar las horas en las que el problema es mayor, así como estudiar mejor los perfiles del contaminante en el casco central de San José y vías conocidas por su alto flujo vehicular con el propósito de poder generar mejores políticas dirigidas a reducir la emisión de este contaminante.
8. A lo largo de los dos años de estudio se presentaron diferentes fenómenos naturales que afectan la calidad del aire como erupciones volcánicas y la influencia de los polvos del Sahara, los cuales generan incumplimientos puntuales con la normativa nacional e internacional. Estos eventos pueden llegar a tener una afectación importante en la salud de las persona, especialmente en la población más vulnerable con padecimientos respiratorios.
9. Se recomienda sumar esfuerzos para activar todos los sitios de monitoreo automático para la medición de contaminantes criterio lo que permitiría modelar de manera más efectiva los procesos de dispersión, transporte, transformación y deposición de estos.

10. Utilizar los datos generados en el informe de este año, así como de años anteriores para retroalimentar procesos de ordenamiento territorial y elaboración de planes reguladores a nivel cantonal.



6. Anexos

Anexo 1. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,583	0,05	No
	2018	0,457	0,05	No
Mg	2017	0,341	0,05	No
	2018	0,967	0,05	No
Al	2017	0,055	0,05	No
	2018	0,993	0,05	No
K	2017	0,093	0,05	No
	2018	0,501	0,05	No
Ca	2017	0,504	0,05	No
	2018	0,868	0,05	No
Ti	2017	0,064	0,05	No
	2018	0,721	0,05	No
V	2017	0,011	0,05	Sí
	2018	0,064	0,05	No
Cr	2017	0,021	0,05	Sí
	2018	0,551	0,05	No
Mn	2017	0,24	0,05	No
	2018	0,932	0,05	No
Fe	2017	0,13	0,05	No
	2018	0,079	0,05	No
Co	2017	0,001	0,05	Sí

	2018	0,131	0,05	No
Ni	2017	0,026	0,05	Sí
	2018	0,551	0,05	No
Cu	2017	0,05	0,05	Sí
	2018	0,804	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 1 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,51	0,05	No
	2018	0,701	0,05	No
As	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,086	0,05	No
	2018	0,743	0,05	No
Mo	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Cd	2017	0,35	0,05	No
	2018	0,982	0,05	No
Sb	2017	0,066	0,05	No
	2018	0,15	0,05	No
Ba	2017	0,763	0,05	No
	2018	0,829	0,05	No
Hg	2017	0,027	0,05	Sí
	2018	0,243	0,05	No
Tl	2017	0,663	0,05	No

	2018	0,086	0,05	No
Pb	2017	0,037	0,05	Sí
	2018	0,286	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-02 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,362	0,05	No
	2018	0,517	0,05	No
Mg	2017	0,965	0,05	No
	2018	0,986	0,05	No
Al	2017	0,007	0,05	Sí
	2018	0,023	0,05	Sí
K	2017	0,77	0,05	No
	2018	0,87	0,05	No
Ca	2017	0,824	0,05	No
	2018	0,801	0,05	No
Ti	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,012	0,05	Sí
V	2017	0,016	0,05	Sí
	2018	0,11	0,05	No
Cr	2017	0,039	0,05	Sí
	2018	0,416	0,05	No

Mn	2017	0,004	0,05	Sí
	2018	0,3	0,05	No
Fe	2017	0,006	0,05	Sí
	2018	0,115	0,05	No
Co	2017	0,043	0,05	Sí
	2018	0,282	0,05	No
Ni	2017	0,143	0,05	No
	2018	0,098	0,05	No
Cu	2017	0,187	0,05	No
	2018	0,688	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-02 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,282	0,05	No
	2018	0,453	0,05	No
As	2017	0,248	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,444	0,05	No
	2018	0,466	0,05	No
Mo	2017	0	0,05	Sí
	2018	-	0,05	-
Ag	2017	0,533	0,05	No
	2018	0,392	0,05	No
Cd	2017	0,357	0,05	No
	2018	0,151	0,05	No
Sb	2017	0,825	0,05	No
	2018	0,823	0,05	No

