

Informe de Calidad del Aire en el Cantón de Belén: Año 2011



PRESENTACIÓN

El aire es un bien común al que todas y todos tenemos derecho. Por ello el Observatorio Ambiental de la Municipalidad de Belén tiene dentro de sus tareas más importantes el desarrollo de un riguroso plan de medición de los niveles de contaminantes criterio a los cuales se encuentran expuestos los habitantes del cantón, utilizando para ello metodologías capaces de generar resultados con altos niveles de confiabilidad y representatividad. Estos datos no solamente son el resultado de un programa de vigilancia ambiental sino que están encaminados a ser indicadores que permitan retroalimentar los planes y políticas que a nivel municipal se están desarrollando en materia de gestión ambiental.

En octubre del año 2011, el Observatorio Ambiental presentó al Consejo Municipal de Belén el “Plan para mejorar la calidad del aire de Belén” orientado principalmente a reforzar mecanismos de seguimiento y supervisión de los niveles de emisión de las fuentes fijas, fomento del uso de transporte público en el cantón, definiciones de necesidades de infraestructura vial cantonal en términos de aumentar la velocidad de circulación en el cantón y educación ambiental entre otras.

Mediante el monitoreo continuo y permanente de la calidad del aire es que se le da seguimiento a las políticas que se están implementado en esta materia, y se logra medir el grado de eficiencia de las mismas, además de compartir con los habitantes del cantón los avances que en materia de gestión de calidad del aire se vayan obtenido. La información presentada en este informe es el resultado de un trabajo de equipo realizado por el personal técnico-operativo del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional y la Unidad Ambiental de la Municipalidad de Belén.

Ing. Horacio Alvarado B

Alcalde Municipal

INDICE

	Página
Presentación	2
Índice	3
Introducción	4
Características de la red de monitoreo del cantón de Belén	6
Resultados Año 2011	10
Conclusiones	29
Referencias	30

INTRODUCCION

El aire es el fluido que forma la atmósfera de la Tierra. Éste es una mezcla gaseosa, que se compone principalmente de 21 partes de oxígeno y 78 partes de nitrógeno. El resto lo componen vapor de agua, gases nobles y dióxido de carbono. El equilibrio de esta concentración permite que los seres humanos puedan respirar sin tener afectaciones a la salud. Sin embargo, el aire que respiramos puede ser alterado debido a la presencia de otros compuestos. En este sentido se define como contaminante del aire al compuesto o compuestos que alteran nocivamente la concentración normal del aire ambiente y calidad del aire como el estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados.

Los contaminantes pueden ser emitidos de manera natural, mediante los procesos de erosión del suelo, descomposición de materia orgánica, incendios forestales, y procesos volcánicos, entre otros. Los contaminantes emitidos por causa de las actividades del hombre son conocidos como contaminantes antropogénicos, y en su mayoría son resultado de la quema de combustibles fósiles.

Por lo general, los contaminantes del aire se clasifican en primarios o secundarios. Un contaminante primario es aquél que se emite a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química, como por ejemplo, la ceniza de la quema de residuos sólidos. Un contaminante secundario es aquel que experimenta un cambio químico cuando llega a la atmósfera. Un ejemplo es el ozono que surge de los vapores orgánicos y óxidos de nitrógeno que emite una estación de gasolina o el escape de los automóviles. Los vapores orgánicos reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar y producen el ozono, componente primario del smog fotoquímico.

Algunos de los contaminantes del aire, por sus efectos en la salud de la población, han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente. Estos contaminantes son conocidos como criterio. Los contaminantes criterio incluyen : el ozono (O_3), el monóxido de carbono

(CO), el bióxido de azufre (SO₂), el bióxido de nitrógeno (NO₂), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}).

Cuando el aire presenta concentraciones importantes de estos contaminantes en forma de partículas, gases o agentes biológicos, existe un potencial de efectos nocivos a la salud. La mayoría de los contaminantes comunes del aire presentan los siguientes efectos en los sistemas respiratorio y cardiovascular:

- Las concentraciones elevadas de dióxido de azufre (SO₂) y material particulado en suspensión han sido asociadas con incrementos en la morbilidad y mortalidad, así como con el deterioro de las funciones respiratorias.
- El dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono también afectan al sistema respiratorio; las exposiciones agudas pueden causar reacciones inflamatorias, disminución de la función pulmonar e incremento de la resistencia al paso del aire en las vías respiratorias. La presencia de oxidantes en el aire, como el ozono, puede irritar los ojos y dificultar la respiración cuando se hace ejercicio físico extremo. Las exposiciones prolongadas a este contaminante pueden provocar deterioro permanente de los órganos respiratorios.
- El monóxido de carbono (CO) tiene una alta afinidad con la hemoglobina y es capaz de hacer disminuir la concentración de oxígeno en la sangre, lo que provoca efectos negativos en el sistema cardiovascular nervioso y en el comportamiento.
- El plomo inhibe la síntesis de la hemoglobina en los glóbulos rojos de la médula ósea, perjudica las funciones del hígado y los riñones, y causa daños neurológicos.

