

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
ESCUELA DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN GESTIÓN Y ESTUDIOS AMBIENTALES**

**INVENTARIO DE COMPUESTOS TOXICOS PELIGROSOS DEL AIRE  
EN EL GRAN AREA METROPOLITANA, PARA EL AÑO 2007.**

**Tesis sometida a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de  
Química de la Universidad Nacional para optar al grado de Maestría en  
Ciencias con énfasis en Gestión y Estudios Ambientales.**

**JAVIER E. RODRIGUEZ YAÑEZ**

**Heredia, Costa Rica**

**Noviembre, 2012**

Tesis aprobada por el Tribunal Examinador de la Escuela de Química de la Universidad Nacional para optar al grado de Maestría en Ciencias con énfasis en Gestión y Estudios Ambientales.

## **MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**

.....  
Dr. Willy Soto Acosta  
Representante del Consejo Central de Estudios de Posgrado

.....  
Ph.D. Juan Valdés González  
Coordinador Programa de Posgrado

.....  
Dr. Jorge Herrera Murillo  
Tutor

.....  
Dr. Roy Soto Fallas  
Asesor

.....  
Dra. Silvia Soto  
Asesora

.....  
Ing. Quím. Javier E. Rodríguez Yáñez  
Sustentante

## RESUMEN

Javier E. Rodríguez Yáñez

“INVENTARIO DE COMPUESTOS TOXICOS PELIGROSOS DEL AIRE EN EL GRAN AREA METROPOLITANA, PARA EL AÑO 2007”

Se elaboró un inventario de compuestos tóxicos en el aire de la GAM aplicando las mismas metodologías empleadas en los inventarios realizados en México, adaptadas a las características de Costa Rica y utilizando como referencia los compuestos tóxicos del aire definidos por la EPA.

Se obtuvo la información requerida de entes públicos y privados, aplicando los cálculos en planillas Excel, para luego clasificarlos de acuerdo con la categoría de tóxico y del tipo de fuente de emisión.

El nivel de emisiones estimado para el GAM en el 2007 fue de aproximadamente 1.309.372 ton/año, de las cuales 6.974 ton/año se asociaron con emisiones antropogénicas. Lo anterior sugiere un elevado aporte de fuentes naturales (99,5 %).

Dentro de las emisiones antropogénicas predominan las fuentes de área, con un 81 % del total, asociadas principalmente con disolventes domésticos, pinturas arquitectónicas e industriales y artes gráficas.

Se encontraron emisiones asociadas con 84 compuestos tóxicos; los principales compuestos tóxicos antropogénicos encontrados en orden de importancia fueron: tolueno, metano, xileno, formaldehído y benceno, seguidos por bromuro de metilo, hexano, m-xileno, ácido clorhídrico, p-xileno y clorobenceno. Estos compuestos representaron el 80 % de las emisiones antropogénicas.

Los compuestos metálicos representaron menos del 1 % de las emisiones antropogénicas, teniendo como principal componente el plomo.

Las emisiones de compuestos tóxicos representan, en términos generales, algo menos del 1 % de las importaciones de dichos compuestos al país.

La evaluación cualitativa de la incertidumbre sugirió la necesidad de mejorar la sistematización de la información disponible.

El inventario plantea un marco de referencia para la aplicación de políticas ambientales asociadas con las emisiones al aire.

## **ABSTRACT**

Javier E. Rodríguez Yáñez

"TOXIC COMPOUNDS INVENTORY OF HAZARDOUS AIR IN THE GREATER METROPOLITAN AREA, FOR THE YEAR 2007"

An inventory of air toxic compounds in the GAM was prepared applying the same methodologies employed in inventories carried out in Mexico, adapted to the characteristics of Costa Rica, and using as reference the air toxics defined by the EPA.

The information required was collected from public and private entities, applying the calculations in Excel spreadsheets and then classified according to their toxic category and their emission source.

The level of emissions estimated for the GAM in 2007 was about 1.309.372 tons/year, of which 6.974 tons/year were associated with anthropogenic emissions, which suggests a high contribution from natural sources (99,5 %)

Among anthropogenic sources, area ones predominate with an 81 %, mainly associated with domestic solvents, paints industrials and architectural and graphic arts.

There were found emissions associated with 84 toxic compounds, the main anthropogenic toxic compounds found, in order of importance, were: toluene, methane, xylene, formaldehyde, and benzene, followed by methyl bromide, hexane, m-xylene, hydrochloric acid, p-xylene and chlorobenzene. These compounds summed up for an 80 % of anthropogenic emissions.

The metallic compounds represented less than 1 % of anthropogenic emissions, being lead the principal component.

Emissions of toxic compounds represent, overall, slightly less than 1 % of imports of such compounds to the country.

The qualitative assessment of uncertainty suggested there is a need to improve the systematization of the available information.

The inventory presents a framework for the implementation of environmental policies related to air emissions.

.

## **AGRADECIMIENTOS**

Todo proyecto de investigación tiene un componente en el apoyo y la colaboración de otras personas e investigadores, que en el fondo son los que hacen posible el acceso a la información, su comprensión y análisis, así como un necesario apoyo emocional para mantenerse en el camino hacia el objetivo planteado, aun cuando flaquean las fuerzas o los ánimos.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de un sin fin de personas e instituciones a mí alrededor, de las que quiero destacar las siguientes:

El tutor, los asesores y el grupo de trabajo del Laboratorio de Análisis Ambiental.

El Ministerio de Ciencia y Tecnología, del cual soy becario.

Para DIGECA, por su apoyo al proyecto y a su personal que colaboró en la mayoría de las informaciones relacionadas o sabiendo con quien hablar. En particular el apoyo de la Ing. Quím. Katia Aguilar y el Lic. Walter Zavala.

El personal de Ministerio de Salud, en especial en el área de Desarrollo Humano, Normalización y Atención Externa, así como Registro de Productos. Con el apoyo especial de Ing. Quím. Ana Villalobos y el Ing. Andrés Incer.

Al Laboratorio de Aduanas y PROCOMER, quien nos colaboró y explicó la utilización de los aranceles para la obtención de información de exportación e importación.

Al ICD por su aporte en cuanto a las cantidades de los productos controlados.

Al IRET por su apoyo con la comprensión de plaguicidas y su uso en el país.

El MAG, en especial el SFE y el Centro de Estadísticas.

Para todas las otras instituciones que con sus colaboraciones permitieron mejorar los resultados de este trabajo, entre ellas el MOPT, INS, Registro Nacional, RECOPE, Cámara de Industria, etc.

Para los amigos que ayudaron en los distintos lugares y momentos, tanto profesional como personal y anímicamente. Aquí quiero destacar al Dr. Gilberto Piedra, al Lic. José Pablo Sibaja, la Lic. Yajaira Salazar, la Ing. Quím. Carolina Alfaro Chinchilla, la Ing. Forestal Virya Bravo y el Lic. Fernando Roldán.

Y por último a todas las personas que de una u otra forma me han ayudado a alcanzar mis metas en esta Tesis.

## **DEDICATORIA**

“Tenemos que detenernos y preguntarnos...  
¿Cuánto aire limpio realmente necesitamos?”

*Lee Lacocca*, ex presidente de Chrysler

“En una época de engaño universal, decir la verdad es un acto revolucionario.”

*George Orwell*

A mi madre...Ing. Agrimensor Topógrafo María Elena Yáñez Martínez, por darme esas ansias de conocimiento y ese espíritu de lucha para con lo que uno cree.

A mi esposa...M. Sc. Quím. Guadalupe Tres Calvo, por enseñarme que la vida es mucho más... y que siempre hay que confiar en Dios y la gente.

