



# INFORME DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL CANTÓN DE BELÉN:

## AÑO 2012

**40** AÑOS  
*años*  
*Educación Superior por el bien común*



Municipalidad de  
*Belén*

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Licda. Sandra León Coto

Rectora Universidad Nacional

Ing. Horacio Alvarado Bogantes

Alcalde Municipalidad de Belén

Publicación de resultados generada en el marco del Programa de Cooperación UNA-Municipalidad de Belén Observatorio Ambiental del cantón de Belén, bajo la responsabilidad técnica de los siguientes funcionarios:

Licda. Dulcehé Jiménez Espinoza

Lic. Esteban Ávila Fuentes

Unidad Ambiental

Dr. Jorge Herrera Murillo

Coordinador Laboratorio de Análisis Ambiental UNA

Para obtener mayor información sobre el presente documento favor dirigirse a los correos electrónicos: [ambiental@belen.go.cr](mailto:ambiental@belen.go.cr), [jorge.herrera.murillo@una.cr](mailto:jorge.herrera.murillo@una.cr)

## Presentación

Los habitantes del cantón de Belén, al igual que el resto de la población del gran Área Metropolitana de Costa Rica, se encuentran expuestos a una compleja mezcla de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes diversas, las cuales se encuentran sujetas a procesos atmosféricos variados que las pueden transformar en otros tipos de contaminantes de carácter secundario. Inclusive, muchas de estas sustancias secundarias pueden causar problemas de salud e impactos en los ecosistemas mayores que los compuestos primarios. Los grupos más vulnerables a los efectos dañinos de una mala calidad del aire incluyen a niños, adultos mayores, personas con previos problemas de salud y población de bajos estratos socioeconómicos. Tanto la Organización Mundial de la Salud como el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) han resaltado la contaminación del aire ambiental como una de las áreas focales estratégicas para combatir las causas fundamentales de mortalidad y morbilidad a nivel mundial.

Para conocer y dimensionar este problema, la Municipalidad de Belén, con la colaboración del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, ha venido consolidando una Red de Monitoreo de Calidad del Aire para el cantón, con el objetivo de generar información cuantitativa confiable sobre el estado progresivo de la calidad del aire. Como cada año desde 2008, la Municipalidad y la Universidad presentan su informe anual de calidad del Aire para el cantón, el propósito de este documento es el de ofrecer a la población un análisis objetivo sobre la situación que guarda el monitoreo y la calidad del aire del cantón, en un contexto actual e histórico.

Con esta y otras medidas en materia de gestión de la calidad del aire el gobierno local trabaja permanentemente para garantizar a sus habitantes el derecho a gozar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. Además de la coordinación permanente con otras dependencias, es nuestra convicción el fomentar entre los habitantes del cantón su

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

participación en la solución de los problemas que ambientalmente nos aquejan y con ello mejorar nuestra calidad de vida.

Ing. Horacio Alvarado Bogantes

Alcalde Municipalidad de Belén

## Índice

Presentación	2
Índice	4
La contaminación del Aire	5
Área de estudio	¡Error! Marcador no definido.4
Contaminantes monitoreados	¡Error! Marcador no definido.7
Conclusiones	32
Referencias	34

## La contaminación del aire

La calidad del aire ambiente es una condición fundamental para garantizar la salud de la población a corto y largo plazo. Sin embargo el crecimiento urbano, ligado al aumento de densidad poblacional y actividades humanas, ha venido alterando esta condición al aumentar la contaminación del aire causando principalmente problemas a la salud humana. De acuerdo a estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que la contaminación del aire es responsable de alrededor de 2 millones de muertes prematuras al año en todo el mundo. Estos contaminantes se podrían entonces definir como las sustancias presentes en mayor concentración a la natural como resultado de la actividad humana y que ejerce un efecto pernicioso sobre el ambiente o sobre algo valioso para el ambiente (Figueruelo, 2004).

Para definir la calidad del aire y determinar si se está teniendo un impacto sobre una población, se estudian los niveles de algunas sustancias químicas clave cuya presencia en exceso se encuentra claramente asociada a una serie de problemas ambientales. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) ha venido estudiando desde 1970, la problemática de una mala calidad del aire, investigando sus causas, consecuencias y posteriormente estableciendo cuáles sustancias químicas se deben monitorear de forma prioritaria para determinar que tan buena o mala es la calidad del aire de una ciudad. Estas sustancias químicas clave son las que se conocen como “contaminantes criterio”, la USEPA ha incluido a 6 compuestos químicos los cuales son: ozono, partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, plomo. Estos contaminantes no fueron escogidos al azar, sino que dicha selección ha sido el resultado de una ardua investigación que demostró sus efectos perjudiciales hacia la salud y que el monitoreo continuo de estas sustancias químicas indica que suelen presentarse en concentraciones importantes y que sus variaciones de concentración en el aire están relacionadas a actividades humanas.

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Con el transcurso de los años se ha encontrado que existen otros contaminantes del aire no tan comunes y en concentraciones más bajas, pero que poseen una peligrosidad importante por su alta toxicidad e inclusive algunos tienen una alta probabilidad de provocar cáncer y/o defectos reproductivos. Estos contaminantes atmosféricos son los llamados “contaminantes tóxicos” o “contaminantes peligrosos” los cuales comprenden una lista de 187 compuestos químicos, entre los cuales están el benceno, percloroetileno, cloruro de metileno, dioxinas, asbestos, tolueno, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados como cadmio, mercurio y cromo. Los contaminantes del aire pueden tener su origen tanto de fuentes naturales como antropogénicas. La distribución en estas dos categorías va a depender de condiciones propias lugar como ubicación geográfica, características geofísicas, condiciones meteorológicas y actividades humanas. Entre las fuentes antropogénicas más importantes están el sector transporte y la industria en general (metalmecánica, agropecuaria, química, alimentaria, etc.). En el cuadro 1 se resumen algunos ejemplos de contaminantes del aire asociados a eventos de origen natural.

**Cuadro 1. Contaminantes asociados a fuentes naturales.**

<b>Evento</b>	<b>Posibles contaminantes del aire</b>
Actividad volcánica	Dióxido de azufre, partículas, metales pesados
Relámpagos	Dióxido de nitrógeno, ozono
Bosques	Compuestos orgánicos volátiles (terpenos y monoterpenos)
Erosión del suelo	Partículas
Suelo	Óxidos de nitrógeno
Incendios Forestales	Partículas, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono.