Como ya se mencionó, los contaminantes criterio tienen asignado un límite máximo normado en el aire ambiente para determinar si éste es respirable sin afectar la salud humana. Para poder determinar la concentración de cada contaminante se han desarrollado numerosas técnicas para medir estas concentraciones, en sistemas conocidos como redes de monitoreo.

Al detectar la concentración de contaminantes del aire ambiente se está determinando su calidad. Así entonces, la calidad del aire puede ser definida por indicadores o índices preestablecidos que

determinan la concentración de contaminantes en el aire ambiente ligada a escalas que califican esa calidad de forma cualitativa, cromáticas o numérica.

CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE MONITOREO DEL CANTON DE BELEN

La medición de los atributos o estado que guarda el aire ambiente se conoce como medición de la calidad del aire. Dicha medición se puede llevar a cabo por medio del muestreo, análisis y el monitoreo de dicho aire ambiente. En lo que a calidad del aire se refiere, el muestreo se define como la medición de la contaminación del aire por medio de la toma de muestras, de forma discontinua. La muestra tomada deberá ser sometida a un análisis posterior en donde se detectará su concentración y caracterización.

La red de monitoreo de la calidad del aire del cantón de Belén cuenta con las siguientes características:

-Usa una combinación de técnicas de muestreo tanto activo como pasivo. En el muestreo pasivo se colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un periodo adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos. Por otra parte las técnicas de muestreo activo requieren de energía eléctrica para succionar el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas); dentro de estos últimos, el más utilizado actualmente es el muestreador de alto volumen “High-Vol” (para PST, PM₁₀ y PM_{2.5}).

-Cuenta con la siguiente disposición de contaminantes y sitios de medición:

Contaminante	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
PM ₁₀	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Gravimétrico
Iones en partículas PM ₁₀	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Análisis de fluoruro (F ⁻), cloruro (Cl ⁻), nitrato (NO ₃ ⁻), sulfato (SO ₄ ²⁻), fosfato (PO ₄ ³⁻) por cromatografía de intercambio iónico
Metales en partículas PM ₁₀	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Análisis de Vanadio (V), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)
PM _{2,5}	-La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Gravimétrico
Iones en partículas PM _{2,5}	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24	Análisis de fluoruro (F ⁻), cloruro (Cl ⁻), nitrato (NO ₃ ⁻), sulfato (SO ₄ ²⁻),

Contaminante	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
	alto flujo vehicular)		horas	fosfato (PO_4^{3-}) por cromatografía de intercambio iónico
Metales en partículas $\text{PM}_{2,5}$	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Análisis de Vanadio (V), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)
NO_2	-Hotel Herradura -Plaza de Deportes La Asunción -Residencial Cariari -Industria Kimberly Clark -Costado Norte Palacio Municipal -Polideportivo Belén -Firestone -Iglesia Católica de La Ribera -Parque Recreativo Ojo de Agua -Panasonic -Hotel Marriot	1 vez por mes	Pasivo con tubos de permeación Muestreo de 22 días	Espectrofotométrico
NO_2	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de	3 veces por semana	Activo Muestreo de 24	Espectrofotométrico

Contaminante	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
	alto flujo vehicular)		horas	
SO ₂	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	3 veces por semana	Activo Muestreo de 24 horas	Cromatografía de Intercambio Iónico

-Las mediciones se respaldan en la acreditación de las pruebas realizadas por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional por parte del Ente Costarricense de Acreditación según consta en el expediente LE-024, el cual puede ser consultado en la página web: www.eca.or.cr.

-Dispone de monitoreo de precipitación total (lluvia ácida) de acuerdo con las siguientes características:

Parámetro	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
pH	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	5 veces por semana	Colector de precipitación Total	Electrométrico
Conductividad	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	5 veces por semana	Colector de precipitación Total	Electrométrico
Iones	-La Ribera (Comercial-Residencial) -La Asunción (Industrial de alto flujo vehicular)	5 veces por semana	Colector de precipitación Total	Análisis de fluoruro (F ⁻), cloruro (Cl ⁻), nitrato (NO ₃ ⁻), sulfato (SO ₄ ²⁻), fosfato (PO ₄ ³⁻) por cromatografía de intercambio iónico

RESULTADOS AÑO 2011

PARTÍCULAS PM₁₀ y PM_{2,5}:

Las partículas suspendidas (PM, por sus siglas en inglés) forman 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 de las partículas suspendidas varía desde 0,005 hasta 100 micras de diámetro aerodinámico; esto es, desde unos cuantos átomos hasta aproximadamente el grosor de un cabello humano.

Las partículas pueden tener un origen natural (como la polinización de las plantas, procesos geológicos e incendios forestales), y también antropogénico (que puede incluir desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas). Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, las llamadas partículas primarias, o bien formarse en la atmósfera cuando en ésta reaccionan algunas sustancias (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, amoníaco, compuestos orgánicos, etc.), siendo consideradas partículas secundarias.