A mi hijo Ahron, por completar mi felicidad.

## INDICE DE CONTENIDOS

	Página
INDICE DE CUADROS .....	x
INDICE DE GRAFICOS .....	xi
INDICE DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes y justificación.....	1
1.2. Planteamiento del tema .....	5
1.3. Objetivos .....	7
1.3.1.Objetivo general: .....	7
1.3.2. Objetivos específicos:.....	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	8
CAPÍTULO III.METODOLOGÍA.....	14
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Fase I: Definición de las características del inventario .....	14
3.1.1. Año base: .....	14
3.1.2. Ubicación del area y tiempo de estudio:.....	14
3.1.3. Tipo de contaminantes a ser considerados: .....	15
3.2. Fase II: Metodologías de estimación de emisiones .....	15
3.3. Fase III: Fuentes de información.....	16
3.4. Fase IV: Estimación de emisiones.....	16
3.5. Fase V: Evaluación de la congruencia, incertidumbre y aseguramiento de la calidad de los datos.....	17
3.6. Fase VI: Almacenamiento electrónico de los datos y documentación del proceso. ....	17
3.7. Fase VII: Difusión de los resultados del inventario de emisiones.....	18
CAPITULO IV. ANALISIS DE LA INFORMACION Y RESULTADOS .....	19
4.Análisis de la información y presentación de resultados.....	19

4.1. Introducción.....	19
4.2. Descripción general del área de estudio .....	19
4.3. Descripción biofísica .....	19
4.3.1. Aspectos físicos .....	19
4.3.2. Rasgos geo climáticos generales del GAM .....	21
4.3.2.1. Situación geo climática en el 2007 .....	27
4.4. Aspectos socio económicos .....	27
4.4.1. Población .....	27
4.4.2. Vivienda .....	29
4.4.3. Industria .....	29
4.4.4. Transporte.....	30
4.4.5. Servicios .....	33
4.4.6. Vegetación y actividad agropecuaria.....	34
4.4.7. Consumo energético .....	35
4.5. Alcance y procesos .....	41
4.5.1. Características del inventario.....	41
4.5.2. Características temporales .....	41
4.5.3. Características espaciales .....	41
4.5.4. Resolución de especies .....	42
4.5.5. Manejo y obtención de datos .....	42
4.5.6. Control de calidad.....	43
4.6. Inventario de emisiones de compuestos tóxicos del aire en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2007 .....	44
4.6.1. Emisiones Generales.....	44
4.6.2. Principales categorías de emisión.....	50
4.6.3. Principales tóxicos emitidos .....	51
4.6.4. Metales tóxicos .....	57
4.6.5. Emisiones por tipo de fuente .....	58
4.6.5.1. Fuentes fijas .....	58
4.6.5.2. Fuente de área.....	60
4.6.5.3. Fuentes móviles .....	62
4.6.5.4. Fuentes naturales .....	65
4.6.5.5. Distribución espacial .....	65
4.7. Congruencia, incertidumbre y aseguramiento de los datos .....	66
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71

5. Conclusiones y recomendaciones .....	71
5.1. Conclusiones.....	71
5.2. Recomendaciones .....	76
REFERENCIAS .....	79
ANEXOS .....	86
Anexo 1.- Listado de compuestos tóxicos peligrosos del aire, según EPA, HAP, RETC y PBT .....	87
Anexo 2.- Factores de emisión de tóxicos peligrosos .....	92
2.1. Fuentes fijas o puntuales.....	92
2.2. Fuentes de área .....	102
2.3. Fuentes móviles .....	115
2.4. Fuentes naturales o biogénicas .....	123
Anexo 3.- Listado de fuentes típicas de emisión, según EPA .....	124
Anexo 4.- Listado de actores locales principales .....	126
Anexo 5.- Participantes y datos obtenidos.....	128
Anexo 6.- Memorias de cálculo de contaminantes por tipo de fuente. ....	161
6.1. Memoria de cálculo Fuentes fijas o puntuales .....	161
6.2. Memoria de cálculo Fuentes de área .....	189
6.3. Memoria de cálculo Fuentes móviles .....	252
6.4. Memoria de cálculo Fuentes naturales .....	275
6.5. Memoria de cálculo de Incertidumbre.....	284
Anexo 7.- Encuesta del Primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica en el 2007.....	296

## INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.- Listado de algunos compuestos tóxicos prioritarios.....	9
Cuadro 2.- Listado de cantones por provincia en el GAM.....	20
Cuadro 3.- Estructura del parque automotor por tipo de vehículo. Período 1996-2002.....	32
Cuadro 4.- Parque automotor por tipo de combustible.....	32
Cuadro 5.- Emisiones globales de tóxicos del aire por fuente y porcentajes correspondientes.....	45
Cuadro 6.- Emisiones anuales por categoría, así como sus porcentajes generales y antropogénico.....	46
Cuadro 7.- Categorías principales de emisión antropogénicas de contaminantes tóxicos del aire.....	50
Cuadro 8.- Compuestos tóxicos principales emitidos en el GAM en el 2007.....	52
Cuadro 9.- Tóxicos del aire en el GAM para el 2007, por tipo de fuente.....	56
Cuadro 10.- Metales tóxicos del aire evaluados para el GAM.....	57
Cuadro 11.- Tóxicos emitidos por Fuentes fijas y sus porcentajes relativos a Fuentes fijas y a la emisión global de dicho toxico.....	59
Cuadro 12.- Tóxicos principales emitidos por Fuentes de área.....	60
Cuadro 13.- Tóxicos principales emitidos por Fuentes de área discriminados por categorías generales.....	61
Cuadro 14.- Emisiones de tóxicos de Fuentes móviles.....	62
Cuadro 15.- Detalle de emisiones por categoría de vehículos.....	64
Cuadro 16.- Emisiones de tóxicos del aire de Fuentes naturales.....	65
Cuadro 17.- Clasificación cualitativa de los datos de actividad y factores de emisión utilizados en los cálculos del inventario.....	67
Cuadro 18.- Escala de valoración cualitativa de incertidumbre.....	67
Cuadro 19.- Compuestos tóxicos del aire en el GAM para el 2007, con su estimación cualitativa de error y porcentaje respecto a la importación.....	68

## INDICE DE GRAFICOS

	Página
Gráfico 1.- Valores anuales de radiación para Costa Rica.....	22
Gráfico 2.- Valores medios anuales de brillo solar en Costa Rica.....	22
Gráfico 3.- Esquema de las direcciones principales de los vientos en el GAM.....	23
Gráfico 4.- Valores medios anuales de precipitación para Costa Rica.....	24
Gráfico 5.-Valores medios anuales de precipitación para los Valles Occidental y Oriental en el GAM.....	24
Gráfico 6.-Valores medios anuales de temperatura para Costa Rica.....	25
Gráfico 7.-Variación media de la temperatura en el GAM en función de las horas del día y las épocas del año, abril estación seca y octubre estación húmeda.....	26
Gráfico 8.-Variación de las temperaturas máximas, mínimas y amplitud en el Valle Occidental y Oriental del GAM.....	26
Gráfico 9.- Población en el GAM por cantones.....	28
Gráfico 10.- Crecimiento poblacional por distrito en el GAM.....	28
Gráfico 11.- Crecimiento de la población y del parque vehicular en Costa Rica por año.....	31
Gráfico 12a.- Distribución de edad del parque automotor para inicios del 2008 (INS, 2008).....	33
Gráfico 12b.- Edad promedio de los distintos tipos de vehículos a inicios del 2008 (INS, 2008).....	33
Gráfico 13.- Mapa de cobertura forestal, agropecuaria y área urbana.....	35
Gráfico 14.- Distribución del consumo final de energía por fuente en Costa Rica...	36
Gráfico 15.- Consumo energético por sector.....	37
Gráfico 16.- Consumo de combustibles fósiles por tipo de uso.....	37
Gráfico 17.- Consumo de los combustibles de petróleo en el transporte.....	38
Gráfico 18.- Consumo de derivados de petróleo y su crecimiento.....	38
Gráfico 19.- Distribución de fuentes de generación de energía.....	39
Gráfico 20.- Crecimiento del consumo eléctrico.....	39
Gráfico 21.- Consumo de electricidad por sectores.....	40
Gráfico 22.- Emisiones de contaminantes tóxicos antropogénicas.....	45
Gráfico 23.- Aportes de tipos de Fuentes a los contaminantes tóxicos principales de la GAM.....	56
Gráfico 24.- Porcentaje de emisiones de tóxicos de fuentes móviles por categoría.....	63

## INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.- Plano de ubicación del GAM en Costa Rica.....	4
Figura 2.- Efectos principales de algunos contaminantes tóxicos del aire.....	8
Figura 3.- Contaminantes tóxicos de Fuentes de Área.....	12
Figura 4.- Tipos de emisiones y contaminantes tóxicos de Fuentes Móviles.....	13
Figura 5.- Detalle del GAM y su división política.....	20

## LISTA DE ABREVIATURAS

Air Chief-	<i>Air Clearinghouse for Inventories and Emission Factors</i> (Oficina de Inventarios y Factores de Emisión al Aire)
AP42-	<i>Compilation of Air Pollutant Emission Factors</i> (Recopilación de Factores de Emisión de Contaminantes)
ARESEP-	<i>Autoridad Reguladora de Servicios Públicos</i>
BCCR-	<i>Banco Central de Costa Rica</i>
BEP-	Barriles Equivalentes de Petróleo
CATEF-	<i>California Air Toxics Emission Factor Database</i> (Base de Datos de Factores de Emisión de Compuestos Tóxicos del Aire del estado de California)
CCAD -	<i>Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo</i>
CCSS-	<i>Caja Costarricense de Seguro Social</i>
CICR -	<i>Cámara de Industrias de Costa Rica</i>
CIEDARS-	<i>California Emission Inventory Development and Reporting System</i> (Desarrollo del Inventario de Emisiones y Sistema de Reporte del estado de California)
CIU-	<i>Clasificación Industrial Internacional Unificada</i>
CNP+L -	<i>Centro Nacional de Producción más Limpia</i>
CONARE-	<i>Comisión Nacional de Rectores</i>
COP-	<i>Contaminantes Orgánicos Persistentes</i>
COT -	<i>Contaminantes Orgánicos Totales</i>
DIGECA-	<i>Dirección Gestión de la Calidad Ambiental</i>
EE.UU.-	<i>Estados Unidos de América.</i>
EPA -	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agencia de Protección Ambiental)
ERG -	<i>Eastern Research Group</i> (Grupo de Investigación del Este)
FAA-	<i>Federal Aviation Administration</i> (Administración Federal de Aviación)
FAEED-	<i>Aircraft Engine Emission Database</i> (Base de Datos de Emisiones de Motores de Aeronaves)

FIRE-	<i>Factor Information Retrieval</i> (Recuperación del Factor de Información)
GAM-	<i>Gran Área Metropolitana</i>
GCA-	<i>Gestión de la Calidad del Aire</i>
GEI-	<i>Gases de Efecto Invernadero</i>
GLOBEIS-	<i>Global Biosphere Emissions and Interactions System</i> (Emisiones Globales de la Biosfera y Sistema de Interacciones)
GLP-	<i>Gas Licuado de Petróleo</i>
GOT-	<i>Gases Orgánicos Totales</i>
ha-	hectáreas
hab-	habitantes
HAP-	<i>Hazardous Air Pollutant</i> (Contaminantes Peligrosos del Aire)
ICCA-	<i>Inventario de Contaminantes Criterio del Aire.</i>
ICD-	<i>Instituto de Control de Drogas</i>
ICTA-	<i>Inventario de Contaminantes Tóxicos del Aire.</i>
IEM-	<i>Inventario de Emisiones Metropolitanas de Contaminantes Criterio.</i>
IMN-	<i>Instituto Meteorológico Nacional</i>
INCOFER-	<i>Instituto Costarricense de Ferrocarriles</i>
INE –	<i>Instituto Nacional de Ecología</i>
INS-	<i>Instituto Nacional de Seguros</i>
INSUMOSYS	<i>Sistema de consulta de plaguicidas, equipos de aplicación y fertilizantes autorizados</i>
IPCC-	<i>Intergovernmental Panel of Climate Change</i> (Panel Intergubernamental de Cambio Climático)
IRET-	<i>Instituto Regional de Estudio de Sustancias Tóxicas</i>
ITA-	<i>Inventario de Tóxicos del Aire</i>
ITCR-	<i>Instituto Tecnológico de Costa Rica.</i>
LANAME-	<i>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales</i>
MAG-	<i>Ministerio de Agricultura y Ganadería</i>
MCCM-	<i>Multiscale Climatic Chemistry Model</i> (Modelo Químico Climático Multiescala)

MH –	<i>Ministerio de Hacienda</i>
MINAET-	<i>Ministerio de Ambiente Energía y Telecomunicaciones</i>
MinSa –	<i>Ministerio de Salud</i>
MOPT –	<i>Ministerio de Obras Públicas y Transporte</i>
MREC –	<i>Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto</i>
msnm-	metros sobre el nivel del mar
NASTRO-	<i>North American study of tropospheric ozone and PM</i> (Estudio del ozono troposférico y el PM en América del Norte)
NMHC-	<i>No Metanogenic HydroCarbons</i> (Hidrocarburos No Metanogénicos)
ONG –	<i>Organización No Gubernamental</i>
PAR-	<i>Photosynthetic Active Radiation</i> (Radiación Fotosintética Activa)
PBT-	<i>Persistent Bioaccumulative Toxicchemical</i> (Contaminante Tóxico Bioacumulativo Persistente)
PECOR-	<i>Perfiles de Emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Zona Metropolitana de Ciudad de México.</i>
PEMEX-	<i>Petróleos Mexicanos</i>
PIB -	<i>Producto Interno Bruto</i>
PICCA -	<i>Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica</i>
PM 10 –	<i>Partículas menores o iguales a 10 micras</i>
PM 2,5 -	<i>Partículas menores o iguales a 2,5 micras</i>
PMSP-	<i>Particulate matter (PM) Speciation Profiles</i> (Perfiles de Especiación de Material Particulado)
PNDU-	<i>Plan Nacional de Desarrollo Urbano</i>
PNMCA-	<i>Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire</i>
PNUMA-	<i>Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente</i>
PROCOMER	<i>Promotora de Comercio Exterior</i>
PRUGAM -	<i>Planificación Regional Urbana del GAM</i>
PTS -	<i>Partículas totales suspendidas</i>
PYME-	<i>Pequeñas y Medianas Empresas</i>
RECOPE-	<i>Refinadora Costarricense de Petróleo</i>

RETC-	<i>Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes</i>
SEMARNAT-	<i>Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales</i>
SEPSA-	<i>Secretaria Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria</i>
SFE-	<i>Servicio Fitosanitario del Estado</i>
SICA-	<i>Sistema Integración Centro Americana</i>
SIG-	<i>Sistema de Información Geográfica</i>
SIIM-	<i>Sistema Integrado de Información Medioambiental</i>
SPECIATE-	<i>Speciation Database Development</i> (Desarrollo de Base de Datos por Especie)
t -	toneladas
TICA-	<i>Tecnología de Información para el Control Aduanero</i>
UCR-	<i>Universidad de Costa Rica</i>
UNA-	<i>Universidad Nacional</i>
UNAM-	<i>Universidad Autónoma de México.</i>
VOC -	<i>Volatile Organic Compounds</i> (Compuestos Orgánicos Volátiles)
ZMVM -	<i>Zona Metropolitana del Valle de México</i>

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1. INTRODUCCIÓN**

#### ***1.1. Antecedentes y justificación***

Cada vez existen más evidencias de los efectos que la contaminación del aire provoca sobre la salud pública, tanto en Costa Rica como en otras partes del mundo; especialmente en ambientes urbanos que con frecuencia registran concentraciones elevadas de contaminantes.<sup>1-15</sup>

La contaminación del aire resulta de una compleja suma de fuentes de emisión que van desde las industrias o los vehículos de transporte, hasta el uso de productos de limpieza domésticos y pinturas, o incluso la vida animal y vegetal.