Los contaminantes del aire también pueden clasificarse de acuerdo a la manera en que se forman como primarios o secundarios. Los contaminantes primarios son las sustancias

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

vertidas directamente a la atmósfera desde las fuentes, por ejemplo las emisiones vehiculares y de calderas. En el caso de los contaminantes secundarios estos no se vierten directamente a la atmósfera desde focos emisores, sino que se forman en el seno de la misma a través de los procesos químicos y/o fotoquímicos que sufren los contaminantes primarios, y en varios casos son los causantes directos de los problemas de contaminación más importantes, como es caso del ozono troposférico. Algunos contaminantes pueden tener tanto origen primario como secundario, como es el caso de las partículas finas que se emiten desde procesos de combustión y a través de reacciones en la atmósfera.

Los efectos de estos contaminantes del aire a la salud pública son muy diversos y su grado afectación se ve influenciado por muchas otras variables como la susceptibilidad genética, estilo de vida, edad, padecimiento de otras enfermedades y otros factores ambientales. En el cuadro 2 se muestran de forma resumida los efectos más importantes que tienen algunos contaminantes del aire (criterio y tóxicos) sobre la salud humana y el medio ambiente (animales, plantas, visibilidad e infraestructuras). Además se incluye como algunos de estos contaminantes estudiados en Calidad del Aire repercuten a nivel climático al participar en procesos que pueden modificar los patrones meteorológicos observados a escala local y/o regional.

**Cuadro 2. Contaminantes criterio y sus efectos más importantes.**

Contaminante	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
<b>Partículas (PM)</b>	Pueden causar o agravar enfermedades cardiovasculares y pulmonares, afectar el sistema nervioso central, sistema reproductivo y provocar cáncer. Como resultado muerte prematura.	Afectan a los animales de forma similar que a los humanos. Afectan el crecimiento de plantas y procesos en ecosistemas. Pueden causar daños a edificios y visibilidad reducida.	Los efectos en el clima varían dependiendo del tamaño de partícula y su composición: algunas pueden enfriar otras calentar. Afectan los patrones de lluvias. Su deposición cambia el albedo superficial.



# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Contaminante	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
<b>Óxidos de Nitrógeno</b>	El NO <sub>2</sub> puede afectar el hígado, pulmón, bazo y sangre. Pueden agravar enfermedades pulmonares causando males respiratorios y aumentando la susceptibilidad a infecciones.	Contribuyen a la acidificación y eutrofización del suelo y el agua, provocando cambios en la diversidad de especies. Es un precursor de O <sub>3</sub> y PM. Puede dañar edificios.	Contribuye a la formación de O <sub>3</sub> y PM, efectos climáticos asociados.
<b>Monóxido de Carbono</b>	Provoca enfermedades del corazón y daños al sistema nervioso y causar dolor de cabeza, mareos y fatiga.	Pueden afectar a los humanos de forma similar que a los humanos.	Contribuye a la formación de GEI como CO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> .
<b>Plomo</b>	Afecta casi a cada órgano y sistema del cuerpo, especialmente el nervioso. Puede causar nacimientos prematuros, desarrollo mental disminuido y crecimiento reducido.	Se bioacumula e impacta adversamente tanto a sistemas terrestres como acuáticos. En la vida animal incluyen problemas reproductivos y cambios en la apariencia o comportamiento.	Sin efectos específicos.
<b>Arsénico</b>	En su forma inorgánica es cancerígeno. Conlleva a daños en la sangre, corazón, hígado y riñón. Puede también dañar el sistema nervioso periférico.	Altamente tóxico para la vida acuática, aves y animales terrestres. Suelos con alto contenido de As reducen el crecimiento de plantas y el rendimiento de cosechas. Los compuestos orgánicos de As son persistentes en el ambiente y pueden bioacumularse.	Sin efectos específicos.
<b>Cadmio</b>	Es cancerígeno especialmente como óxido. Puede causar daños al sistema reproductivo y respiratorio.	Tóxico para la vida acuática. Es altamente persistente en el ambiente y se bioacumula.	Sin efectos específicos.
<b>Níquel</b>	Varios compuestos con Ni están clasificados como cancerígenos. Puede causar alergias en la piel y afectar el sistema respiratorio e inmunológico.	Poseen una alta toxicidad aguda y crónica a la vida acuática. Puede afectar a los animales de forma similar que a los humanos.	Sin efectos específicos.
<b>Óxidos de Azufre (SO<sub>x</sub>)</b>	Agrava el asma y puede reducir la función pulmonar e inflamar el tracto respiratorio. Puede causar dolor de cabeza, malestar general y ansiedad.	Contribuye a la acidificación del suelo y aguas superficiales. Causa daños a la vegetación y pérdidas de especies locales en sistemas acuáticos y terrestres. Contribuye a la formación de PM con efectos ambientales	Contribuye a la formación de partículas con sulfato, enfriando la atmósfera.

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Contaminante	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
		asociados. Daños a edificios.	
<b>Ozono</b>	Puede disminuir la función pulmonar, agravar el asma y otras enfermedades pulmonares. Puede provocar mortalidad prematura.	Daños a la vegetación, afectar la reproducción de plantas y su crecimiento, además de disminuir el rendimiento de las cosechas. Puede alterar la estructura del ecosistema, reducir la biodiversidad y disminuir la absorción de CO <sub>2</sub> .	El ozono superficial es un GEI que contribuye al calentamiento de la atmósfera.
<b>Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)</b>	Es un cancerígeno que puede provocar leucemia y defectos de nacimiento. Puede afectar el sistema nervioso central y la producción normal de sangre, y puede dañar el sistema inmune.	Posee un efecto agudo en la vida acuática. Se bioacumula, especialmente en invertebrados. Provoca problemas reproductivos y cambios en la apariencia o comportamiento. Daña las hojas y causa la muerte en plantas.	El benceno es un GEI que contribuye al calentamiento de la atmósfera. También contribuye a la formación de O <sub>3</sub> y aerosoles orgánicos secundarios, los cuales pueden actuar como forzadores climáticos.

Para minimizar los efectos de estos contaminantes sobre la salud de la población y el ambiente, las agencias de protección ambiental alrededor del mundo han fijado valores de concentración máxima permitida para determinados períodos de exposición. Estos valores obligan a un control de las fuentes de emisiones que dan origen a estos contaminantes. A nivel internacional la Organización Mundial de la Salud (OMS) cuenta con unas guías para establecer valores de referencia para los contaminantes criterios, sin embargo cada país tiene la tarea de establecer sus propios límites fundamentados en estudios científicos. Este tipo de normativa es fundamental para mejorar la calidad de vida de las personas y debe ir de la mano de un programa de revisión y actualización que vaya proponiendo metas de reducción de los límites establecidos. De acuerdo a las guías de la OMS, por ejemplo una reducción de la contaminación por partículas (PM<sub>10</sub>) de 70 a 20 microgramos por metro cúbico permite reducir en aproximadamente un 15 % las muertes relacionadas con la

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

calidad del aire. En Costa Rica se cuenta con el Decreto No. 30221-S, publicado en el 2002 referente al Reglamento sobre inmisión de contaminantes atmosféricos, el cual regula la calidad del aire en el país estableciendo los valores de referencia para los contaminantes criterio y algunos considerados como tóxicos (cuadro 3).