El estudio y la regulación ambiental de las partículas empezó centrándose en las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son menores de 100 μm de diámetro aerodinámico. Posteriormente, la atención se centró en las partículas con diámetros aerodinámicos menores de 10 μm (PM₁₀), y actualmente, en las partículas finas y ultrafinas, es decir, las menores de 2.5 μm (PM_{2,5}) y 1 μm (PM₁), respectivamente. En los Estados Unidos la regulación de las PST empezó en 1971, agregando normas para PM₁₀ en 1987 y para PM_{2,5} en 1997 (USEPA, 2006). En Costa Rica, la norma que regula los niveles de PM₁₀ entró en vigor en 2002 y no ha sido revisada a la fecha.

Por su tamaño, las PM_{2,5} permanecen en el aire más tiempo y se transportan a mayores distancias que las PM₁₀, por lo que las fuentes de emisión de PM_{2,5} primarias o de los precursores de PM_{2,5} secundarias pueden encontrarse lejos de los sitios donde se monitorean (Finlayson-Pitts *et al.*, 2000). La fracción gruesa de las partículas suspendidas, con diámetro aerodinámico entre 2,5 micras y 10 micras, en general se deposita

más rápidamente, con una vida media en la atmósfera de sólo minutos u horas y, por ende, presenta mayor variabilidad espacial dentro de una misma región (WHO, 1999).

Al analizar los resultados obtenidos durante el año 2011, se encontró que la concentración promedio de $PM_{2.5}$ en La Asunción (Tabla 1) corresponde a $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrando un valor superior a la norma anual reportada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) correspondiente a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 1. Concentración de partículas $PM_{2.5}$ registradas en el sitio de monitoreo La Asunción, año 2011

Fecha	Concentración $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Incertidumbre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha	Concentración $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Incertidumbre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
11/01/2011	62	3	11/07/2011	29	3
12/01/2011	59	3	12/07/2011	27	3
13/01/2011	34	3	18/07/2011	27	3
17/01/2011	21	3	19/07/2011	32	3
18/01/2011	23	3	21/07/2011	38	3
19/01/2011	30	3	22/07/2011	24	3
27/01/2011	39	3	03/08/2011	31	3
09/02/2011	20	3	04/08/2011	46	3
15/02/2011	17	3	08/08/2011	34	3
16/02/2011	51	3	10/08/2011	37	3
17/02/2011	28	3	16/08/2011	27	3
19/02/2011	22	3	17/08/2011	31	3
20/02/2011	38	3	18/08/2011	39	3
23/02/2011	25	3	22/08/2011	27	3
28/02/2011	40	3	23/08/2011	33	3

Fecha	Concentración PM_{2,5} (ug/m³)	Incertidumbre (ug/m³)	Fecha	Concentración PM_{2,5} (ug/m³)	Incertidumbre (ug/m³)
01/03/2011	35	3	24/08/2011	42	3
03/03/2011	35	3	25/08/2011	38	3
07/03/2011	42	3	29/08/2011	26	3
17/03/2011	72	3	30/08/2011	29	3
15/03/2011	40	3	06/09/2011	25	3
16/03/2011	76	3	01/09/2011	34	3
21/03/2011	31	3	05/09/2011	42	3
22/03/2011	25	3	07/09/2011	32	3
24/03/2011	27	3	08/09/2011	37	3
28/03/2011	32	3	12/09/2011	30	3
29/03/2011	36	3	13/09/2011	28	3
30/03/2011	29	3	19/09/2011	41	3
05/04/2011	48	3	20/09/2011	37	3
07/04/2011	29	3	21/09/2011	42	3
13/04/2011	27	3	22/09/2011	38	3
28/04/2011	27	3	26/09/2011	41	3
02/05/2011	34	3	27/09/2011	45	3
03/05/2011	36	3	28/09/2011	37	3
04/05/2011	34	3	29/09/2011	32	3
10/05/2011	23	3	03/10/2011	37	3
03/05/2011	36	3	04/10/2011	28	3
04/05/2011	34	3	05/10/2011	32	3
23/05/2011	36	3	06/10/2011	37	3

Fecha	Concentración PM _{2,5} (ug/m ³)	Incertidumbre (ug/m ³)	Fecha	Concentración PM _{2,5} (ug/m ³)	Incertidumbre (ug/m ³)
25/05/2011	38	3	10/10/2011	40	3
26/05/2011	35	3	11/10/2011	45	3
30/05/2011	29	3	19/10/2011	24	3
31/05/2011	20	3	20/10/2011	32	3
25/05/2011	38	3	23/10/2011	38	3
06/06/2011	47	3	24/10/2011	40	3
07/06/2011	23	3	27/10/2011	49	3
09/06/2011	27	3	29/10/2011	38	3
14/06/2011	19	3	01/11/2011	32	3
15/06/2011	20	3	03/11/2011	35	3
16/06/2011	20	3	07/11/2011	40	3
21/06/2011	14	3	09/11/2011	28	3
23/06/2011	12	3	14/11/2011	27	3
27/06/2011	23	3	15/11/2011	22	3
28/06/2011	23	3	17/11/2011	30	3
30/06/2011	21	3	21/11/2011	24	3
05/07/2011	21	3	23/11/2011	32	3
06/07/2011	17	3	25/11/2011	28	3