Es debido a la participación de todos estos factores que se requieren inventarios detallados de emisiones para identificar las diferentes fuentes de emisión y su contribución a la problemática de la contaminación del aire en una región determinada, lo cual constituye uno de los primeros pasos en la Gestión de la Calidad del Aire (GCA).<sup>1-5</sup>

La realización de inventarios ambientales cobra importancia en los años noventa, como herramienta de información y evaluación ambiental en distintos países como EE.UU., México y algunos de Europa.<sup>1-5</sup>

Los primeros inventarios o cuantificaciones de contaminantes del aire surgieron en EE.UU., de entes estatales o privados desde finales de los años setenta, en particular a partir de la aprobación de la Ley de Aire Limpio de 1977.<sup>10-25</sup> Inicialmente dichos inventarios estuvieron asociados a evaluaciones de la calidad del aire, primero por medición de partículas totales suspendidas (PTS) y luego las menores a 10 micras (PM10) y los compuestos volátiles orgánicos (VOC), para regiones o zonas con problemáticas específicas, como puede ser la región de Nueva York, el Distrito Federal de la Ciudad de México o Santiago de Chile.<sup>6-15</sup>

Posteriormente, con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y en especial en los últimos años a través de su apoyo a los Sistemas de Información como el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC),

se ha logrado obtener en algunos países una visión más clara de las situaciones regionales de la calidad del aire.<sup>26-29</sup>

En América Latina, países como México, Brasil y Chile son los iniciadores de los procesos para la generación de inventarios de la calidad del aire, en cada caso, asociado a problemas graves de contaminación de aire en áreas específicas (Ciudad de México, San Pablo y Santiago de Chile).<sup>30</sup>

Los datos recolectados en México se utilizan como referencia en Centroamérica, debido a sus similitudes con la región y a su temprana preocupación por los temas de la calidad del aire, con evaluaciones puntuales desde los años setenta, que llevaron a la publicación del Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire y del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) del año 1988, con el cual se elaboró el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA).<sup>10-12</sup>

En el año 1989, México es elegido en América Latina por la PNUMA como el país modelo para el desarrollo de evaluaciones ambientales e inventarios de emisiones. Se inician así una serie de estudios de calidad de aire e inventarios de compuestos tóxicos y contaminantes del aire, en distintas partes de México.<sup>22</sup> Hoy en día, México a través del Instituto Nacional de Ecología (INE), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y otras instituciones, ha ido desarrollando evaluaciones periódicas e inventarios de los contaminantes del aire. En 1991 se inició la elaboración de inventarios, primero con contaminantes específicos (contaminantes criterio, metales o VOC) y luego se amplió a contaminantes tóxicos.<sup>6-12</sup>

Estas evaluaciones permiten caracterizar las problemáticas respecto a los niveles de emisión y afectación de dichos contaminantes, así como el desarrollo y el análisis de nuevas medidas de control de los mismos. También aportan insumos necesarios para la aplicación de modelos de predicción y simulación de la calidad del aire, por ejemplo con el programa del Modelo Químico Climático Multiescala (o MCCM por sus siglas en inglés).<sup>31-33</sup>

La mayoría de los países de Centroamérica tienen consideraciones globales de mejora ambiental dentro de sus políticas, y están suscritos a la mayoría de los convenios relacionados con los temas de calidad de aire. No obstante, siguen presentando problemas

en la implementación y regulación de las medidas necesarias para mejorar las condiciones ambientales en sus países.<sup>34</sup>

Costa Rica no escapa a esta realidad, presentando problemas de infraestructura, personal y medios económicos, que impiden tanto el adecuado control ambiental, como el desarrollo de inventarios.

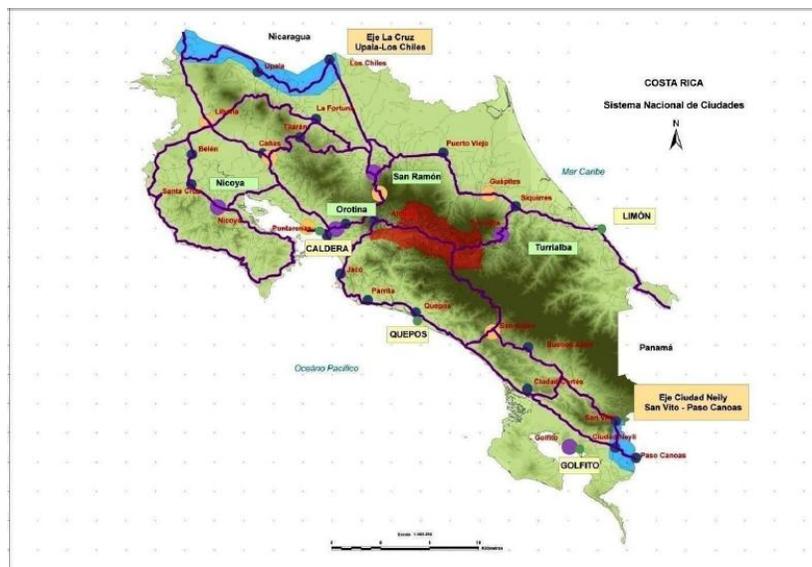
En este marco regional se cuenta con apoyo de otros países fuera del istmo para el mejoramiento y desarrollo del control ambiental, particularmente a través de sus agencias de medio ambiente, como la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EE.UU. o el Instituto Nacional de Ecología (INE) de México, que se unen a iniciativas internacionales, como las de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), el PNUMA y el RETC, entre otros.<sup>17-19, 20-25, 35</sup>

El Ministerio de Ambiente (MINAET) y el Ministerio de Salud (MinSa) en Costa Rica, fueron los encargados de desarrollar, a partir del año 2000, los planes de trabajo, acción, difusión y relacionamiento con la industria y los otros actores ambientales, teniendo en general un impulso más consolidado en lo que respecta a los apoyos políticos y económicos necesarios para el control ambiental y el desarrollo de inventarios.<sup>35-38</sup>

Los inventarios elaborados inicialmente estaban asociados a situaciones puntuales de problemáticas ambientales, locales o generales, produciendo propuestas y fomentando la interrelación de los actores locales (Anexo 4). A partir del año 2002, con la formación de la Dirección General de Calidad Ambiental (DIGECA) en el MINAET, se empezaron a desarrollar inventarios asociados a problemas específicos, entre ellos algunos compuestos tóxicos peligrosos como los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP).<sup>36</sup> En el 2008, se planteó la recolección de información de emisiones al aire de fuentes fijas puntuales, a través del inicio del Plan Nacional para Mejorar la Calidad del Aire, que toma el año 2007 como referencia.<sup>37, 38</sup> Este paso, aunado a los apoyos de los organismos internacionales a través de PNUMA, permiten una mejor disponibilidad de la información y una generación de planes de continuidad, en cuanto a la generación de inventarios ambientales. Dicho año (2007) se eligió como base para el primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire de Costa Rica, que actuaría como marco referencial para futuros inventarios de contaminantes del aire, así como para el desarrollo de otros inventarios, los cuales no se habían desarrollado aún en el país.<sup>39-49</sup>