**Cuadro 3. Valores máximos permitidos para contaminantes del aire regulados en el decreto 30221-S**

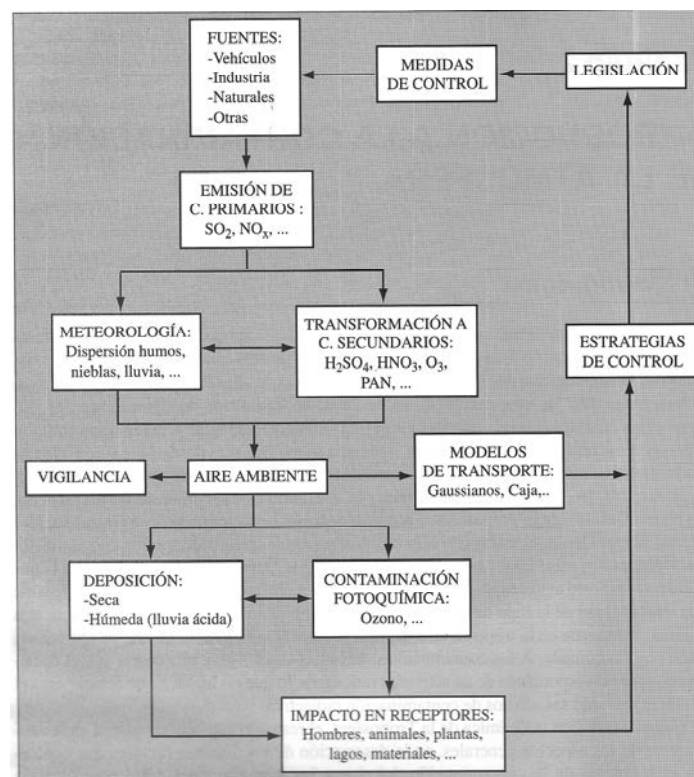
Contaminante	Valor de Referencia	Método de cálculo	Método de muestreo
Partículas Totales en Suspensión	90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio Anual	Alto Volumen
	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio 24 horas	
Partículas PM <sub>10</sub>	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio Anual	Alto Volumen
	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio 24 horas	
Dióxido de Azufre	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio Anual	Absorción Manual o Instrumental
	365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio 24 horas	
	1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio 3 horas	
Monóxido de carbon	10 $\text{mg}/\text{m}^3$	Promedio 8 horas	Infrarrojo no dispersivo
	40 $\text{mg}/\text{m}^3$	Promedio 1 hora	
Dióxido de Nitrógeno	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio Anual	Quimioluminiscencia
	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio 1 hora	
Ozono	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio 1 hora	Absorción UV
Plomo	500 $\text{ng}/\text{m}^3$	Promedio Anual	Alto volumen

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

La gestión de la calidad del aire comprende las actividades relacionadas con la protección y mejoramiento de la calidad del aire y requiere el cumplimiento de las siguientes etapas:

- Preparación de los criterios de salud ambiental y el establecimiento de normas de calidad del aire y de normas para la emisión de contaminantes de fuentes específicas
- Desarrollo de estrategias de control e implementación y operación de los mismos

La gestión de la calidad del aire en cualquier país involucra una compleja interacción entre las distintas variables que la componen como: legislación, vigilancia de la calidad del aire, fuentes de emisión e impactos al ambiente entre otros; tal y como se ilustra en la siguiente figura.



**Figura 1.** Dinámica de la gestión de la calidad del aire.

Por definición, el monitoreo o vigilancia de la calidad del aire es una actividad consistente en observar una situación para detectar los cambios que ocurren con el tiempo. De esta

manera, el monitoreo de la calidad del aire se debe llevar a cabo de una manera continua para poder observar los cambios en las concentraciones de los contaminantes con el tiempo, y se define como el conjunto de metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua y sistemática las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire. Esto lo hace diferente al muestreo y análisis de contaminantes. Sin embargo, por lo común se confunden las dos actividades y casi siempre se habla sólo de monitoreo.

El monitoreo sirve de herramienta para la identificación y evaluación de problemas de la calidad del aire (OMS, 2000). El monitoreo, junto con los modelos de predicción y los inventarios de emisiones, son parte integral de la gestión de la calidad del aire. Ésta se encuentra directamente vinculada con el cumplimiento de objetivos económicos, de evaluación y de regulación. En el desarrollo de un plan efectivo de gestión de la calidad del aire es necesario contar con información confiable relacionada con los niveles de contaminación en el aire a través del monitoreo. El propósito más importante del monitoreo de la calidad del aire es generar y proporcionar la información necesaria a científicos, legisladores y planificadores para que ellos tomen las decisiones adecuadas a favor de la gestión y mejora del medio ambiente. El monitoreo juega un papel regulador en este proceso proporcionando la base científica para el desarrollo de las políticas y estrategias, en el establecimiento de objetivos durante la evaluación del cumplimiento de las metas y en la ejecución de las acciones.

Si bien la gestión de la calidad del aire se viene manejando desde hace más de 15 años en Costa Rica, es un tema relativamente nuevo comparado a la trayectoria e importancia que otros países le han dado. El país es pionero a nivel centroamericano en temas de regulación de emisiones en fuentes fijas (Decreto No. 36551-S-MINAET-MTSS) y al control de las emisiones de fuentes vehiculares mediante la revisión técnica vehicular. Además de ser el primero en crear un Plan para la Mejora de Calidad del Aire en el Área Metropolitana y elaborar un inventario de emisiones de contaminantes criterio y tóxicos.

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Desde el año 2003 el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (antes conocido como PECAire), viene realizando de forma continua el monitoreo de la calidad del aire en el cantón central de San José, en sus inicios, y posteriormente en toda el Área Metropolitana. En el caso del cantón de Belén, las actividades de monitoreo inician en el año 2007 y cuentan con el apoyo de la municipalidad que ha servido como un aliado fundamental en la continuidad de este proyecto.

