

EMISIONES ANTROPOGÉNICAS DE COMPUESTOS TÓXICOS PARA EL AIRE EN EL GRAN ÁREA METROPOLITANA DE COSTA RICA EN EL 2007.

Javier E. Rodríguez Yáñez.

Química Marina, Escuela de Química, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado 86 3000, Heredia, Costa Rica

Recibido 6 de marzo del 2013; aceptado 30 de junio del 2014

Abstract

The Emissions Inventory Toxic Air Compounds for the Greater Metropolitan Area in 2007 is framed within the air quality policy in Costa Rica. The main toxic anthropogenic contaminants were toluene, methanol, xylenes, formaldehyde and benzene. Similarities are seen with other inventories in terms of emission rate versus the population and the level of importation of toxic products.

Resumen

La realización del Inventario de Emisiones de Compuestos Tóxicos del Aire para el Gran Área Metropolitana (GAM) en el 2007, está enmarcada dentro de la política de calidad del aire de Costa Rica. Los principales contaminantes tóxicos antropogénicos en el aire fueron tolueno, metanol, xilenos, formaldehído y benceno, siendo las fuentes de área las principales contribuyentes en la mayoría de los casos. Se aprecian similitudes con otros inventarios en cuanto a proporción de emisión vs la población, así como con el nivel de importación de productos tóxicos.

Key words: inventory, toxic, emissions, GAM, Costa Rica.

Palabras clave: inventario, tóxicos, emisiones, GAM, Costa Rica.

I. INTRODUCCIÓN

El Gran Área Metropolitana (GAM) se definió como área geográfica de importancia en los años noventa, dado su crecimiento poblacional e industrial, y en él se incluyeron a los cantones del Valle Central de Costa Rica, los cuales concentran más del 60% de la población y del 70% de las industrias del país [1, 2]. Posteriormente, dadas las características e importancia del GAM, se desarrollaron una serie de consideraciones en cuanto a vivienda, vialidad y urbanismo para esta área, las cuales provienen de la Planificación Regional Urbana del GAM (PRUGAM) [2]. Por otro lado, la Dirección de Gestión de la Calidad del Ambiente (DIGECA), como ente regulador de la Calidad Ambiental, define las consideraciones sobre la calidad ambiental tanto del GAM como del país [3, 4].

El Plan Nacional para Mejorar la Calidad del Aire del Gran Área Metropolitana de Costa Rica, aprobado en octubre de 2008, establece dentro de las actividades estratégicas, la necesidad de que se desarrollen en el país inventarios de emisiones, que guarden coherencia metodológica con

los objetivos planteados para la Gestión de la Calidad del Aire [5]. Un inventario de emisiones es una herramienta de cálculo estimativo para la evaluación de las emisiones de compuestos específicos. Esta herramienta aplicada sistemáticamente permite una evaluación ambiental, planteando la posibilidad de implementar medidas ambientales de reducción o mitigación dentro de la Gestión de la Calidad del Aire [5-13].

En el caso de los inventarios de calidad de aire, existen dos niveles básicos de inventarios basados en los Inventarios de Contaminantes Criterio del Aire (ICCA) y derivado de este en un segundo nivel, los Inventarios de Contaminantes Tóxicos del Aire (ICTA). El ICCA evalúa las emisiones de contaminantes del aire utilizados como criterio, para definir con ellos niveles permisibles que no afecten la salud pública y el ambiente, permitiendo establecer una evaluación general de la calidad del aire. Mientras que el segundo basado en el ICTA, plantea la consideración de aquellos compuestos que por sus características representan un peligro para la salud humana, por su toxicidad o por las cantidades que son emitidas en la zona de evaluación [5-13].

Los Contaminantes Criterio, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), los compuestos volátiles orgánicos (VOC), el material particulado (PM), entre otros, están asociados a la calidad general de aire y la posible afectación al bienestar y la salud humana, pero de tipo epidemiológico en función de relaciones dosis-respuesta, con efectos adversos usualmente no significativos [4, 7-13]. Generalmente, para estos contaminantes se definen guías, normas y reglamentos, definiendo límites permitidos para un periodo de tiempo específico a fin de proteger la salud humana y el ambiente, según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) [9]. Mientras que los Contaminantes No Criterio, plantean situaciones específicas de problemáticas ambientales con determinados compuestos en el aire, entre ellos los denominados Contaminantes Tóxicos del Aire.