Para que un inventario de emisiones cumpla con los requerimientos de Gestión de la Calidad del Aire (GCA) se requiere su desarrollo y refinamiento continuo. Tales inventarios deben guardar cierta coherencia metodológica y basarse en los objetivos de la GCA que se pretendan alcanzar; será necesario entonces que los inventarios cuenten con estimaciones de emisiones cada vez más confiables para todas las regiones geográficas de importancia. Adicionalmente, se requiere que los inventarios generados puedan ser utilizados efectivamente en forma conjunta con los procesos de gestión y monitoreo de la calidad del aire, y deben evolucionar con el paso del tiempo y con el desarrollo de nuevas herramientas científicas y tecnológicas.<sup>37-40</sup> En este contexto, el Plan Nacional para Mejorar la Calidad del Aire del Gran Área Metropolitana de Costa Rica, aprobado en octubre de 2008 por parte de las autoridades de los Ministerios de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), Ministerio de Salud, Municipalidad de San José y la Universidad Nacional (UNA), establece dentro de las actividades estratégicas, la necesidad de que se desarrollen en el país inventarios de emisiones.<sup>37</sup>

El Gran Área Metropolitana (GAM) fue definido como área geográfica de importancia en los años noventa, para incluir a los cantones principales del Valle Central, dado su crecimiento poblacional y actividad económica. Dicha área se muestra en la Figura 1.<sup>37, 39</sup>



**Figura 1.** Plano de ubicación del GAM en Costa Rica, donde el GAM está representado por el área en rojo.<sup>37, 39</sup>

Posteriormente, y dadas las características e importancia del GAM, se desarrollaron para esta área una serie de consideraciones en cuanto a vivienda, vialidad y urbanismo, derivadas de la Planificación Regional Urbana del GAM (PRUGAM).<sup>39</sup>

En este contexto, y como consecuencia de la creación de la DIGECA como ente regulador de la calidad ambiental, se comienzan a profundizar las consideraciones sobre la calidad ambiental del país, y del GAM en particular.<sup>37</sup>

Paralelamente, la UNA desarrolló estudios de calidad del aire en varias regiones del GAM, específicamente en San José, Belén, Heredia y Escazú, generando de esta forma una base metodológica para la evaluación de la contaminación del aire, inicialmente enfocada a partículas (PTS y PM10) y luego ampliada a otros contaminantes.<sup>15, 40</sup>

La contaminación atmosférica del GAM está influenciada por las características geográficas y climáticas de la región, teniendo paralelamente una gran influencia el crecimiento poblacional e industrial, ya que en dicha región se concentra más del 60% de la población y del 70% de las industrias de Costa Rica.<sup>37, 41</sup>

Lo anterior conlleva a reconocer la necesidad de aplicar herramientas de Gestión de la Calidad del Aire en el GAM, como medio de valoración de la situación existente en la principal área de Costa Rica.

## ***1.2. Planteamiento del tema***

Un inventario está concebido para formar parte del Sistema Integrado de Información Medioambiental (SIIM) de un país, generando una referencia ambiental de la situación en el mismo, que permita comparar situaciones a futuro.<sup>2-16, 26</sup> A su vez dicha información está asociada a herramientas del Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permite generar predicciones y simulaciones de la calidad del ambiente, durante un período considerado y a futuro. Adicionalmente permite la realización de la caracterización *temporal* y *espacial* de las emisiones, pudiendo también comparar los valores obtenidos con los análisis de contralor en campo.<sup>4-14</sup> Esto permite identificar las tendencias en la utilización, la generación, la emisión y la caracterización de los contaminantes principales.

Una parte integral de la GCA es el desarrollo de inventarios de emisiones que guarden coherencia metodológica con los objetivos planteados, así como con un refinamiento continuo de los mismos, de acuerdo con lo que establece el PNMCA para el GAM.<sup>37, 39, 42</sup>

La falta de información ambiental, y los compromisos asumidos por el Estado en cuanto a los controles de sustancias tóxicas con efectos ambientales, ha llevado a considerar la necesidad de la realizar estudios locales, urgentes y específicos de sustancias o grupos de sustancias, para tomar las acciones correctivas o preventivas en cada caso. Esto conllevó a que actualmente se comience a considerar la necesidad de inventarios de emisiones como herramienta de referencia y control en el accionar ambiental.<sup>16</sup>

En el caso de los inventarios de calidad de aire existen dos niveles básicos: Inventarios de Contaminantes Criterio del Aire (ICCA) en un primer nivel e Inventarios de Contaminantes Tóxicos del Aire (ICTA) en un segundo nivel.

El primer nivel (ICCA) se lleva a cabo realizando en forma detallada una evaluación de las emisiones de contaminantes del aire utilizados como criterio para definir niveles permisibles de sustancias en aire que no afecten la salud pública y el medio ambiente, lo que permite establecer una evaluación general de la calidad del aire.<sup>21</sup> El segundo nivel (ICTA) considera aquellos compuestos que representan un peligro para la salud humana por su toxicidad o por las cantidades que son emitidas en la zona de evaluación.<sup>6-12</sup>

La idea general de la aplicación de los inventarios es identificar tanto las actividades de mayor contribución a la contaminación como las fuentes hacia las cuales pueden dirigirse los esfuerzos de reducción o mitigación de contaminantes.

En consecuencia, es recomendable para el país, y para el GAM en particular, realizar inventarios de contaminantes tóxicos del aire tomando como marco el ICCA desarrollado para el año 2007.<sup>49</sup>

El presente trabajo de tesis pretende desarrollar un Inventario de Contaminantes Tóxicos Peligrosos del Aire para el GAM en el año establecido como referencia (2007), integrando las distintas emisiones de los contaminantes considerados como tóxicos peligrosos para la salud, en un área geográfica definida de importancia para su control ambiental, y complementando el ICCA desarrollado en dichas condiciones. Apuntando con esto primeramente a un conocimiento de la situación, respecto a los contaminantes tóxicos en

ese año, y posteriormente a consideraciones sobre las posibilidades de control y mejoramiento de la calidad del aire en el GAM, para dichos compuestos.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general:**

Desarrollar el primer inventario de emisiones de compuestos tóxicos peligrosos al aire en el Gran Área Metropolitana, para el año 2007, con el propósito de cuantificar las emisiones de los compuestos tóxicos más relevantes y proveer a los actores ambientales de información que les permita controlar, dar seguimiento y mejorar la calidad de aire, del GAM.

#### **1.3.2. Objetivos específicos:**

1. Identificar los compuestos tóxicos del aire más importantes que se emiten en el GAM, durante el año 2007.
2. Recolectar y seleccionar información aplicable en el inventario de compuestos tóxicos peligrosos del aire, de los distintos entes públicos o privados a nivel nacional. Elaborar el inventario de compuestos tóxicos peligrosos del aire a partir de recolección y selección de la información obtenida de entes públicos y privados nacionales.
3. Procesar, analizar y difundir los resultados de esta investigación, por canales oficiales y académicos, para su utilización en la disminución de las emisiones de compuestos tóxicos del aire, por parte de los actores ambientales locales y otros interesados.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2. MARCO TEÓRICO

Dentro de los contaminantes principales del aire se identifican dos tipos básicos asociados mayormente a las actividades antropogénicas, definidos generalmente como Contaminantes Criterio y Contaminantes No Criterio.