## Área de Estudio

### **Geografía:**

Belén es el cantón sétimo de la provincia de Heredia, ubicado entre las coordenadas geográficas medias 09º 59' 14" latitud norte y 84º 00' 38" longitud oeste. Posee una extensión territorial de 11.81 km<sup>2</sup> y según el último censo, Belén posee una población de 19 834 habitantes de los cuales un 49.4% son hombres y 50.6% mujeres. Su densidad es de 1632 habitantes por kilómetro cuadrado. Se localiza al norte del río Virilla y al sur del río Segundo, separado por una distancia aproximada de 10 km de la ciudad de San José, capital de Costa Rica, y a 4 km del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Belén limita al este con los cantones de Heredia y Flores, al norte y al oeste con el cantón de Alajuela, al sur con los cantones de Santa Ana, Escazú y San José.

La topografía del cantón es plana, el sistema fluvial del cantón de Belén, pertenece a la cuenca del río Grande de Tárcoles, es drenado por el río Bermúdez y su afluente la Quebrada Seca; así como por los ríos Segundo y Virilla, que son límites cantonales; posee una altitud promedio de 915 metros sobre el nivel del mar. Geológicamente esta formado por materiales de origen volcánico.

### **Condiciones Climatológicas:**

Anualmente y en promedio para la zona se tienen pluviosidades de 2059 milímetros, en donde se refleja un marcado periodo seco que va de diciembre a marzo, con un promedio de precipitaciones para esos meses de 17,6 milímetros, para los meses de mayo y junio se presenta el primer pico fuerte de lluvias arriba de los 250 milímetros mensuales y ya en los meses de septiembre y octubre se presenta el periodo de mayores lluvias con promedios mensuales arriba de los 335 milímetros.

Los promedios mensuales de temperaturas, no presentan mayores rangos de diferenciación, así se tiene que la temperatura media mensual fluctúa entre los 22,4 y 24,0 °C, la mínima entre los 17,5 y 18,4 y la máxima entre los 27,1 y 29,7. Evidentemente, los menores rangos de temperatura tienen una relación directa con los vientos alisios provenientes del hemisferio Norte en época de invierno.

Los promedios mensuales de velocidades de vientos, igualmente guardan una relación directa con la influencia de los vientos alisios provenientes del hemisferio Norte, es así como se encuentran velocidades de 12,1 Km/h en el mes de septiembre y 26,1 Km/h en el mes de febrero.

Los promedios mensuales de humedad relativa son altos y van desde un 65% en la época seca hasta un 86%, en el mes de septiembre (Cubero, 2009).

### **Geología:**

El cantón de Belén se localiza en el Arco Interno de Costa Rica; en el Valle Central; con base en Denyer y Arias (1991); las formaciones del subsuelo corresponden a unidades de roca de origen volcánico efusivo, las cuales estratigráficamente se han dividido en las siguientes formaciones geológicas:

- ***Formación Lavas Intracañón***

Se trata de por lo menos siete coladas de lava andesíticas que cerca del Puente de Mulas presenta una intercalación de 35 metros de un depósito de un flujo de bloques y cenizas, afloran solamente en los profundos valles de los ríos Virilla y Tiribí. Localmente presenta una intercalación de una toba de flujo brechosa (Miembro Puente de Mulas), el espesor total de la Formación Lavas Intracañón es de casi 100 m; (Kussmaul, 1994).



- **Formación Avalancha Ardiente**

Encima de las lavas intracañón yace una capa de pómez con un espesor máximo de 3 metros, producto de una gran explosión volcánica, seguido por depósitos de flujos piroclásticos con un espesor promedio de 45 metros. La base de esta formación está compuesta por una capa de pómez de caída de hasta 3 m de espesor, seguida por flujos de ceniza ricos en bombas escoriáceas, lapilli y clastos líticos.

- **Formación Lavas Pos-avalancha**

Con este nombre se denomina a varias coladas de lava y depósitos piroclásticos que se originaron en la Cordillera Volcánica Central y forman parte del grupo Volcánico Central; se considera que la mayor parte de los materiales de esta formación provienen del macizo del volcán Barba; (Echandi, 1981, en Denyer & Arias, 1991). Está compuesta por coladas de lava andesíticas y andesíticas basálticas con espesores que van desde los 10 m hasta los 80 con intercalaciones que van de aproximadamente 10 metros de ceniza volcánica y ocasionalmente lapilli, (Denyer y Arias, 1991). La sección tipo está al sureste de la población de Barba de Heredia, en la margen izquierda de la quebrada Barba, (Gómez, 1984). Esta formación geológica se localiza en la parte norte del cantón de Belén; en donde afloran los frentes de coladas de lavas andesíticas de la parte inferior (Miembro Bermúdez); las cuales están cubiertas por tobas y cenizas meteorizada.

### **Aspectos Socioeconómicos:**

El uso de la tierra en Belén es bastante variado. Se encuentran zonas de residenciales, zonas industriales y hasta zonas de protección. Dentro de sus actividades económicas están la industrial, la turística y la comercial. Según datos de la Municipalidad de Belén, el cantón cuenta con 73 industrias, de las cuales 33 tienen un rango de empleados que va desde 250

hasta 2500. Además cuenta con al menos 326 comercios, varios hoteles grandes y pequeños, clubes privados y centros de recreación.

De acuerdo a la estructura productiva del cantón de Belén, se puede mencionar que de las empresas ubicadas en este municipio; el sector de comercio y servicios ocupa el 62,20% en comparación con el sector Industrial con un 30,71% y por último el sector agropecuario con un 7,09%; según información de la CCSS del 2006 (Municipalidad de Belén, 2007).

El cantón de Belén cuenta con la mayoría de servicios públicos. Además posee, según la Municipalidad, 7 398 km de carretera pavimentada y 2 km de carreteras lastreadas. La mayoría de su infraestructura vial se encuentra en buen estado, así como el alcantarillado pluvial. Entre los servicios públicos se encuentra el alcantarillado pluvial, acueducto municipal, recolección y tratamiento de basura, servicio de limpieza de vías y servicio de cementerio (Municipalidad de Belén, 2007).

De acuerdo con la Municipalidad de Belén, el cantón cuenta con un índice de desarrollo social del 94,9%, ocupando el segundo lugar en el país. Al compararlo con el resto de cantones de la provincia de Heredia se encuentra una diferencia de 23,5%. Su índice de pobreza, sin embargo, se encuentra en aumento.

## Contaminantes Monitoreados:

### Partículas

#### *Descripción:*

El material particulado forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. El tamaño del material particulado varía desde 0,005 hasta 100 micrómetros de diámetro aerodinámico, esto es, desde unos cuantos átomos hasta el grosor de un cabello humano.

Las partículas se forman por procesos naturales como la polinización de las plantas e incendios forestales y por fuentes antropogénicas que abarcan, desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas. Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, como partículas primarias y pueden formarse partículas secundarias cuando reaccionan algunos gases en la atmósfera tales como: los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, el amoníaco, los compuestos orgánicos, etc.