Para definir un Contaminante Tóxico en el ambiente, se le debe asociar a un compuesto químico en la atmosfera que sea nocivo para la salud. Por ejemplo, los definidos como los Contaminantes Peligrosos del Aire (*Hazardous Air Pollutant* o HAP) o los Tóxicos del Aire definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) [7-13]. Debe considerarse también que dichos compuestos pueden generar distintas afectaciones a la salud humana, específicamente en diferentes órganos del cuerpo tal como se visualiza en la figura 1.

En este estudio se consideraron los tóxicos del aire definidos por la EPA, los cuales en su mayoría son productos sintetizados por el hombre, lo cual implica la existencia de industria química o la importación de estos productos para consumo industrial o comercial. La importación de dichos productos tóxicos al país es evaluada en función de la información de la Promotora de Comercio Exterior (PROCOMER), así como el Banco Central de Costa Rica y otros organismos estadísticos de comercio. Los usos principales de estos productos estarían asociados a la producción industrial, así como a su venta por comercios en el país [13-19].

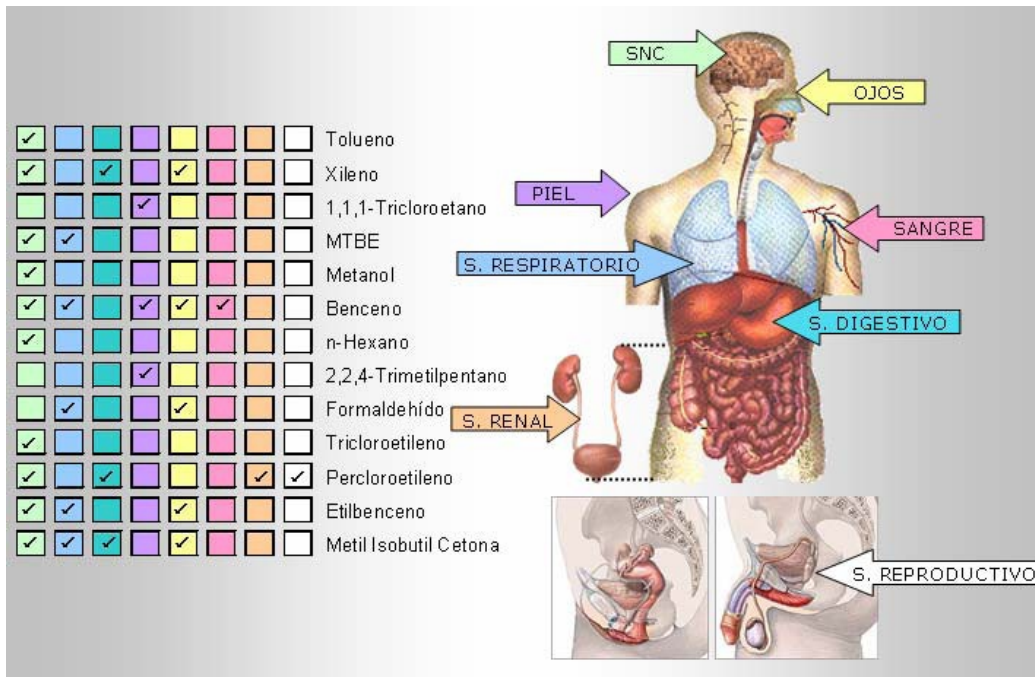


FIGURA 1. Efectos principales de algunos contaminantes tóxicos del aire [10].

II. METODOLOGÍA

La metodología del inventario se basó en los inventarios realizados para la ciudad de México con base en los lineamientos de PNUMA [5-14]. Los contaminantes tóxicos del aire definidos por EPA se consideraron y se intentó identificar si ellos son emitidos así como su cantidad durante el año de 2007.

Se incluyeron 3 tipos de fuentes de emisión principales, basadas en su origen, y para las cuales se contempló la información disponible para calcular su actividad y los factores de estimación de emisiones a utilizar:

Fuentes Puntuales: Ellas están asociadas a emisiones de empresas de gran porte que utilizan o generan en forma significativa alguno de los compuestos tóxicos considerados. En este caso se tomaron aquellas empresas de más de 40 empleados, sub clasificadas por categoría según el código de *Clasificación Industrial Internacional Unificada* (CIIU).