Ba	2017	0,012	0,05	Sí
	2018	0,067	0,05	No
Hg	2017	0,166	0,05	No
	2018	0,902	0,05	No
Tl	2017	0,271	0,05	No
	2018	0,24	0,05	No
Pb	2017	0,143	0,05	No
	2018	0,576	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-03 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,005	0,05	Sí
	2018	0,213	0,05	No
Mg	2017	0,687	0,05	No
	2018	0,041	0,05	Sí
Al	2017	0,005	0,05	Sí
	2018	0,018	0,05	Sí
K	2017	0,263	0,05	No
	2018	0,461	0,05	No
Ca	2017	0,161	0,05	No
	2018	0,215	0,05	No
Ti	2017	0,006	0,05	Sí

	2018	0,006	0,05	Sí
V	2017	0,64	0,05	No
	2018	0,74	0,05	No
Cr	2017	0,02	0,05	Sí
	2018	0,538	0,05	No
Mn	2017	0,046	0,05	Sí
	2018	0,086	0,05	No
Fe	2017	0,376	0,05	No
	2018	0,025	0,05	Sí
Co	2017	0,154	0,05	No
	2018	0,741	0,05	No
Ni	2017	0,753	0,05	No
	2018	0,85	0,05	No
Cu	2017	0,033	0,05	Sí
	2018	0,47	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-03 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,987	0,05	No
As	2017	0,407	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,021	0,05	Sí
	2018	0,541	0,05	No
Mo	2017	0,001	0,05	Sí
	2018	0,178	0,05	No
Ag	2017	0,747	0,05	No

	2018	0,193	0,05	No
Cd	2017	0,391	0,05	No
	2018	0,24	0,05	No
Sb	2017	0,342	0,05	No
	2018	0,083	0,05	No
Ba	2017	0,33	0,05	No
	2018	0,812	0,05	No
Hg	2017	0,427	0,05	No
	2018	0,51	0,05	No
Tl	2017	0,794	0,05	No
	2018	0,306	0,05	No
Pb	2017	0,99	0,05	No
	2018	0,117	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-04 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	0,536	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,581	0,05	No
	2018	0,026	0,05	Sí
Mg	2017	0,346	0,05	No
	2018	0,375	0,05	No
Al	2017	0,009	0,05	Sí
	2018	0,214	0,05	No

K	2017	0,9	0,05	No
	2018	0,72	0,05	No
Ca	2017	0,573	0,05	No
	2018	0,283	0,05	No
Ti	2017	0,049	0,05	Sí
	2018	0,048	0,05	Sí
V	2017	0,142	0,05	No
	2018	0,23	0,05	No
Cr	2017	0,033	0,05	Sí
	2018	0,306	0,05	No
Mn	2017	0,04	0,05	Sí
	2018	0,145	0,05	No
Fe	2017	0,003	0,05	Sí
	2018	0,35	0,05	No
Co	2017	0,021	0,05	Sí
	2018	0,353	0,05	No
Ni	2017	0,949	0,05	No
	2018	0,174	0,05	No
Cu	2017	0,437	0,05	No
	2018	0,552	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-04 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,384	0,05	No
	2018	0,622	0,05	No
As	2017	0,663	0,05	No
	2018	0,683	0,05	No

Se	2017	0,167	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Mo	2017	0,325	0,05	No
	2018	0,273	0,05	No
Ag	2017	0,461	0,05	No
	2018	0,002	0,05	Sí
Cd	2017	0,404	0,05	No
	2018	0,736	0,05	No
Sb	2017	0,651	0,05	No
	2018	0,298	0,05	No
Ba	2017	0,838	0,05	No
	2018	0,027	0,05	Sí
Hg	2017	0,001	0,05	Sí
	2018	0,131	0,05	No
Tl	2017	0,16	0,05	No
	2018	0,911	0,05	No
Pb	2017	0,099	0,05	No
	2018	0,424	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-06 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,586	0,05	No