Los Contaminantes Criterio, como los NO<sub>x</sub>, los SO<sub>x</sub>, el CO, los VOC, el O<sub>3</sub>, el NH<sub>3</sub>, las PM<sub>10</sub> y las PM<sub>2,5</sub>, están asociados a la calidad general del aire y a la posible afectación del bienestar y la salud humana, pero de tipo epidemiológico en función de relaciones dosis-respuesta, con efectos adversos usualmente no significativos. Generalmente para estos contaminantes se definen guías, normas y/o reglamentos, definiendo límites permitidos para un periodo de tiempo específico a fin de proteger la salud humana y el ambiente.<sup>18, 21, 25</sup>

Los Contaminantes No Criterio, plantean situaciones específicas de problemáticas ambientales con determinados compuestos en el aire, entre ellos los denominados Contaminantes Tóxicos del Aire.

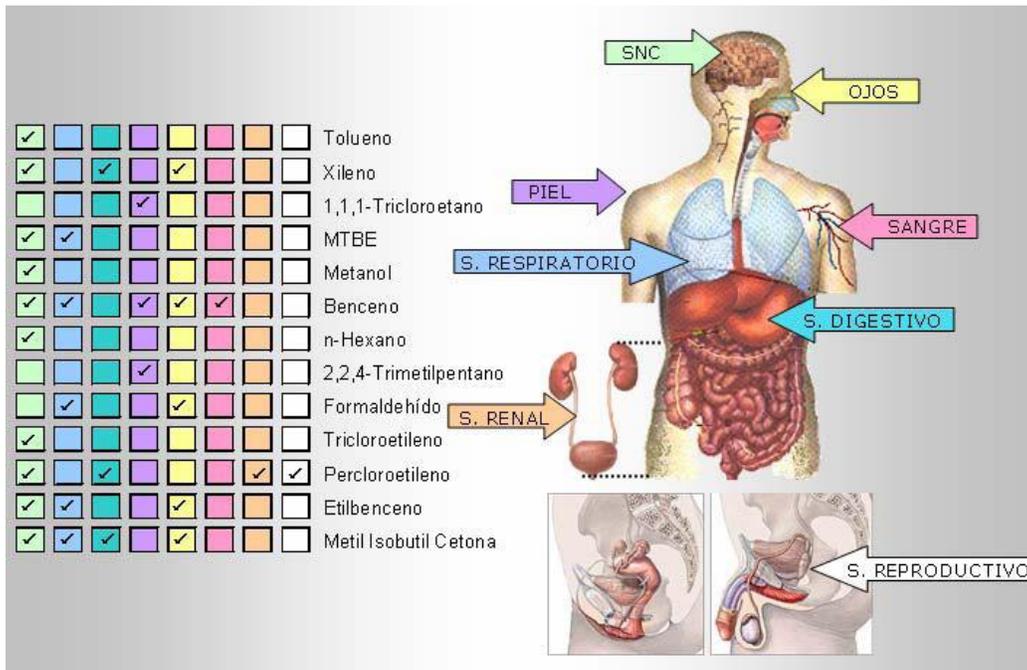


Figura 2.- Efectos principales de algunos contaminantes tóxicos del aire.<sup>9</sup>

Para definir que es un Contaminante Tóxico en el ambiente, se debe asociar el mismo a compuestos químicos en la atmósfera que son nocivos para la salud, por ejemplo los Contaminantes Peligrosos del Aire (*Hazardous Air Pollutant* o HAP) o los Tóxicos del Aire definidos por la EPA, etc.<sup>20-25, 36,42</sup>

Debe considerarse también que dichos compuestos pueden generar distintas afectaciones a la salud humana, como los que se enumeran en la Figura 2.

En el Cuadro 1 se presentan 22 compuestos tóxicos del aire, los cuales aparecen en varios de dichos listados.

**Cuadro 1.-** Listado de algunos compuestos tóxicos del aire

1,1,2,2-Tetracloroetano*	Cloruro de metileno*
1,2-Dicloroetano*	Cloruro de vinilo*
Acetaldehído*	Cromo (compuestos)*
Acrilonitrilo*	Formaldehído*
Acroleína*	Hexaclorobenceno**
Arsénico (compuestos)*	Hidracina*
Benceno*	Mercurio (compuestos)**
Bifenilospoliclorados	Níquel (Compuestos)*
Butadieno (1,3 Butadieno)*	Plomo (compuestos)**
Cadmio (compuestos)*	Tetracloruro de carbono*
Cloroformo*	Tricloroetileno*

\* Contaminantes presentes en los listados de EPA, HAP's prioritarios de EPA, RETC y HAP's Urbanos.

\*\* Contaminantes presentes en los listados de EPA, HAP, RETC, PBT y otros.<sup>9</sup>

La definición de contaminante tóxico del aire depende de los posibles efectos sobre la salud que dicho contaminante pueda generar sobre el ser humano. Esto hace que el criterio de selección sea algo difícil, dado que los efectos sobre la salud dependen de las condiciones de uso y posibilidades de exposición a los contaminantes tóxicos, así como de las vías de ingreso al organismo (en general por la respiración). Por ello la selección pasa por consideraciones y estudios que relacionan la sustancia con efectos sobre la salud, a partir de ensayos médicos, teniendo en cuenta que sea un compuesto que se disperse en el aire.<sup>6-27</sup>

Algunos países o instituciones han definido listados específicos de compuestos tóxicos del aire (Anexo 1); en este estudio se hace uso de la clasificación hecha por la EPA.<sup>6-12, 25</sup>

La mayoría de los compuestos considerados tóxicos son productos sintetizados por el hombre, lo cual implica la intervención de la industria química o la importación de estos productos para consumo industrial o comercial.<sup>6-12, 25</sup> La importación de productos al país es evaluada en función de la información emanada por la Promotora de Comercio Exterior (PROCOMER) (Anexo 5).

Los usos principales de los compuestos tóxicos en el país estarían asociados con la producción industrial, así como con la venta de productos de uso final por comercios. En general, la utilización de tales compuestos no se lleva a cabo en las mejores condiciones, por cuanto se realiza en ambientes poco controlados o que permiten su libre emisión.

Un inventario de emisiones es una herramienta de cálculo estimativo diseñada para la evaluación de las emisiones de compuestos específicos, en este caso en particular, aplicado a compuestos definidos como tóxicos del aire. El inventario es utilizado como un diagnóstico de situación en el cual se identifican las problemáticas principales asociadas con las emisiones de compuestos tóxicos al ambiente. Esta herramienta, aplicada sistemáticamente, permite evaluar la calidad ambiental de la zona geográfica en cuestión, planteando la posibilidad de implementar medidas ambientales dentro de la Gestión de la Calidad del Aire.

El proceso de Planificación y Gestión de la Calidad del Aire sigue, en general, los tres pasos que se presentan a continuación:<sup>1, 4, 5</sup>

- Documentación de los niveles actuales de la calidad del aire y la comparación con las normas y criterios de calidad vigentes.
- Planificación de cómo las normas se cumplirán en el futuro.
- Gestionar las estrategias para promover mejores niveles de calidad del aire, y cumplir con las normas y criterios de calidad del mismo.