La información principal de niveles de producción fue aportada por el Ministerio de Salud mediante los Reportes Operacionales u otras informaciones reglamentarias. Además se buscaron otras fuentes como la evaluación del Producto Bruto Interno dado por el Banco Central de Costa Rica y las encuestas realizadas para el Inventario de Emisiones del Área Metropolitana para Contaminantes Criterios (IEM). Los factores utilizados FIRE y SPECIATE, se basaron en lo indicado en los inventarios de México [5-20].

Fuentes de Área: En esta categoría se incluyeron a los pequeños establecimientos industriales que no se clasifican como fuentes fijas, además de actividades dispersas, como el uso comercial y doméstico de disolventes y distintos productos químicos, así como fuentes fugitivas como las

actividades agropecuarias. También se consideraron como fuentes de área los vehículos que no circulan por carreteras, como locomotoras, barcos y aeronaves comerciales.

Las fuentes de información en este caso son variadas y dependen de la emisión considerada. Sin embargo, las principales fuentes incluyeron a entidades públicas (ministerios y oficinas de contralor) así como a laboratorios privados. Por esta misma variabilidad de fuentes es que los factores utilizados fueron variados, pero entre ellos se consideran principalmente los sugeridos por EPA o los inventarios de México: los factores AP42, FIRE, SPECIATE, CIEDARS, etc [5-24].

Fuentes Móviles: Corresponden a las emisiones del escape de los vehículos automotores que circulan por carreteras y calles pavimentadas, incluidos automóviles particulares, motocicletas, taxis, microbuses, autobuses y camiones de carga pesada que utilizan ya sea diesel o gasolina. Se consideró su movimiento y emisión dentro del GAM.

La información principal provino del Ministerio de Obras Públicas y Transporte y el Instituto Nacional de Seguros, y estuvo asociada a las características de circulación, así como tipos y cantidad de vehículos.

La metodología utilizada para el cálculo de emisiones se basó en el programa MOBILE 6, de la EPA [5-18, 25-30].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 235 compuestos considerados inicialmente se pudo estimar emisiones para 84 de ellos. Estos compuestos son aquellos para los cuales la información base disponible para el año utilizado permitió estimar su consumo o generación en el área considerada. Dicha información hizo posible la estimación de las emisiones, en función de las posibilidades de cálculo y/o los factores de estimación considerados. Para el resto de los compuestos considerados no fue posible plantear emisiones debido a la falta de alguno de los parámetros requeridos.

Emisiones Generales

Las emisiones antropogénicas totales estimadas para el año 2007 son de 6.974,10 toneladas, dentro de las cuales las Fuentes de Área representan un porcentaje muy elevado (82 %). Ellas pueden valorarse en el cuadro 1.

CUADRO 1. Emisiones Globales Antropogénicas de Tóxicos del Aire por fuente y sus porcentajes

FUENTE	t/año	Porcentaje
Fuente Puntual	379,16	5,4
Fuente de Área	5.680,45	81,5
Fuentes Móviles	914,49	13,1
Total	6.974,10	100,0

Principales Categorías de Emisión

En el cuadro 2 se aprecia la distribución general de las emisiones discriminadas por categoría y expresada cada una como porcentaje para la emisión general y antropogénica. De estas

categorías analizadas se puede discriminar una lista de las 14 principales que emiten más de 50 t/año.

CUADRO 2. Categorías principales de emisión antropogénica de contaminantes tóxicos del aire.