	2018	0,564	0,05	No
Mg	2017	0,629	0,05	No
	2018	0,7	0,05	No
Al	2017	0,02	0,05	Sí
	2018	0,01	0,05	Sí
K	2017	0,39	0,05	No
	2018	0,454	0,05	No
Ca	2017	0,56	0,05	No
	2018	0,568	0,05	No
Ti	2017	0,088	0,05	No
	2018	0,008	0,05	Sí
V	2017	0,736	0,05	No
	2018	0,062	0,05	No
Cr	2017	0,134	0,05	No
	2018	0,429	0,05	No
Mn	2017	0,374	0,05	No
	2018	0,084	0,05	No
Fe	2017	0,091	0,05	No
	2018	0,02	0,05	Sí
Co	2017	0,991	0,05	No
	2018	0,045	0,05	Sí
Ni	2017	0,533	0,05	No
	2018	0,193	0,05	No
Cu	2017	0,157	0,05	No
	2018	0,056	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio SJ-06 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
--------------	------------	----------------	------------------------------------------------	---------------------------------------------------

Zn	2017	0,831	0,05	No
	2018	0,106	0,05	No
As	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,502	0,05	No
	2018	0,87	0,05	No
Mo	2017	0,553	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Cd	2017	0,893	0,05	No
	2018	0,212	0,05	No
Sb	2017	0,776	0,05	No
	2018	0,556	0,05	No
Ba	2017	0,516	0,05	No
	2018	0,137	0,05	No
Hg	2017	0,778	0,05	No
	2018	0,113	0,05	No
Tl	2017	0,355	0,05	No
	2018	0,056	0,05	No
Pb	2017	0,411	0,05	No
	2018	0,262	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio BE-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	0,582	0,05	No
Na	2017	0,728	0,05	No
	2018	0,642	0,05	No
Mg	2017	0,684	0,05	No
	2018	0,199	0,05	No
Al	2017	0,943	0,05	No
	2018	0,961	0,05	No
K	2017	0,73	0,05	No
	2018	0,611	0,05	No
Ca	2017	0,622	0,05	No
	2018	0,989	0,05	No
Ti	2017	0,832	0,05	No
	2018	0,939	0,05	No
V	2017	0,004	0,05	Sí
	2018	0,001	0,05	Sí
Cr	2017	0,016	0,05	Sí
	2018	0,947	0,05	No
Mn	2017	0,867	0,05	No
	2018	0,848	0,05	No
Fe	2017	0,939	0,05	No
	2018	0,837	0,05	No
Co	2017	0,483	0,05	No
	2018	0,933	0,05	No
Ni	2017	0,015	0,05	Sí
	2018	0,105	0,05	No
Cu	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,125	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio BE-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,167	0,05	No
	2018	0,638	0,05	No
As	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,435	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Mo	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	0,336	0,05	No
Cd	2017	0,058	0,05	No
	2018	0,368	0,05	No
Sb	2017	0,029	0,05	Sí
	2018	0,154	0,05	No
Ba	2017	0,013	0,05	Sí
	2018	0,277	0,05	No
Hg	2017	0,009	0,05	Sí
	2018	0,342	0,05	No
Tl	2017	0,818	0,05	No
	2018	0,16	0,05	No
Pb	2017	0,577	0,05	No
	2018	0,349	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio CA-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,037	0,05	Sí
	2018	0,295	0,05	No
Mg	2017	0,185	0,05	No
	2018	0,401	0,05	No
Al	2017	0,345	0,05	No
	2018	0,012	0,05	Sí
K	2017	0,233	0,05	No
	2018	0,545	0,05	No
Ca	2017	0,053	0,05	No
	2018	0,9	0,05	No
Ti	2017	0,081	0,05	No
	2018	0,105	0,05	No
V	2017	0,039	0,05	Sí
	2018	0,529	0,05	No
Cr	2017	0,129	0,05	No
	2018	0,641	0,05	No
Mn	2017	0,094	0,05	No
	2018	0,376	0,05	No
Fe	2017	0,058	0,05	No
	2018	0,087	0,05	No
Co	2017	0,21	0,05	No
	2018	0,589	0,05	No
Ni	2017	0,161	0,05	No