El primer paso de todo el proceso es identificar las metas de la región para concentraciones atmosféricas de los contaminantes a considerar. Por lo general, estas metas toman la forma de normas que especifican niveles aceptables de calidad del aire. Estas normas se basan a su vez en otras normas y en investigaciones científicas relacionadas con los efectos sobre la salud que provoca la contaminación atmosférica.<sup>37, 39, 43</sup>

Para determinar el cumplimiento de estas normas se emplean redes de monitoreo de la calidad del aire, a través de las cuales se miden los niveles actuales de contaminación del aire en la región. Aunque una región puede estar cumpliendo con las normas, el crecimiento económico y de la población puede llevar a futuros sobrepasos de las mismas. Por esta razón, los Programas de Calidad del Aire deben considerar estrategias para lograr y mantener el cumplimiento de las normas de calidad del aire.<sup>37</sup>

Después de establecer normas de calidad del aire e implementar el monitoreo atmosférico, el siguiente paso en el proceso de planificación es identificar y analizar las posibles estrategias para lograr y mantener el cumplimiento de ellas. Este análisis se lleva a cabo empleando herramientas de modelado de calidad del aire, que a su vez tienen como base a los inventarios de emisiones, la información meteorológica y los perfiles del terreno.<sup>31, 44, 45</sup>

El inventario de emisiones es un componente clave en todo Programa de Gestión de la Calidad del Aire: antes de desarrollar estrategias tendientes a mejorar la calidad del aire, debe recopilarse información respecto a las emisiones, incluyendo los tipos de fuentes de emisiones, las cantidades de los contaminantes emitidos, las características temporales y espaciales de las fuentes y de los procesos, así como de las prácticas de control de emisiones que usan las fuentes en la región bajo estudio.

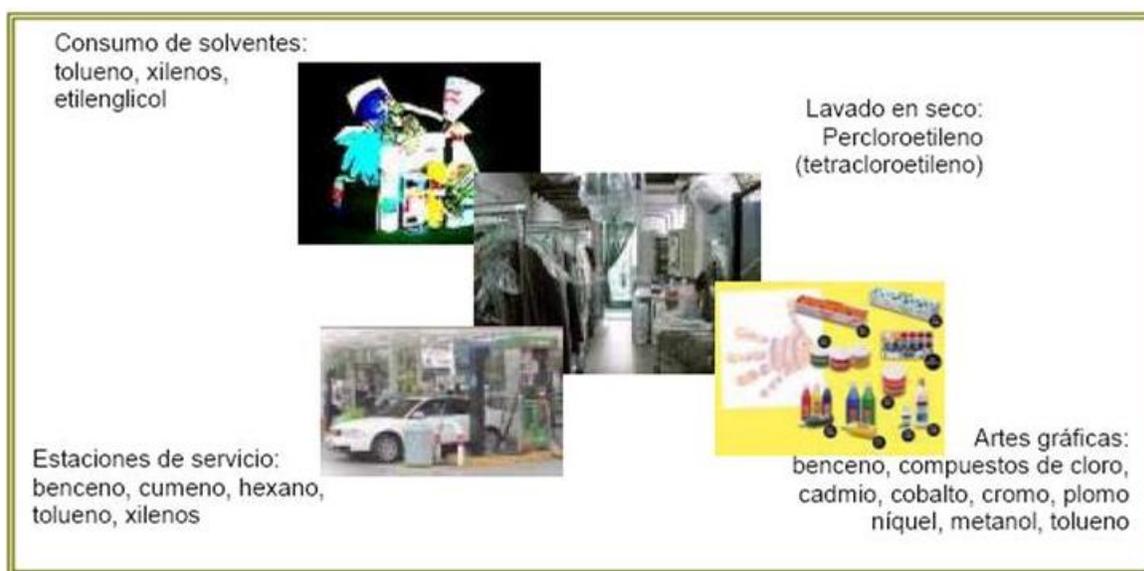
El inventario de emisiones se usa para identificar fuentes que están sujetas a posibles medidas de control, de manera que se pueda evaluar la efectividad de los programas de control, así como para predecir los niveles futuros de calidad del aire a través de modelación. Los datos de emisiones también se utilizan para evaluar la relación costo-efectividad de las posibles estrategias de control de la contaminación.<sup>27, 32, 44</sup>

Para los contaminantes identificados deben definirse los criterios de cálculo para la estimación de las emisiones, que dependerán del tipo de fuente (puntual, móvil, de área, naturales), así como del compuesto considerado y sus características fisicoquímicas, en relación con las condiciones meteorológicas (temperatura, vientos, lluvias, estaciones, entre otros).<sup>4-9, 46, 47</sup>

Las fuentes puntuales, como las industrias, pueden generar distintos tipos de contaminantes, por emisión en sus procesos o por los depósitos de materias primas o por productos químicos que se generen.<sup>4-9, 46, 47</sup>

Los factores de emisión están asociados con el tipo de industria y actividad. Para dichos factores se relacionan dos parámetros principales: el factor de emisión de la actividad específica, expresado como kilogramo de sustancia por tonelada de producto obtenido y el factor de porcentaje del contaminante en la especie general inventariada (como por ejemplo VOC).<sup>4-9, 16-19, 27-29, 48</sup>

Las fuentes de área se asocian a procesos que emiten el mismo contaminante en un área por distintos procesos, asociados en general a áreas urbanas y al consumo de la población, como pueden ser las estaciones de servicio y las lavanderías en seco, entre otras (Figura 3).



**Figura 3.** Contaminantes tóxicos de fuentes de área.<sup>9</sup>

Los factores de cálculo de emisiones son obtenidos de otros inventarios, asociados generalmente con la cantidad de población, los consumos locales o las especies generales ya inventariadas (ejemplo COT o PM10), a menos que se disponga de otros parámetros, como pueden ser las bases de datos de actividades en un área específica.

Las fuentes móviles se asocian generalmente a automóviles, motocicletas, camiones y buses, considerando tanto sus emisiones por escapes como por evaporación (Figura 4).

Los factores de cálculo de emisiones pueden realizarse de forma similar a las de área o utilizando las evaluaciones de COT y PM10, o expresadas en función de la distancia (kilómetro promedio) recorrida por los vehículos que circulaban o algún tipo de evaluación previa de fuentes móviles.<sup>4-9, 17-19, 27-29</sup>

También deben ser consideradas las fuentes naturales de emisiones de contaminantes. Dentro de éstas se encuentran los aportes biogénicos de las plantas y los animales, así como la degradación de los suelos por la erosión eólica y la degradación biológica. Otras emisiones particulares dentro del Valle Central y el GAM, serían los aportes de los volcanes activos que emiten algunos compuestos tóxicos como, por ejemplo, los compuestos de mercurio.<sup>4-9, 17-19, 27-29</sup>



**Figura 4.-Tipos de emisiones y contaminantes tóxicos de fuentes móviles.<sup>9</sup>**

Para la evaluación de estos factores se considerarán las estimaciones de la cantidad de aportes biogénicos al COT y de la erosión al PM10.

## **CAPÍTULO III.METODOLOGÍA**

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología de un inventario involucra una serie de Fases de Definición o Trabajo, basadas en los inventarios para la ciudad de México, las cuales se presentan a continuación.

1-16, 40-48

#### ***3.1. Fase I: Definición de las características del inventario***

El inventario de emisiones desarrollado cuenta con las siguientes características:

##### ***3.1.1. Año base:***

Con base en la disponibilidad de información existente en las instituciones de gobierno y la generación del Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio para el GAM (IEM), se tomó como año de referencia el 2007.<sup>49</sup>

##### ***3.1.2. Ubicación del área y tiempo de estudio.***

El presente trabajo se enmarca en Costa Rica, definiéndose la escala temporal y espacial, con las siguientes condiciones:

- ❖ Como área de estudio se eligió el Gran Área Metropolitana (GAM) como región principal y con características de rápido crecimiento dentro del país, en términos económicos, sociales y ambientales. El GAM cuenta con 31 cantones (detalles en Capítulo 4.1).
- ❖ Por existencia y estimaciones de otros estudios, se elige evaluar las emisiones del 2007, porque a partir de dicho año se dispone de mayor cantidad de información, para iniciar con el inventario del GAM.<sup>17</sup>
- ❖ La expresión de los valores obtenidos será como emisiones anuales totales.