Hace unos quince años su estudio y regulación ambiental se centraba en las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son menores de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico. Posteriormente, la atención se centró en las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ , y hasta hace apenas unos años en las partículas finas y ultrafinas, es decir, las menores a 2,5 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Así, las llamadas  $\text{PM}_{10}$  se pueden dividir, por su tamaño, en las fracciones gruesa, fina y ultrafina, siendo la fracción gruesa la compuesta por partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2,5 y 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5-10}$ ); la fracción fina que incluye aquellas partículas con diámetro aerodinámico menor a 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ), y finalmente, la fracción ultrafina que incluye a las partículas menores de 1  $\mu\text{m}$ .

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Entre más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente hasta el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus inherentes características fisicoquímicas. En varios estudios, llevados a cabo en Estados Unidos y en Europa, se ha encontrado que la exposición prolongada a partículas finas provenientes de la combustión es un factor importante de riesgo ambiental en casos de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardiopulmonares (Pope et al., 2002).

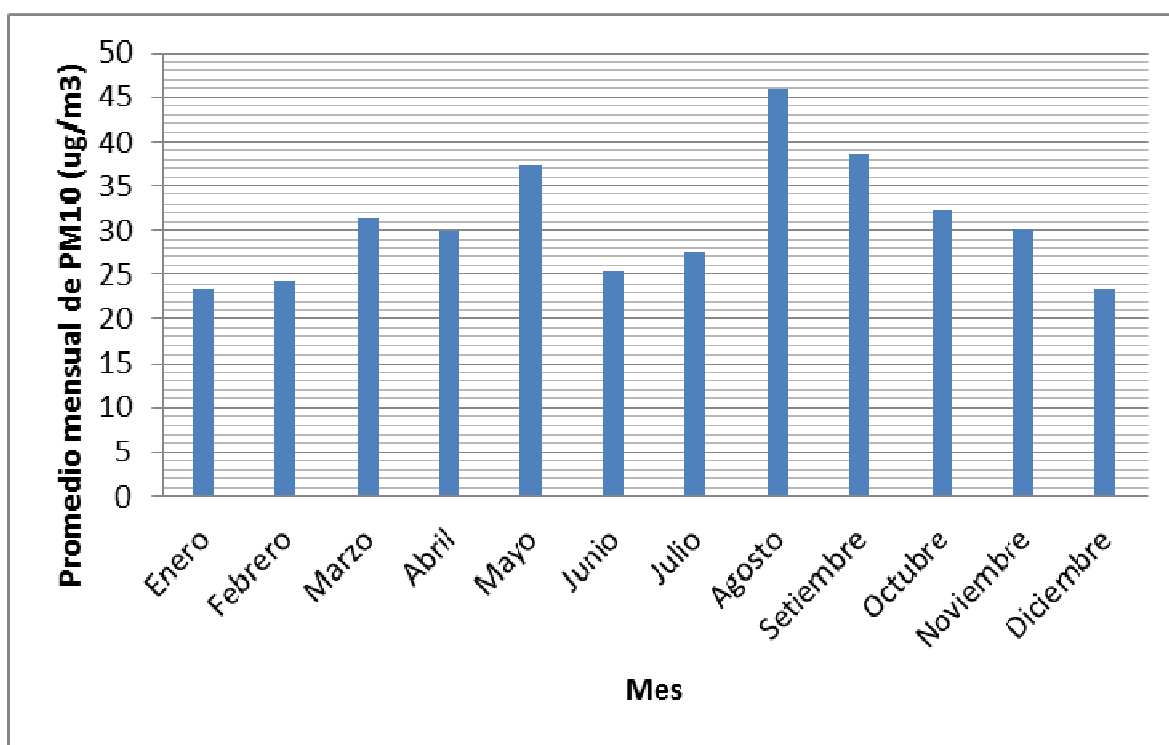
### *Resultados 2012:*

**Cuadro 4. Resultados de concentración de partículas PM<sub>10</sub> registrados durante el año 2012 en el cantón de Belén.**

Estación	Datos Válidos	Promedio Anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valor Máximo registrado en 24 horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Límites
Centro Comercial La Ribera	130	32 ± 12	86	Costa Rica Anual: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas: 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
La Asunción	136	53 ± 16	115	Unión Europea Anual: 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ OMS Anual: 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

Tal como se puede observar en el cuadro 4, durante el año 2012 únicamente el sitio de monitoreo ubicado en La Ribera cumple tanto el límite de exposición aguda de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con el límite de exposición crónica de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  contemplados en el decreto 30221-S “Reglamento de Inmisión de Contaminantes de Costa Rica”. En cuanto a la normativa internacional, las concentraciones superan el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud.



**Figura 2. Evolución de los promedios mensuales de partículas  $\text{PM}_{10}$  registrados en el sitio de monitoreo del cantón de Belén, año 2012**

Las mayores concentraciones de partículas  $\text{PM}_{10}$  se registraron durante los meses de agosto y setiembre, en donde por ejemplo se registraron promedios mensuales de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Como resultado importante, se puede mencionar que durante el año 2012, los dos sitio de muestreo presentaron concentraciones que resultaron no ser significativamente diferentes a las obtenidas en el los años 2010 y 2011 (cuadro 5).

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

**Cuadro 5. Tendencia de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> registradas en el cantón de Belén, 2008-2012.**

Sitio de Monitoreo	Promedio Anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				
	2008	2009	2010	2011	2012
Centro Comercial La Ribera, Belén	41	38	34	33	32
La Asunción			52	53	54

Contrario a lo ocurrido con las PM<sub>10</sub>, las partículas con diámetros menores o iguales a 2,5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2,5</sub>) registran concentraciones (cuadro 6) que incumplen la normativa internacional tanto para exposición aguda como crónica, en el sitio de monitoreo de La Asunción. Es importante aclarar que el decreto 30221-S no contempla valores criterio para este contaminante. De esta forma de cada 100 días en donde se realizó monitoreo de la calidad del aire en el sitio antes mencionados, solamente en 78 días se cumplen las normas internacionales para PM<sub>2,5</sub>.

La relación entre la concentración de partículas PM<sub>2,5</sub> con respecto a las PM<sub>10</sub> corresponde a 0,65-0,72, esto indica que aproximadamente el 66% de las partículas PM<sub>10</sub> corresponden a partículas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a 2,5  $\mu\text{m}$ . Este valor es similar a 0,60 reportado por Dockery y Pope (1994) para centros urbanos en Norteamérica.