Para el caso de las partículas PM_{2,5} no sólo se presentan incumplimientos a la norma anual sino que en al menos 43 ocasiones se superó la norma de 24 horas de la USEPA correspondiente a 35 µg/m³ tal como se observa en la figura 1. En la Tabla 2, se presentan las concentraciones medias, máximas y mínimas de los diferentes componentes mayoritarios y traza analizados en las muestras de partículas PM_{2,5} colectadas en el sitio de La Asunción.

Con el fin de realizar la reconstrucción de la masa de las partículas PM_{2,5} en el sitio de muestreo, se asumió que las partículas se pueden clasificar en 6 grandes grupos: iones secundarios, material cristal, carbono elemental, materia orgánica, aerosol marino y metales traza. Para realizar la reconstrucción de masa, se siguió el procedimiento recomendado por Chan et al. (1997). La suma de la concentración de sulfato, nitrato y amonio permitió calcular la fracción de iones secundarios. La materia orgánica se puede obtener multiplicando la concentración de carbono orgánico por 1,4. Este factor asume que la

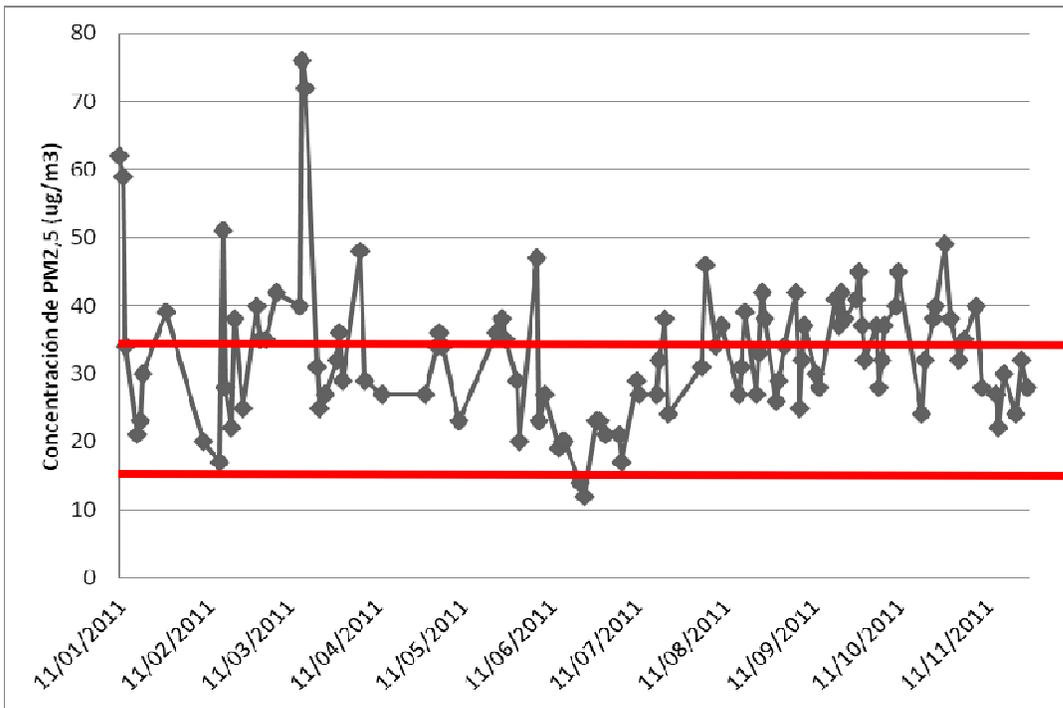


Figura 1. Concentraciones de PM_{2,5} diarias obtenidas durante el año 2011 en La Asunción

masa de materia orgánica contiene un 71% de carbono en peso y se utiliza para considerar el hidrógeno y el oxígeno no incluido durante el análisis de carbono. La masa de material cristal se estima con base a las contribuciones de los óxidos de Al, Ca, Fe, Si, Ti, Mg y K de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

El silicio elemental se estimó multiplicando la concentración de Al por 3,41. El aporte del aerosol marino se determino a partir de la suma de Cl⁻ y las fracciones de SO₄²⁻, Na, Ca, K y Mg de origen marino. Estas fracciones se calcularon de la siguiente forma: Na_{am} = 0,566Cl⁻, Ca_{am} = 0,038 Na_{am}, Mg_{am} = 0,12 Na_{am}, K_{am} = 0,036 Na_{am}, SO₄²⁻_{am} = 0,252 Na_{am}. Por último los metales traza se consideraron en forma de sus respectivos óxidos de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

El aporte cristal a las partículas PM_{2,5} es de 13,5% (figura 2), este porcentaje representa las contribuciones de los procesos de resuspensión de polvo por acción del viento. El aporte del aerosol marino corresponde a 3,1%. Los niveles de materia orgánica y carbono elemental (OM+EC) representan el 67% de la masa total de partículas PM_{2,5}. Estos resultados muestran la importancia del

aporte de los procesos de combustión a la composición de las partículas finas. Los metales traza representan la contribución más pequeña para el sitio de monitoreo.