	2018	0,305	0,05	No
Cu	2017	0,021	0,05	Sí
	2018	0,284	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio CA-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,004	0,05	Sí
	2018	0,474	0,05	No
As	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,015	0,05	Sí
	2018	0,284	0,05	No
Mo	2017	0,294	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	0,402	0,05	No
Cd	2017	0,103	0,05	No
	2018	0,064	0,05	No
Sb	2017	0,469	0,05	No
	2018	0,269	0,05	No
Ba	2017	0,19	0,05	No
	2018	0,052	0,05	No
Hg	2017	0,055	0,05	No
	2018	0,463	0,05	No
Tl	2017	0,773	0,05	No
	2018	0,311	0,05	No
Pb	2017	0,066	0,05	No

2018	0,534	0,05	No
------	-------	------	----

Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio HE-01 PM_{2.5} para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,044	0,05	Sí
	2018	0,466	0,05	No
Mg	2017	0,283	0,05	No
	2018	0,476	0,05	No
Al	2017	0,25	0,05	No
	2018	0,562	0,05	No
K	2017	0,153	0,05	No
	2018	0,47	0,05	No
Ca	2017	0,143	0,05	No
	2018	0,476	0,05	No
Ti	2017	0,16	0,05	No
	2018	0,496	0,05	No
V	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,043	0,05	Sí
Cr	2017	0,119	0,05	No
	2018	0,497	0,05	No
Mn	2017	0,473	0,05	No
	2018	0,42	0,05	No

Fe	2017	0,676	0,05	No
	2018	0,196	0,05	No
Co	2017	0,457	0,05	No
	2018	0,383	0,05	No
Ni	2017	0,522	0,05	No
	2018	0,054	0,05	No
Cu	2017	0,003	0,05	Sí
	2018	0,886	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 8 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio HE – 01 PM_{2.5} para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,017	0,05	Sí
	2018	0,09	0,05	No
As	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,691	0,05	No
	2018	0,794	0,05	No
Mo	2017	0,001	0,05	Sí
	2018	0,436	0,05	No
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	0,374	0,05	No
Cd	2017	0,307	0,05	No
	2018	0,462	0,05	No
Sb	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,093	0,05	No
Ba	2017	0,015	0,05	Sí
	2018	0,637	0,05	No

Hg	2017	0,348	0,05	No
	2018	0,468	0,05	No
Tl	2017	0,653	0,05	No
	2018	0,315	0,05	No
Pb	2017	0,012	0,05	Sí
	2018	0,749	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 9. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio HE-01 PM₁₀ para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,044	0,05	Sí
	2018	0,001	0,05	Sí
Mg	2017	0,173	0,05	No
	2018	0,032	0,05	Sí
Al	2017	0,278	0,05	No
	2018	0,708	0,05	No
K	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,857	0,05	No
Ca	2017	0,154	0,05	No
	2018	0,558	0,05	No
Ti	2017	0,098	0,05	No
	2018	0,785	0,05	No
V	2017	0	0,05	Sí

	2018	0,312	0,05	No
Cr	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,258	0,05	No
Mn	2017	0,152	0,05	No
	2018	0,787	0,05	No
Fe	2017	0,052	0,05	No
	2018	0,398	0,05	No
Co	2017	0,023	0,05	Sí
	2018	0,353	0,05	No
Ni	2017	0,017	0,05	Sí
	2018	0,029	0,05	Sí
Cu	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,567	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 9 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio HE-01 PM₁₀ para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,032	0,05	Sí
As	2017	0,52	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,799	0,05	No
	2018	0,028	0,05	Sí
Mo	2017	0,004	0,05	Sí
	2018	0,801	0,05	No
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	0,662	0,05	No
Cd	2017	0,025	0,05	Sí