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

**Cuadro 6. Resultados de concentración de partículas PM<sub>2,5</sub> registrados durante el año 2012 en el cantón de Belén.**

Estación	Datos Válidos	Promedio Anual (µg/m <sup>3</sup> )	Valor Máximo registrado en 24 horas (µg/m <sup>3</sup> )	Límites
La Asunción	117	34 ± 13	68	Estados Unidos Anual: 15 µg/m <sup>3</sup> 24 horas: 35 µg/m <sup>3</sup> OMS Anual: 10 µg/m <sup>3</sup> 24 horas: 25 µg/m <sup>3</sup>

Al analizar la composición química de las partículas colectadas, tanto en PM<sub>10</sub> o PM<sub>2,5</sub> (cuadros 7 y 8) se puede determinar que el sulfato, el fosfato y el cloruro resultan ser los iones predominantes. El ion sulfato presente en las partículas tiene un origen secundario y proviene de la conversión atmosférica del dióxido de azufre, tanto por vía húmeda como seca. Al contrario del sulfato, tanto el cloruro como el fosfato se originan como componentes primarios cuya fuente principal es el aerosol marino y el polvo de suelo, respectivamente.

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

**Cuadro 7. Composición iónica de las partículas PM<sub>10</sub> colectadas durante el año 2012 en el cantón de Belén.**

Sitios de monitoreo	Fluoruro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cloruro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nitrito ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Bromuro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nitrato ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Fosfato ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Sulfato ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
La Ribera	0,41 ± 0,22	1,28 ± 0,49	0,27 ± 0,15	0,20 ± 0,05	0,86 ± 0,22	0,95 ± 0,34	3,46 ± 1,26
La Asunción	0,37 ± 0,13	1,43 ± 0,65	0,36 ± 0,13	0,25 ± 0,05	0,95 ± 0,39	1,09 ± 0,46	3,97 ± 0,85

**Cuadro 8. Composición iónica de las partículas PM<sub>2.5</sub> colectadas durante el año 2012 en el cantón de Belén.**

Sitios de monitoreo	Fluoruro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cloruro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nitrito ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Bromuro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nitrato ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Fosfato ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Sulfato ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
La Asunción	0,23 ± 0,17	0,65 ± 0,21	0,18 ± 0,06	0,12 ± 0,09	0,49 ± 0,36	0,45 ± 0,23	2,90 ± 0,76

Si se realiza un análisis de reconstrucción másica de aerosoles (ARM) a los datos de composición química obtenidos tanto para partículas PM<sub>10</sub> como PM<sub>2,5</sub>, se pueden determinar las contribuciones relativas de las diversas especies químicas inorgánicas y orgánicas en la composición de las partículas. Para lograr este propósito, los componentes químicos se agruparon en seis categorías: material cristal (polvo de suelo) (MC), elementos traza (ET), materia orgánica (MO), carbono elemental (CE), aerosol marino (AM) e iones secundarios (IS). El MC representa la suma de los materiales provenientes del suelo, incluyendo el Al, K, Fe, Ca, Mg, Ti y Si. Cada una de estas especies se multiplican por el factor apropiado para expresarlos en forma de sus óxidos más comunes utilizando la siguiente ecuación (Marcazzan et al, 2001 y Hueglin et al, 2005):



## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

$$CM = 1,89Al + 1,21K + 1,40Ca + 1,66Mg + 2,14Si + 1,43Fe \quad (1)$$

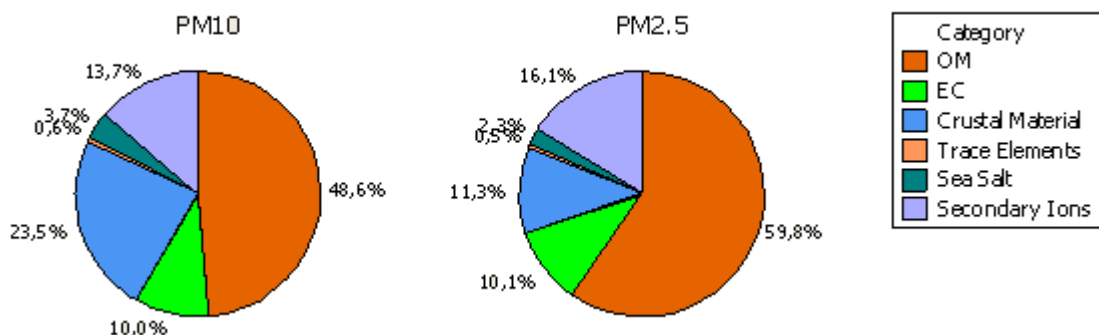
Los óxidos de Ca y Mg se calcularon utilizando la porción no proveniente de aerosol marino (NAM) de Ca y Mg. La MO se obtuvo multiplicando la concentración medida de carbono orgánico (CO) por un factor de 1,6, que se basa en un promedio de las proporciones recomendadas de  $1,6 \pm 0,2$  para los aerosoles urbanos y  $2,1 \pm 0,2$  para los aerosoles no urbano (Turpin y Lim, 2001). Este factor se utiliza comúnmente para estimar el hidrógeno y el oxígeno no medido en los compuestos orgánicos. La contribución del aerosol marino representa las partículas en forma de sal de mar fresca. Se calcula como la suma de la concentración de ión cloruro más la fracción atribuible al aerosol marino de las siguientes especies iónicas  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  de acuerdo con la siguiente ecuación (Seinfeld y Pandis, 2006):

$$AM = Cl^- + AMNa^+ + AMMg^{2+} + AMK^+ + AMCa^{2+} + AMSO_4^{2-} \quad (2)$$

donde  $AMNa^+ = 0,556Cl^-$ ,  $AMMg^{2+} = 0,12AMNa^+$ ,  $AMK^+ = 0,036AMNa^+$ ,  $AMCa^{2+} = 0,038AMNa^+$  y  $AMSO_4^{2-} = 0,252AMNa^+$  (Terzi et al., 2010). La contribución de CE se determinó por la técnica de reflectancia térmico-óptica. La contribución de IS se calculó como la suma de NAM  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ , donde NAM  $SO_4^{2-}$  es total de  $SO_4^{2-}$  medido menos la fracción de sulfato proveniente de la sal marina. Los elementos traza también fueron convertidos en sus óxidos comunes. Los elementos traza sólo representan un pequeño porcentaje de la masa total de las partículas, sin embargo, fueron también añadidos al análisis porque tienen una gran importancia ambiental debido a su toxicidad y su origen antropogénico. La contribución de los ET se calculó utilizando la siguiente ecuación (Marcazzan et al., 2001):

$$TE = 1,47V + 1,29 \text{ Mn} + 1,27\text{Ni} + 1,25\text{Cu} + 1,08 \text{ Pb} + 1,31\text{Cr} \quad (3)$$