Tabla 2. Concentraciones medias anuales, máximas y mínimas de los componentes mayoritarios en PM_{2,5} en La Asunción, 2011.

(µg/m ³)	Belén (AS-BE)		
	Media	Max	Min
n	70		
PM	33	75	14
OC	11,5	12,73	3,23
EC	4,32	3,48	1,28
F⁻	0,08	0,10	0,04
Cl⁻	0,57	0,73	0,26
NO₂⁻	0,14	0,22	0,09
Br⁻	nd		
NO₃⁻	0,6	0,86	0,24
PO₄³⁻	0,53	0,68	0,21
SO₄²⁻	4,81	4,24	1,30
NH₄⁺	1,55	1,93	0,49
Ca	0,23	0,57	0,09
Mg	0,055	0,068	0,034
Na	0,66	0,81	0,40
K	0,39	0,71	0,18
Al	0,35	0,46	0,22
Fe	0,11	0,35	0,10

Tabla 3. Concentraciones medias anuales, máximas y mínimas de los componentes minoritarios en PM_{2,5} en La Asunción.

(ng/m ³)	Belén (AS-BE)		
	Media	Max	Min
V	4,3	6,9	1,5
Cr	2,9	9,2	0,9
Cu	135	229	52
Ni	8,87	10,92	2,30
Pb	2,86	5,6	0,81
Mn	158	174	31

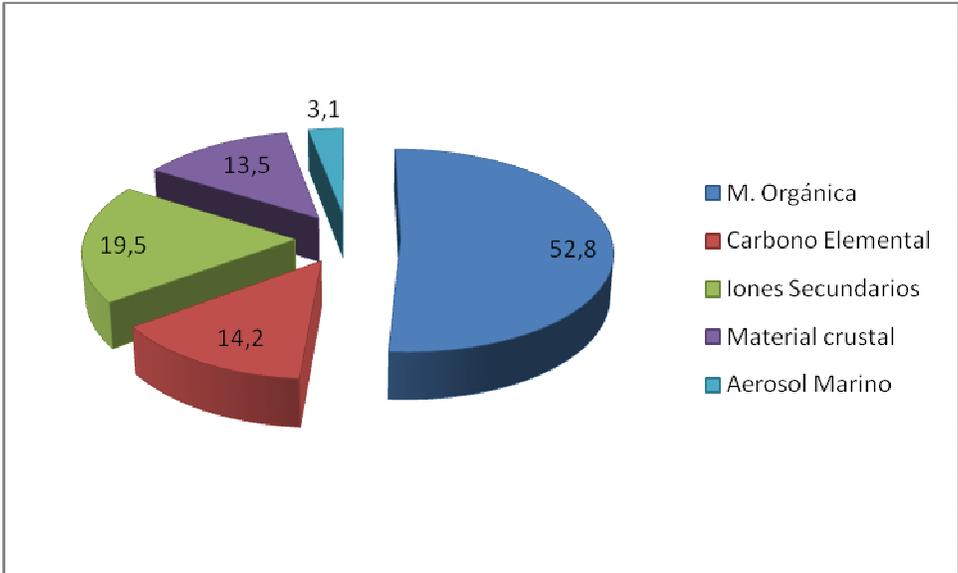


Figura 2. Composición porcentual de las partículas PM_{2,5} colectadas en Belén, año 2011

Por otra parte en la tabla 4, se pueden observar los promedios diarios obtenidos para la concentración de PM₁₀ en los dos sitios de monitoreo ubicados en los distritos de La Asunción y La Ribera. Para estos sitios de monitoreo, el promedio anual corresponde a 33 y 53 µg/m³, en La Ribera y La Asunción

respectivamente; superando para este último sitio, el límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contenido en el Decreto 30221-S.

Tabla 4. Concentración de partículas PM_{10} (promedios de 24 horas) registradas en el sitio de monitoreo La Ribera, año 2011.