	2018	0,783	0,05	No
Sb	2017	0	0,05	Sí
	2018	0,065	0,05	No
Ba	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,103	0,05	No
Hg	2017	0,143	0,05	No
	2018	0,166	0,05	No
Tl	2017	0,475	0,05	No
	2018	0,207	0,05	No
Pb	2017	0,019	0,05	Sí
	2018	0,082	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio AL-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Be	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Na	2017	0,214	0,05	No
	2018	0,727	0,05	No
Mg	2017	0,377	0,05	No
	2018	0,912	0,05	No
Al	2017	0,033	0,05	Sí
	2018	0,089	0,05	No
K	2017	0,094	0,05	No
	2018	0,615	0,05	No

Ca	2017	0,236	0,05	No
	2018	0,687	0,05	No
Ti	2017	0,027	0,05	Sí
	2018	0,092	0,05	No
V	2017	0,151	0,05	No
	2018	0,002	0,05	Sí
Cr	2017	0,155	0,05	No
	2018	0,485	0,05	No
Mn	2017	0,033	0,05	Sí
	2018	0,121	0,05	No
Fe	2017	0,02	0,05	Sí
	2018	0,396	0,05	No
Co	2017	0,21	0,05	No
	2018	0,959	0,05	No
Ni	2017	0,019	0,05	Sí
	2018	0,012	0,05	Sí
Cu	2017	0,002	0,05	Sí
	2018	0,006	0,05	Sí

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10 (Continuación). Resultado del análisis de varianza para comparar las medias de concentración de metales entre la época seca y la lluviosa en el sitio AL-01 para 2017 y 2018.

Metal	Año	Valor p	Significancia (α)	Medias estadísticamente diferentes
Zn	2017	0,001	0,05	Sí
	2018	0,226	0,05	No
As	2017	0,646	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Se	2017	0,391	0,05	No
	2018	0,481	0,05	No

Mo	2017	0,891	0,05	No
	2018	-	0,05	-
Ag	2017	-	0,05	-
	2018	-	0,05	-
Cd	2017	0,78	0,05	No
	2018	0,381	0,05	No
Sb	2017	0,66	0,05	No
	2018	0,23	0,05	No
Ba	2017	0,3	0,05	No
	2018	0,35	0,05	No
Hg	2017	0,496	0,05	No
	2018	0,319	0,05	No
Tl	2017	0,539	0,05	No
	2018	0,258	0,05	No
Pb	2017	0,013	0,05	Sí
	2018	0,851	0,05	No

Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Composición de los elementos mayores (en porcentaje másico) de la corteza continental superior⁸⁶

Elemento	Concentración (%m/m)
Na ₂ O	3,89
MgO	2,20
Al ₂ O ₃	15,17
K ₂ O	3,39
CaO	4,19
TiO ₂	0,50
MnO	0,07

⁸⁶ Rudnick, R. & Gao, S. (2003). Composition of Continental Crust. Treatise on Geochemistry (4): p. 1-51

FeO	4,49
-----	------

Fuente: Rudnick & Gao (2003)

Anexo 12. Composición estimada de los elementos traza (en $\mu\text{g/g}$) de la corteza continental superior⁸⁶

Elemento	Concentración ($\mu\text{g/g}$)
Be	3
V	107
Cr	85
Co	17
Ni	44
Cu	25
Zn	71
As	1,5
Se	0,05
Mo	1,5
Ag	0,05
Cd	0,098
Sb	0,2
Ba	550
Hg	0,056
Tl	0,75
Pb	17

Fuente: Rudnick & Gao (2003)