FUENTE	CATEGORIAS	t/año	Porcentaje
FA	Disolventes Domésticos	2.277,4400	32,7
FA	Pinturas Industriales y Arquitectónicas	1.990,4530	28,5
FA	Artes Graficas	561,6780	8,1
FM	Automóviles a Gasolina	376,0374	5,4
FP	Fabricación de vidrio y productos de vidrio	316,3935	4,5
FM	Carga Liviana y Microbuses a Gasolina	262,7874	3,8
FA	Pintura Automotriz	243,3471	3,5
FA	Quema de Basuras	229,9200	3,3
FA	Lavado en Seco	135,9499	2,0
FM	Motocicletas y Bicimotos a Gasolina	100,3398	1,4
FM	Carga Pesada a Diesel	88,0930	1,3
FM	Autobuses a Diesel	63,2334	0,9
FA	Leña Industrial	53,8705	0,8
FA	Almacenamiento, Despacho y Distribución de Gasolina	51,0160	0,7
	Otras	223,5432	3,2
TOTAL		6.974,10	100,0

FA: Fuentes de Área, FP: Fuentes Puntuales, FM: Fuentes Móviles

Dentro de las Fuentes de Área se tienen varias que presentan niveles elevados de emisión, y que están asociadas principalmente al uso de disolventes domésticos y a las pinturas industriales y arquitectónicas. En el caso de las Fuentes Puntuales, solo la fabricación de vidrio aparece con niveles importantes de tóxicos del aire. Por otro lado, los automóviles particulares a gasolina, los vehículos de carga liviana y pesada, así como las motos son los principales generadores de los tóxicos evaluados como Fuentes Móviles.

Principales Tóxicos Emitidos

Se presentan el cuadro 3 y la figura 2 donde se muestran los niveles relacionados con emisiones antropogénicas y sus fuentes, y los 84 compuestos para los cuales se pudieron estimar dichos valores. Los 11 compuestos principales con más de 200 t/año representan más del 80 % de las emisiones antropogénicas, mientras que los 22 primeros tienen emisiones de más de 50 t/año, representando en conjunto más del 95 %.

Metales Tóxicos

A pesar de ser menos del 1 % de las emisiones de tóxicos, se considera en forma especial a los metales tóxicos en el aire dadas sus características toxicidad. Las principales emisiones son de Fuentes Fijas, asociadas a la fabricación de cementos, cal, yesos o similares. En el cuadro 4 se expresan los valores obtenidos.

CUADRO 3. Compuestos tóxicos principales emitidos en el GAM en el 2007

Nombre EPA	TOTAL (t/año)	Porcentaje
Tolueno	1.470,68	21,1
Metanol	757,91	10,9
Xilenos (isómeros y mezclas)	690,43	9,9
Formaldehído	575,50	8,3
Benceno	527,89	7,6
Bromuro de Metilo	350,96	5,0
Hexano	273,92	3,9
m-Xileno	262,09	3,8
Ácido clorhídrico, anhidro	255,92	3,7
p-Xileno	243,40	3,5
Clorobenceno (monoclorobenceno)	234,00	3,4
Otros	1.331,41	19,1
TOTAL	6.974,10	100,0