Fecha de muestreo	Concentración PM_{10}	Concentración PM_{10}
	La Ribera ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	La Asunción ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
11/01/2011	25	90
12/01/2011	27	51
13/01/2011	19	39
17/01/2011	23	32
18/01/2011	30	41
19/01/2011	30	48
26/01/2011	34	41
27/01/2011	29	53
08/02/2011	31	43
09/02/2011	30	35
15/02/2011	15	26
16/02/2011	18	46
17/02/2011	17	29
21/02/2011	17	24
22/02/2011	16	52
23/02/2011	33	43
01/03/2011	18	23
03/03/2011	40	39
07/03/2011	40	99

Fecha de muestreo	Concentración PM ₁₀	Concentración PM ₁₀
	La Ribera (ug/m ³)	La Asunción (ug/m ³)
09/03/2011	43	47
10/03/2011	40	49
15/03/2011	28	37
16/03/2011	40	64
17/03/2011	37	72
21/03/2011	22	93
22/03/2011	22	44
24/03/2011	28	42
28/03/2011	40	46
29/03/2011	87	61
30/03/2011	50	72
05/04/2011	41	61
06/04/2011	39	88
07/04/2011	35	60
13/04/2011	34	50
25/04/2011	117	56
26/04/2011	49	124
28/04/2011	36	50
02/05/2011	22	51
03/05/2011	20	56
04/05/2011	24	61
10/05/2011	23	42
11/05/2011	33	59
16/05/2011	56	66

Fecha de muestreo	Concentración PM ₁₀	Concentración PM ₁₀
	La Ribera (ug/m ³)	La Asunción (ug/m ³)
17/05/2011	50	63
19/05/2011	54	43
23/05/2011	48	47
25/05/2011	50	109
26/05/2011	44	50
30/05/2011	56	55
31/05/2011	37	29
02/06/2011	24	28
06/06/2011	40	97
07/06/2011	41	54
09/06/2011	43	56
14/06/2011	28	41
15/06/2011	29	33
16/06/2011	32	37
21/06/2011	26	29
22/06/2011	39	46
23/06/2011	32	29
27/06/2011	25	37
28/06/2011	35	39
30/06/2011	29	37
05/07/2011	27	38
06/07/2011	35	56
07/07/2011	28	69
12/07/2011	40	64

Fecha de muestreo	Concentración PM ₁₀	Concentración PM ₁₀
	La Ribera (ug/m ³)	La Asunción (ug/m ³)
13/07/2011	35	66
14/07/2011	60	68
20/07/2011	27	75
21/07/2011	18	92
27/07/2011	27	64
28/07/2011	30	41
03/08/2011	30	46
04/08/2011	37	49
08/08/2011	11	49
09/08/2011	27	59
11/08/2011	33	62
17/08/2011	28	59
18/08/2011	34	47
22/08/2011	31	56
23/08/2011	40	55
25/08/2011	31	70
29/08/2011	23	56
30/08/2011	40	90
01/09/2011	42	51
05/09/2011	30	39
07/09/2011	39	32
08/09/2011	29	41
12/09/2011	26	48
13/09/2011	33	41

Fecha de muestreo	Concentración PM ₁₀	Concentración PM ₁₀
	La Ribera (ug/m ³)	La Asunción (ug/m ³)
19/09/2011	37	
21/09/2011	33	
22/09/2011	27	
26/09/2011	31	
27/09/2011	39	
28/09/2011	52	
03/10/2011	44	
05/10/2011	24	
06/10/2011	25	
10/10/2011	21	
12/10/2011	19	
18/10/2011	17	
19/10/2011	22	
25/10/2011	26	
27/10/2011	31	
31/10/2011	44	
01/11/2011	30	
03/11/2011	26	
07/11/2011	24	
08/11/2011	32	
10/11/2011	26	
14/11/2011	32	
15/11/2011	26	
16/11/2011	29	
21/11/2011	25	

Fecha de muestreo	Concentración PM ₁₀	Concentración PM ₁₀
	La Ribera (ug/m ³)	La Asunción (ug/m ³)
22/11/2011	26	
23/11/2011	25	
28/11/2011	23	
29/11/2011	19	
01/12/2011	20	
05/12/2011	26	
06/12/2011	23	
07/12/2011	23	
Promedio	33	53
Valor Máximo	117	124
Valor Mínimo	11	23
Desviación Estándar	13	19

Es importante mencionar que en ninguno de los días de muestro se obtuvieron concentraciones mayores al límite establecido (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como promedio de 24 horas en el Decreto 30221-S. El valor del coeficiente PM_{2.5}/PM₁₀ para La Asunción correspondió en el año 2011 a 0,62, lo que indica que hay un aporte significativo de partículas finas (diámetros menores a 2,5 μm) al material particulado presente en este distrito belemita.

Para ambos sitios de monitoreo los meses de abril y julio (figura 3) presentaron los niveles más altos de partículas PM₁₀, de tal forma que durante la época seca (diciembre-abril) se presentó un promedio de 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la época lluviosa para La Asunción.