Los coeficientes de la ecuación 3 representan un factor gravimétrico para obtener los correspondientes óxidos. Las concentraciones máscas obtenidas y los resultados de la reconstrucción muestran una correlación general fuerte, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) oscilan entre 0,61 hasta 0,76, lo que indica en general una buena concordancia entre la masa reconstruida y la masa gravimétrica. Los principales componentes de las partículas  $PM_{10}$  (Figura 3) en los dos sitios de muestreo fueron la materia orgánica (MO) (26,5-50,1 %), el carbono elemental (CE ) (6,2 a 11,8 %) y el material crustal ( 21,7 a 32,9%). Los principales componentes de las  $PM_{2,5}$  fueron OM + EC (47,3 a 70,5 %), y los iones secundarios (18,1-29,2 %). La contribución de los aerosoles marinos varió entre el 4 y el 7% para los dos sitios de muestreo presentando una base bastante regular. Esto evidencia que la contribución de este componente se debe más a los fenómenos a escala regional. Los niveles de materia orgánica y carbono elemental (OM + EC) resultaron ser más altos para el sitio de muestreo ubicado en La Asunción. Estos resultados muestran la importancia de la contribución de los procesos de combustión de la composición de las partículas finas. Los metales traza representan la contribución más pequeña de todos los sitios de monitoreo.



**Figura 3. Contribución de la cada uno de los componentes a las partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> colectadas en el sitio de muestreo ubicado en La Asunción 2012.**

## Dióxido de Nitrógeno:

### *Descripción:*

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un gas de color rojo pajizo, de olor irritante, que reacciona fácilmente con el agua para producir ácido nítrico y óxido nítrico; desempeña un papel importante en la formación de ozono y partículas secundarias.

Se produce durante la combustión a altas temperaturas en procesos industriales, la quema de combustibles fósiles y de la reacción entre el nitrógeno y oxígeno atmosféricos durante tormentas eléctricas. La exposición a altas concentraciones de este contaminante ocasiona irritación en las vías respiratorias, daño en la membrana celular del tejido pulmonar y agrava los síntomas en personas con enfermedades respiratorias crónicas. La exposición repetida a altas concentraciones puede ocasionar muerte celular en el tejido pulmonar. Los efectos del NO<sub>2</sub> en la salud humana se centran sobre todo en el aparato respiratorio, habiéndose observado que cuando se supera una concentración media de NO<sub>2</sub> de 190 µg/m<sup>3</sup> (0,1 ppm) en el 40% de los días, aumenta la frecuencia de las infecciones de las vías respiratorias.

Se ha comprobado que el NO<sub>2</sub> provoca daños al parénquima pulmonar, e incluso ante exposiciones crónicas a concentraciones bajas el resultado es la aparición de cambios patológicos semejantes a los del enfisema pulmonar. Adicionalmente, determina la inhibición de la depuración mucociliar, la fagocitosis y la respuesta inmunológica en el pulmón, produciendo una disminución de la resistencia del pulmón ante las infecciones. Por último, incrementa la sensibilidad pulmonar a los broncoconstrictores, afectando, por lo tanto, especialmente a las personas asmáticas. Otros efectos son sensación de ahogo y dolor en el pecho. Los niveles bajos de óxidos de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones, y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones 1 ó 2 días después de la exposición. Respirar altos niveles de óxidos de nitrógeno puede rápidamente producir quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos en la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo la oxigenación de los tejidos del cuerpo, produciendo acumulación de líquido en los pulmones y la muerte. El contacto con la piel o los ojos puede producir quemaduras.

Se desconoce si la exposición a dióxido de nitrógeno puede afectar la reproducción en seres humanos. Los asmáticos son especialmente sensibles a los efectos del NO<sub>2</sub>, se ha encontrado que el 70% de los asmáticos responden a concentraciones más bajas que las personas sanas (90-560 µg/m<sup>3</sup> (0,05-0,3 ppm) frente a mayor de 1880 µg/m<sup>3</sup> (1 ppm) en personas sanas).

# INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

## **Resultados 2012:**

**Cuadro 9. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno obtenidos en el cantón de Belén durante el año 2012.**

<b>Sitio de Muestreo</b>	<b>Promedio Anual 2011 (ug/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Promedio Anual 2012 (ug/m<sup>3</sup>)</b>
Antiguo Hotel Herradura	42	45
Costado sur Plaza de Deportes La Asunción	44	46
Residencial Cariari	19	20
Costado Norte de la Firestone	31	36
Frente al Hotel Marriot	25	27
Frente a Iglesia católica La Ribera	24	26
Parque recreativo Ojo de Agua	28	30
Costado Norte Municipalidad de Belén	42	44
Polideportivo Belén	20	18
Cruce Belén – Santa Ana	40	40
Antigua Kimberly Clark	19	21

Para el muestreo y análisis de las concentraciones de dióxido de nitrógeno en aire se utiliza el método pasivo, el cual tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de

penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas hasta repartirse uniformemente en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación.

En el cuadro 9 se presentan el promedio anual de las concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en el cantón de Belén durante el año 2012. Tal como se puede notar al menos cuatro sitios en Belén presentan valores mayores a 40 µg/m<sup>3</sup>, que corresponde al valor anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante.

Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo vehicular en donde se llegan a alcanzar excedencias de hasta un 15% con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud. Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 11 y 13% para sitios comerciales e industriales respectivamente. Es importante indicar que esta tasa aumento ligeramente con respecto a la registrada en años anteriores donde se registraban incrementos de hasta 10% para zonas comerciales de alto flujo vehicular.

## Deposición Total:

### *Descripción:*

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

Para caracterizar la acidez de las precipitaciones se usa la escala de pH que indica la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) responsables de la acidez. En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5.6, esta acidez se debe al dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera y que reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Cuando el depósito húmedo tiene una mayor acidez el valor de pH es menor a 5,60 y se considera como precipitación ácida o lluvia ácida.

El incremento de la acidez en el agua de lluvia se debe, principalmente, a reacciones químicas en la atmósfera de los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno emitidos durante la combustión, en presencia de agua. Los precursores de la lluvia ácida pueden viajar cientos de kilómetros desde las fuentes de emisión y provocar gran variedad de impactos en una amplia región geográfica (US Environmental Protection Agency, 2010).