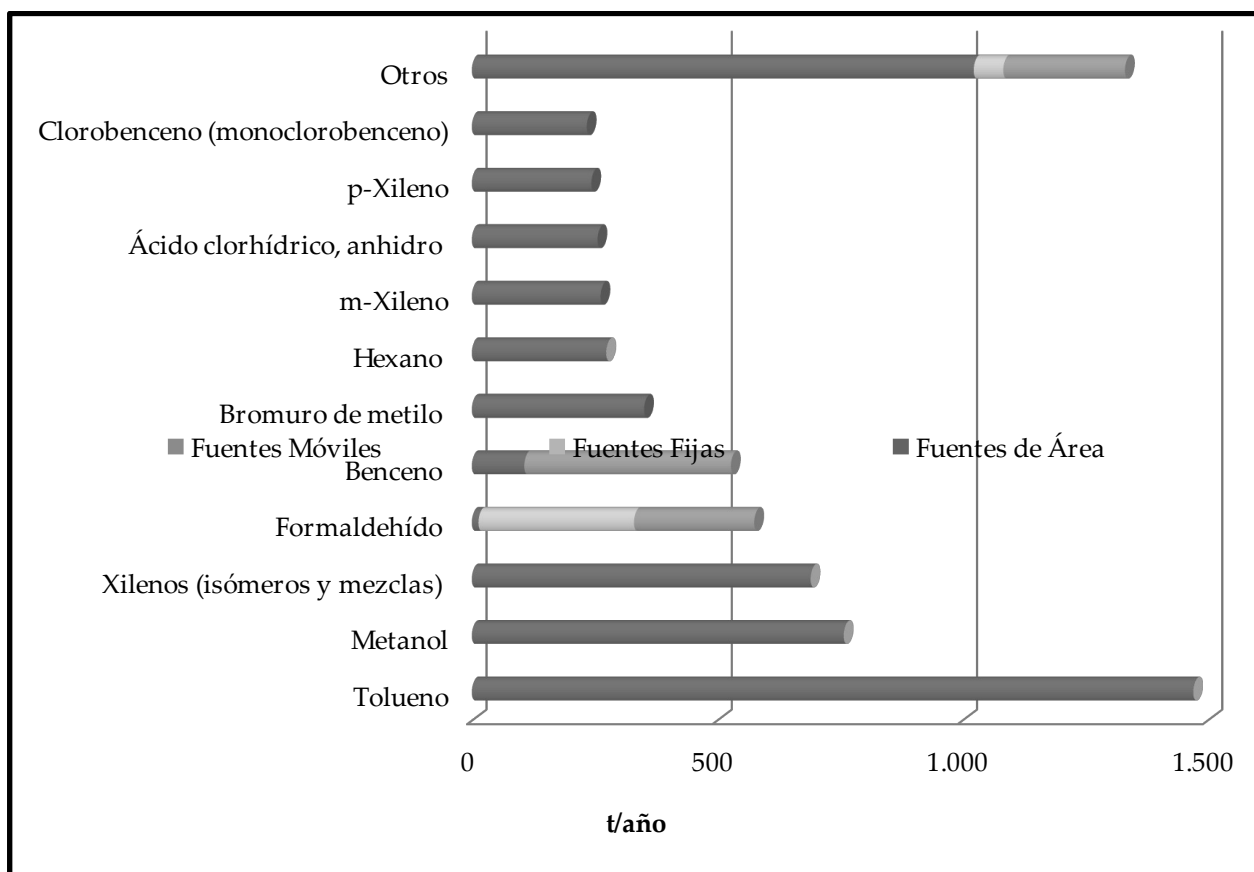


FIGURA 2. Tipos de Fuentes de los contaminantes tóxicos principales del GAM.

CUADRO 4. Metales tóxicos del Aire evaluados para el GAM.

Nombre EPA	TOTAL (t/año)	% Antrop.	% de Metales
Plomo (compuestos)	30,19	0,43	45,6
Arsénico (compuestos)	11,21	0,16	16,9
Manganeso (compuestos)	8,47	0,12	12,8
Antimonio (compuestos)	7,21	0,10	10,9
Cadmio (compuestos)	3,09	0,04	4,7
Níquel (compuestos)	2,28	0,03	3,5
Cromo (compuestos)	1,28	0,02	1,9
Selenio (compuestos)	0,95	0,01	1,4
Cobalto (compuestos)	0,73	0,01	1,1
Cadmio (compuestos)	0,38	0,01	0,6
Mercurio (compuestos)	0,29	0,00	0,4
Berilio (compuestos)	0,07	0,00	0,1
Arsénico inorgánico	0,00	0,00	0,0
TOTAL	66,14	0,95	100,0

IV. CONCLUSIONES:

El volumen de emisiones antropogénicas de compuestos tóxicos es de unas 6.974 t anuales. Estos valores son del orden de 3.321 t/hab y de 1,69 t/hab km², los cuales resultan similares a los de los inventarios utilizados de referencia en la región (Por ejemplo el Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2004, con 4821 t/hab y 1,15 t/hab km²).

Las relaciones entre las Fuentes Antropogénicas de tóxicos del aire muestran un nivel excesivamente alto de las Fuentes de Área (84 %) respecto a las otras fuentes y respecto a otros inventarios, donde su aporte es del orden del 60 %. En particular, las Fuentes Móviles se ven disminuidas teniendo un nivel relativo de emisión muy bajo (13 %) en comparación a lo usual en los inventarios de zonas densamente pobladas (35 %). Por otro lado, las emisiones a nivel de Fuentes Fijas se encuentran dentro de un orden de importancia similar a lo esperado al comparar con otros inventarios (5 %).