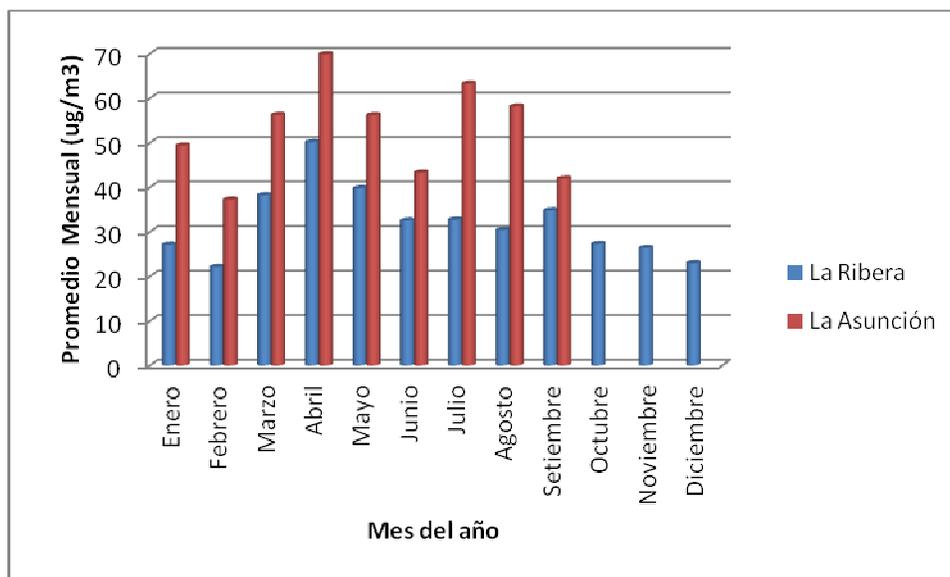


Figura 3. Variación de los promedios mensuales de PM₁₀ registrados en los sitios de monitoreo de La Ribera y la Asunción, 2011

En las tablas 5 y 6 se muestra un análisis de los principales constituyentes químicos de las partículas PM₁₀ en donde sobresale el sulfato y el amonio como iones predominantes, mientras que el aluminio y el cobre constituyen los metales mayoritarios. Adicionalmente, se presentan concentraciones mayores de metales en sitios ubicados en zonas con alta densidad de flujo vehicular y actividad industrial, especialmente en el caso del Ni, Cu y Mn.

Tabla 5. Composición iónica (µg/m³) de las partículas PM₁₀ colectadas en Belén, Año 2011

	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Acetato	Oxalato	Formiato
La Ribera	0,12 (0,06)	0,89 (0,12)	0,14 (0,06)	nd	0,78 (0,33)	0,71 (0,35)	4,70 (1,40)	0,81 (0,18)	0,51 (0,24)	0,13 (0,15)	0,66 (0,45)
Asunción	0,10 (0,07)	1,09 (0,76)	0,19 (0,07)	0,51 (0,08)	0,73 (0,40)	1,13 (0,73)	4,64 (3,60)	0,89 (1,44)	0,49 (0,33)	0,14 (0,12)	0,42 (0,70)

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

Tabla 6. Concentración de especies metálicas (ng/m³) presentes en las partículas PM₁₀ colectadas en Belén, Año 2011

	Pb	Cu	Ni	Cr	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	V
La	5,25	86	7,55	5,37	1897	176	646	202	1317	39	517	3,14
Ribera	(4,38)	(43)	(5,95)	(0,85)	(1207)	(64)	(418)	(65)	(802)	(16)	(240)	(0,60)
Asunción	3,75	157	9,48	3,03	2017	189	359	122	515	377	228	4,93
	(1,32)	(59)	(8,69)	(2,60)	(1051)	(195)	(188)	(73)	(114)	(785)	(120)	(1,76)

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

ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO₂ Y NO):

El término óxido de nitrógeno puede referirse a alguno de los siguientes compuestos: NO (óxido nítrico); NO₂ (dióxido de nitrógeno); N₂O (óxido nitroso); N₂O₃ (trióxido de dinitrógeno); N₂O₄ (tetraóxido de dinitrógeno) y N₂O₅ (pentóxido de dinitrógeno). Desde el punto de vista de la contaminación del aire sólo los dos primeros tienen importancia y sólo el dióxido (NO₂) es un contaminante criterio. Por lo general, los óxidos de nitrógeno, NO_x, son la mezcla de NO y NO₂. Estos gases tienen en común que ambos son reactivos, tienen un solo átomo de nitrógeno y son generados en procesos de combustión (sobre todo a altas temperaturas). A temperatura ambiente, el nitrógeno (N₂) del aire no puede combinarse con el oxígeno debido a la gran estabilidad del triple enlace de su molécula, pero éste se rompe cuando hay suficiente energía, lo que se manifiesta por el aumento de la temperatura y entonces los átomos de nitrógeno ya pueden reaccionar con el oxígeno dando, sobre todo, NO el cual, en presencia de un exceso de oxígeno se oxida produciendo NO₂. En áreas de mucho tránsito vehicular, como es el caso en las grandes ciudades, las emisiones de NO_x son muy importantes. El monóxido de nitrógeno, óxido nítrico u óxido de nitrógeno NO es un gas incoloro y poco soluble en agua. Se le considera un agente tóxico.