En ecosistemas terrestres y acuáticos, la lluvia ácida puede ocasionar la declinación de especies, no obstante, esto también depende del tiempo de exposición y del nivel de sensibilidad. En la vegetación puede causar daños directos como pérdida de nutrientes foliares y necrosis en hojas y tejidos reproductores, lo que conduce al debilitamiento de la planta, pérdida de frutos y descenso en la productividad, sin embargo, los efectos indirectos pueden ser mayores. La acidificación progresiva del suelo origina la pérdida de cationes básicos y acumulación de aluminio, inhibiendo la fijación de nitrógeno en leguminosas, la biodisponibilidad de fosfatos y el crecimiento de las raíces. Esto conduce

## INFORME DE CALIDAD DEL AIRE: AÑO 2012

a la defoliación, clorosis y debilitamiento generalizado de la planta, haciéndola vulnerable al ataque de plagas, enfermedades, sequías u otros contaminantes. La degradación del suelo, también se manifiesta en aguas superficiales y mantos freáticos a través de procesos de acidificación, eutrofización y acumulación de metales tóxicos como el aluminio, que ocasionan la muerte progresiva de organismos acuáticos (Krupa, 1999; Larssen *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2006, US Environmental Protection Agency, 2010).

### **Resultados 2012:**

**Cuadro 10. Composición química de las muestras de depositación total colectadas en Belén durante el año 2012.**

<b>Sitios de muestreo</b>	<b>pH</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> mg/l	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> mg/l	<b>Cl<sup>-</sup></b> mg/l	<b>F<sup>-</sup></b> mg/l	<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b> mg/l
La Ribera	4,67	2,60	0,67	0,74	0,12	0,30
La Asunción	4,33	2,89	0,89	0,86	0,12	0,33

Los resultados de 2012 (cuadro 10) indican que la acidez de la lluvia presentó poca variabilidad espacial con valores promedio de pH entre 4,33 y 4,67. El valor promedio más ácido se obtuvo en la estación ubicada en el La Asunción, con un pH de 4,33. A pesar de que los datos de pH indican cierta homogeneidad en la distribución de la acidez, es probable que en el sector industrial del cantón sean mayores los efectos de la lluvia ácida, ya que suele ser mayor el porcentaje de muestreos ácidos en esta zona. Los resultados



igualmente muestran un patrón de concentraciones de sulfato y nitrato mayores en esa región. Esto se explica porque los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) generados por la quema de combustibles fósiles en la zona urbana e industrial, pueden ser transportados varios kilómetros en la dirección del viento predominante, antes de que concluyan las reacciones químicas que dan origen a la acidez de las precipitaciones y finalmente se depositen en forma de sulfatos y nitratos. De ahí que la acidez del agua de lluvia se correlacione con la cantidad de sulfatos y nitratos. El tiempo medio de permanencia en la atmósfera para el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es de un día, mientras que el estimado para óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), es de uno a cuatro días (Wallace y Hobbs, 2006). Debido a este tiempo de vida relativamente corto, los efectos de la lluvia ácida se circunscriben a una escala local o regional, pero no a una global.

Además del análisis de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), en las muestras de depósito húmedo se determina la concentración de iones: cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ). La presencia de estos iones en el agua de lluvia es producto de la contribución de diferentes fuentes de contaminación, de los procesos de transformación y del transporte en la atmósfera. Los resultados proporcionan información importante para la identificación de fuentes y mejorar el conocimiento sobre la dinámica atmosférica regional. La composición de las precipitaciones también proporciona información para entender los procesos de acidificación en suelos y aguas, ya que el valor del pH es resultado del balance que existe entre los componentes.

## CONCLUSIONES

1. Los valores de PM<sub>10</sub> registrados en los dos sitios de monitoreo ubicados en el cantón de Belén mostraron una tendencia a la estabilización con respecto al año 2011. Lo anterior podría hacer pensar en que el efecto de la mejora de los combustibles realizados por RECOPE dejó de impactar en forma positiva a la mejora ambiental del cantón.
2. Los niveles de partículas finas registrados en el cantón de Belén, superan las normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Lo anterior, requiere de la formulación de un plan integral de intervención que permita entre otros: establecer normas nacionales para este contaminante, vigilancia sistemática de las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> en los distintos centros urbanos, identificación exhaustiva de las principales fuentes emisoras y el establecimiento de las estrategias a ser implementadas para la reducción de las mismas.
3. El carbono orgánico y elemental resultaron ser en la mayoría de sitios de medición, el principal contribuidor a la masa de PM<sub>2,5</sub>. La mayoría de este carbono orgánico y elemental proviene mayoritariamente de emisiones vehiculares a partir de unidades con motores diesel y gasolina en zonas residenciales y comerciales, mientras que la combustión en fuentes fijas muestra una contribución importante para sitios industriales.
4. Las principales fuentes que determinan la composición química de las partículas PM<sub>2,5</sub> son los aerosoles secundarios, el tráfico rodado, el material crustal, aerosol marino, la quema de combustibles residuales y las actividades industriales.
5. A partir de la identificación de las fuentes que contribuyen a los niveles de PM<sub>2,5</sub> se hace necesario inventariar, con la mayor exactitud posible cada una de ellas, con el fin de determinar las emisiones reales generadas, como punto de partida para poder

establecer las políticas y planes requeridos para lograr una reducción sistemática de este contaminante.

6. Existe una tendencia a incrementar el grado de acidificación de las muestras de precipitación total, ya que el número de eventos al año con pH inferior a 5,60 esta incrementado a una tasa de 18,9% anual en el período 2007-2012, razón por la cual se debe explorar más a fondo las causas de este fenómeno
7. Persiste el crecimiento en los niveles de dióxido de nitrógeno en sitios comerciales e industriales del cantón de Belén.

## REFERENCIAS

Figueruelo, J.E. Química física del ambiente y de los procesos medioambientales. Editorial Reverte, México 2004, pp 69-75.

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

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

Marcazzan, S., Vaccaro, G., Vecchi, R., 2001 Characterisation of PM10 and PM2.5 particulate matter in the ambient air of Milan (Italy). *Atmospheric Environment* 35, 4639–4650.

Organización Mundial de la Salud. (2000). Air Quality Guidelines for Europe. Regional Office for Europe. European Series. No. 91. 2a. ed. Copenague.

Pérez, M.; Cetina, V.; Aldrete, A., Fenn, M. E.; Landois, L. (2006). "Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México". *Agrociencia*. 40(002): 239-248. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., 2006. Atmospheric Chemistry and Physics—From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, Inc, New York.

Terzi, E., Argyropoulos, G., Bougatioti, A., Mihalopoulos, N., Nikolaou, K., Samara, C., 2010. Chemical composition and mass closure of ambient PM<sub>10</sub> at urban sites. *Atmospheric Environment* 44, 2231–2239.

US Environmental Protection Agency. (2010). Our Nation's Air. Status and trends through 2008. Publicación no. EPA-454/R-09-002.