Los principales tóxicos identificados en este inventario en orden de importancia, sin considerar las Fuentes Naturales, fueron: tolueno, metanol, xileno, formaldehído y benceno. Por debajo de estos y también entre los principales se encuentran al bromuro de metilo, hexano, m-xileno, ácido clorhídrico, p-xileno y clorobenceno. Estos compuestos representan el 80 % de las emisiones antropogénicas de tóxicos del aire en el GAM. La mayoría de estos compuestos tienen su origen principal (más del 90 %) en Fuentes de Área, a excepción del formaldehído y el benceno. El benceno se presenta debido a Fuentes Móviles en un 80 % y asociado a Fuentes de Área en un 20 %, mientras que el formaldehído tiene sus emisiones principales en Fuentes Móviles (43 %) y Fuentes Fijas (55 %), las cuales se asociaron a las emisiones por la fabricación de vidrio. Esta relación se cumple en general para otros inventarios aunque no de forma tan marcada para Fuentes de Área.

Los compuestos tóxicos se encontraron dentro de las emisiones principales en los inventarios de tóxicos del aire, con posiciones relativas diferentes según el caso y eventualmente con algún otro tóxico. Los porcentajes relativos respecto a la emisión total siempre presentaron uno o dos compuestos con valores porcentuales elevados, en este caso el tolueno y el metanol con más del 10 %, siendo el resto inferiores a ese valor, en general en el entorno del 5 % o menos.

Las emisiones de tolueno derivan de categorías asociadas a Fuentes de Área, en especial de pinturas industriales (57 %), disolventes domésticos (15 %) y artes gráficas (14 %). El metanol tiene origen principalmente en disolventes domésticos (99 %) y el p-xileno está asociado a pinturas industriales (62 %) y a disolventes domésticos (38 %).

Los otros compuestos, a excepción del formaldehído, el benceno y el ácido clorhídrico, presentaron porcentajes principales de emisión que se relacionan con disolventes domésticos, pinturas industriales, artes gráficas o lavado en seco. Esto indica la necesidad de considerar algún tipo de evaluación de la utilización y posible control de dichos tóxicos en estos productos.

Por ejemplo, para el formaldehído ya se mencionó que debe considerarse la importancia de las emisiones en la fabricación de vidrio, pero junto con el benceno tiene un nivel importante de emisiones debido a Fuentes Móviles, en particular asociadas a automóviles a gasolina y carga liviana o microbuses a gasolina para el benceno, 43 y 27 % respectivamente, y distribuida equitativamente para el formaldehído (42 % en conjunto). Esto indica la necesidad de que se mantengan los controles de emisiones vehiculares, considerándose algún tipo de evaluación respecto a los niveles de VOC, especialmente para vehículos a gasolina.

La emisión principal del ácido clorhídrico se relaciona con la quema de basura (86 %), lo que indica que es necesario evitar este tipo de procesos.

La emisión de Metales fue de 0,95% y a pesar de su bajo valor es de interés especial por su toxicidad. En relación con otros inventarios los valores esperados deberían ser menores (0,2 %), por lo que debe dárseles seguimiento en inventarios posteriores. El principal compuesto metálico en el aire es el plomo, seguido por el arsénico, el manganeso y el antimonio, en segundo término también el cadmio y el níquel. Las principales emisiones están asociadas a la fabricación de cementos, lo que permitiría considerar algún tipo de control sobre las emisiones de metales en estas instalaciones.

V. REFERENCIAS

1. Ley de Planificación Urbana N° 4240, La Gaceta N° 56, 17 de marzo de 1983.
2. PRUGAM. Plan Regional Urbano para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2030, Costa Rica, 2009.
3. Dirección de Gestión de la Calidad del Ambiente. Calidad del Aire, 2010, Costa Rica. Descargada: 5 de enero, 2011, http://www.digeca.go.cr/aire/aire_manejo.html
4. Herrera, J., Rodríguez, S. Tercer Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José, 2006. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica, 2007.
5. MINAET, MOPT, MS, UNA. Plan Nacional para Mejorar la Calidad del Aire en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2013, Costa Rica, 2008.
6. Finlayson-Pitts B. J., Pitts J. N. Jr. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere, Academic Press, USA, 2004.
7. Herrera J., Rojas, F., Rodríguez, S., Rojas, A., Rodríguez, J. Primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica en el 2007, Costa Rica, 2011. Descargada: 8 de abril, 2011: www.digeca.go.cr/documentos/aire/Resumen%20ejecutivo%20del%20Inventario.pdf

8. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente, Manual para la elaboración y usos de inventarios de emisiones, México, 2007.
9. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Contaminación Atmosférica, Informe de la Red Regional de Contaminación Atmosférica de América Latina y el Caribe, 2009, New York, USA. Descarga 5 febrero, 2011, <http://www.pnuma.org/forodeminstros/17-reunion/documentos/Informe%20Reunion%20Red%20Contam%20Atmosferica2.pdf>
10. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal. Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2004, México, 2006.
11. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal. Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2008, México, 2010.
12. Subsecretaria de Gestión para la Protección Ambiental-SEMARNAT y Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. Guía para la Correcta Selección y Empleo de Métodos de Estimación de Emisiones Contaminantes, México, 2001.
13. Environmental Protection Agency (EPA). Recursos Técnicos, Red de Transferencia de Tecnología, Centro de Información sobre Contaminantes del Aire (CICA) para la frontera entre Estados Unidos y México, 2007, USA. Descarga 10 de marzo, 2011, http://www.epa.gov/ttnecat1/cica/atech_s.html
14. Promotora de Comercio Exterior (PROCOMER). *Portal Estadístico de comercio Exterior*, 2011, Costa Rica. Descarga 18 de marzo, 2011, <http://servicios.procomer.go.cr/estadisticas/inicio.aspx>
15. Banco Central de Costa Rica (BCCR). *Memoria Anual 2007*, San José, Costa Rica, 2008.
16. Instituto Nacional de Estadística y Censos, *Anuario Estadístico 2007*, San José, Costa Rica, 2008.
17. Estado de la Nación. *Informe 14, 2008*, San José, Costa Rica, 2008, pp 83-200
18. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. *Estadísticas Sectoriales 2004-2007*, San José, Costa Rica, 2008
19. Ministerio de Salud. *Normativas de Reportes Operacionales de Aguas Residuales y Emisiones de Calderas, según decretos D-33601-S, D-26042-S-MINAET y D-30222-S-MINAET*.
20. Environmental Protection Agency. Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors (FIRE, SPECIATE, AP42), 2011, USA. Descargada: 5 de febrero, 2011, <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
21. Fournier M. L., Ramírez F. y Ruepert C. (2007) *Inventario de plaguicidas COPs y otros obsoletos en Costa Rica*, Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
22. Ramírez, F., *Importación de plaguicidas en Costa Rica: Periodo 2007-2010*, Informe del Área de Diagnóstico del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2011.
23. Yarwood, G., Wilson, G. Shepard S. *Users Guide to the Global Biosphere Emissions and Interaction System (GLOBEIS)*, ENVIRON Inc., California, USA, 2007.
24. California Emission Inventory Development and Reporting System. *Emission Inventory Documentation*, CIEDARS, 2000, USA. Descargada: 12 enero, 2010, <http://www.arb.ca.gov/ei/documentation.htm> .
25. Blanco, R., González, J. *Elaboración de Normas Técnicas sobre la Calidad del Combustibles Vendido en Costa Rica*, CELEQ, ARESEP y FUNDEVI, San José, Costa Rica, 2003.

26. MOTP. *Información Estadística del Transporte Público*, Consejo de Transporte Público, solicitado por el IEM, Costa Rica, 2010.
27. Instituto Nacional de Seguros. *Estadística de Vehículos con Marchamo pago al 2008*, Información solicitada por el IEM, Costa Rica, 2010.
28. Fernando Alvarado Z. *Informe de parque automotor en circulación*, Dirección Sectorial de Energía, San José, Costa Rica, 2009.
29. Environmental Protection Agency. *MOBILE 6 Vehicle Emission Modeling Software*, 2011, USA. Descargada 10 marzo, 2011, <http://www.epa.gov/oms/m6.htm>
30. Herrera, J., Rodríguez, S., Rojas, F. *Tecnología en Marcha*, **2012**, 25, pp. 54-63.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo tuvo el apoyo del Laboratorio de Análisis Ambiental y de la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, así como del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Costa Rica, del cual el Ing. Javier Rodríguez fue becario.