El NO₂ es un gas tóxico e irritante de color marrón amarillento. Además de los efectos que produce en la salud, el dióxido de nitrógeno puede absorber parte de la radiación solar y junto con las partículas suspendidas es responsable de la disminución de la visibilidad, es precursor de la lluvia ácida y también juega un papel importante en el cambio climático global. Junto con el óxido nítrico es un regulador de las capacidades oxidativas en la tropósfera al controlar el desarrollo y destino de los radicales, incluyendo el radical hidroxilo.

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

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

En la tabla 7 se presentan los promedios anuales obtenidos para cada uno de los sitios de muestreo de dióxido de nitrógeno ubicados en el cantón de Belén. Tal como se puede observar de los 11 sitios de monitoreo, al menos 4 presentan concentraciones superiores al criterio de la Organización Mundial de la Salud. Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo vehicular en donde se llegan a alcanzar excedencias de hasta un 10% con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 12 y 10% para sitios comerciales e industriales respectivamente. Es importante indicar que esta tasa es ligeramente menor a la registrada en años anteriores donde se registraban incrementos de hasta 15% para zonas comerciales de alto flujo vehicular.

Tabla 7. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno (NO₂) registrados para los sitios de monitoreo ubicados en el cantón de Belén, 2011.

	Cantón	Sitio de muestreo	Tipo de sitio	Promedio Anual (µg/m ³)
1	Belén	Antiguo Hotel Herradura	Comercial	42
2	Belén	Costado sur plaza La Asunción	Comercial	44
3	Belén	Residencial Cariari	Residencial	19
4	Belén	Costado norte de la Firestone	Industrial	31
5	Belén	Frente al Hotel Marriot	Residencial	25
6	Belén	Frente Iglesia católica La Ribera	Residencial	24
7	Belén	Parque Recreativo Ojo de Agua	Comercial	28
8	Belén	Costado norte Municipalidad de Belén	Comercial	42
9	Belén	Polideportivo Belén	Residencial	20
10	Belén	Cruce Belén-Santa Ana	Comercial	40
11	Belén	Antigua Kimberly Clark	Residencial	19

DEPOSITACIÓN TOTAL

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

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

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

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

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

En la tabla 8 se muestran los resultados de la composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el área metropolitana durante el año 2011. Los valores presentados en dicho cuadro se encuentran ponderados por volumen utilizando los datos de precipitación diaria colectada.

Tabla 8. Composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2011.

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

Las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las muestras de precipitación total obedecen el siguiente orden: SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻. Los valores promedio ponderados por volumen

de pH más ácidos, se registran en los sitios localizados en San José, los cuales se caracterizan por estar ubicados en zonas comerciales de alto flujo vehicular.

CONCLUSIONES:

1. Los niveles de partículas registrados en el cantón de Belén, superan las normas anuales 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: analizar los flujos de vehículos en las principales vías del cantón con el fin de maximizar las velocidades de circulación, diseñar rutas específicas para el desplazamiento de vehículos de carga pesada, incentivar el uso de transporte público masivo sobre opciones de transporte individualizado, control e inspección de emisiones generadas en fuentes fijas que utilicen diesel y bunker principalmente
2. Tanto las concentraciones máxicas como la composición química de las partículas PM_{2,5} presentan un patrón de variabilidad estacional bien definido, en donde los aportes crustales y de aerosol marino presentan sus máximos valores durante la época seca y disminuyen con la entrada de las brisas del Pacífico que son las encargadas de generar las lluvias durante los meses de mayo a noviembre.
3. A partir de la identificación de las fuentes que contribuyen a los niveles de PM_{2,5} 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.
4. Existe una tendencia a incrementar el grado de acidificación de las muestras de precipitación total, ya que el número de eventos al año con pH inferior a 5,60 esta incrementado a una tasa de 16,5% anual en el período 2007-2011, razón por la cual se debe explorar más a fondo las causas de este fenómeno
5. Persiste el crecimiento en los niveles de dióxido de nitrógeno en sitios comerciales e industriales del cantón de Belén, aunque la tasa de crecimiento para este año fue ligeramente menor en comparación con el período anterior.
6. Debido a la ocurrencia de valores de concentración de contaminantes que superan las normas de calidad del aire es importante pensar el fortalecer el monitoreo de la calidad del aire y propiciar la migración del sistema actual a un sistema automático, que permita analizar los ciclos horarios de variación de los contaminantes.

REFERENCIAS:

Finlayson-Pitts, B. J.; Pitts, J. N. (2006). Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. John Wiley & Sons. USA

Organización Mundial de la Salud. (2006a). Air Quality Guidelines. Global update 2005. Regional Office for Europe.

Organización Mundial de la Salud. (2006b). 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. [Disponible en http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf].

US Environmental Protection Agency. (2006). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). [Disponible en <http://www.epa.gov/air/criteria>.html - consultada el 9/04/2012].