A partir de este año base es posible hacer distintas evaluaciones y apreciaciones, que permitirán elaborar conclusiones preliminares y pertinentes con respecto a los objetivos de un inventario de emisiones de contaminante tóxicos.<sup>37</sup>

### **3.1.3. Tipo de contaminantes a ser considerados:**

Como base para definir una lista, se utilizarán los compuestos que están definidos como tóxicos en las listas de la EPA, en el listado de HAP, en la lista de la RETC, el listado de contaminantes urbanos peligrosos, y el listado de tóxicos persistentes bioacumulativos (PBT).<sup>4-9, 13-15, 16-19, 20-25, 35-38, 40, 45, 46,47</sup> El listado utilizado se basa en la lista de tóxicos del aire de la EPA detallada en el Anexo 1, junto con los indicados en los otros listados.

### **3.2. Fase II: Metodologías de estimación de emisiones**

Los métodos de estimación de emisiones se basan en las investigaciones realizadas principalmente en México a partir de 1991, seleccionado como país representativo en América Latina. En este país se plantearon inventarios de contaminantes en áreas concretas, como en la *Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)*. Estos inventarios fueron impulsados y apoyados por organismos internacionales, como el PNUMA, la RETC, o la CCAD, inicialmente incluyendo solo contaminantes específicos (metales, VOC o COP), para luego ampliarlos de manera que se incluyeran Contaminantes Criterio y Contaminantes Tóxicos del Aire.<sup>3-14, 16, 26, 46,48</sup>

Para la elaboración de los inventarios se procedió a dividir las emisiones en función del tipo de fuente: fuentes fijas o puntuales, fuentes de área, fuentes móviles y fuentes naturales. Cada una de ellas presenta subdivisiones características que se detallan en el Anexo 6.

La base del cálculo es la aplicación de factores definidos por distintos organismos (EPA, SPECIATE, GloBEIS, CEIDARS, etc.), teniendo cuidado de que los mismos sean lo más representativo de las posibles emisiones en el área de estudio.<sup>6-12, 25, 30, 46</sup> Estos factores definen un nivel de emisión del tóxico en términos de la fracción de algún parámetro, asociado generalmente a consumo (energía, materia primas), producción (toneladas producidas) o emisiones generales de contaminantes criterio (COT y PM10) para el área de estudio en el año base. Pudiéndose expresar en forma general de la siguiente manera:

$$\mathbf{Base} \text{ (t, TJ, t de COT) } * \mathbf{Factor} \text{ (g/t, g/TJ, \%COT) } * \mathbf{U} = \mathbf{Emisión} \text{ (kg)}$$

Donde el factor U se refiere a la conversión de unidades.

En el caso particular de fuentes móviles, los factores están asociados básicamente a las características del combustible, el clima, la flota vehicular y la circulación por las vías de tránsito en el área de estudio. Debido a esto se debe utilizar una herramienta informática específica que modela dicha situación y estima factores para cada tóxico considerado.

En este caso se utilizó una versión del MOBILE 6 de EPA, aplicando las consideraciones sobre los tóxicos principales pre definidos en dicha versión. Los factores obtenidos se expresan en términos de gramos por kilómetro recorrido, por lo que la base de estimación es la cantidad de kilómetros recorridos por año por tipo de vehículo. Los factores son obtenidos según sean de emisión por evaporación o de emisión por el escape. (Anexo 6) <sup>6-12, 25, 41</sup>

### ***3.3. Fase III: Fuentes de Información***

La principal fuente de información que se requiere es la existencia de un inventario de contaminantes criterio en el área y año de estudio. <sup>6-12, 49</sup> Este inventario permite tener los valores base de COT y PM10 a ser aplicados con gran cantidad de factores; para las otras fuentes la información de producción y consumo, la misma surge principalmente de información pública, asociada a los controles ambientales, de regulación o de estadísticas socioeconómicas. <sup>37-43, 49-95</sup> En segundo término de información privada de empresas, asociaciones, ONG u otro tipo de instituciones. Las características de la información dependen de los requerimientos del factor al que van a ser aplicadas.

En el caso específico de este trabajo se solicitó información en forma directa, a través de notas formales a instituciones públicas y privadas, con el apoyo de los actores gubernamentales para quienes el inventario es de interés (DIGECA y MinSa).

### ***3.4. Fase IV: Estimación de emisiones***

Los cálculos se realizan conforme a la técnica o metodología de estimación de emisiones seleccionada de la bibliografía para cada tipo de fuente. Los mismos se hicieron de manera electrónica, previo diseño de las hojas de cálculo en Excel. Los cálculos de cada categoría de emisión evaluada son ordenados por tipo de fuente y por tóxico, a fin de tener valoraciones globales de las emisiones.

Después de que las emisiones han sido calculadas, se utilizan los datos para determinar cuáles son los principales compuestos tóxicos encontrados, las características de la distribución por fuente, así como la posibilidad mejoras o contralor de las emisiones.

Estos sistemas de cálculo se desarrollan en el Anexo 6, para cada tipo de fuente.

### ***3.5. Fase V: Evaluación de la congruencia, incertidumbre y aseguramiento de la calidad de los datos***

Después de que se realizaron los cálculos de estimación de emisiones, se analizará la congruencia e incertidumbre de los resultados.

El análisis desarrollado es de índole cualitativa, calificando las características de la información y de los factores utilizados para cada estimación de emisiones, a fin de obtener una calificación ponderada del nivel de error de la emisión calculada. Esta evaluación siguió los criterios de la EPA para las estimaciones nacionales de dioxinas y furanos.<sup>25, 52</sup>

En el Anexo 6 se desarrollan los sistemas de cálculo de incertidumbre mencionados.

Como forma de estimar la congruencia de los valores obtenidos, se correlacionaron los niveles de las emisiones calculadas para cada tóxico con las cantidades importadas de los mismos, ya que la mayoría son productos sintéticos comprados en el exterior. Este nivel de importación surgió de un trabajo elaborado por el Laboratorio de Aduanas en el cual se relacionaron los aranceles con los compuestos tóxicos considerados.

También son importantes las comparaciones con las expectativas y la experiencia previa en inventarios similares desarrollados anteriormente para compuestos específicos o para otras regiones geográficas, como el ZMVM. En términos generales, se consideran las características de la información y los cálculos realizados en virtud de la importancia relativa de cada uno con respecto a la emisión total de cada contaminante.<sup>6-12</sup>

### ***3.6. Fase VI: Almacenamiento electrónico de los datos y documentación del proceso***

Uno de los pasos finales del desarrollo de un inventario de emisiones es el archivado de los datos y la información relacionada.

Dicho archivo de almacenamiento se realiza con base en hojas de cálculo Excel y documentos de texto Word. El mismo deberá conservarse ya que constituye la base para el desarrollo de inventarios en el futuro.

Además de los resultados reales del inventario, la documentación también deberá incluir las metodologías, datos y supuestos que fueron utilizados durante el proceso de desarrollo. En general, debe proporcionarse información suficiente para permitir que otras partes interesadas reproduzcan y analicen los resultados.

### ***3.7. Fase VII: Difusión de los resultados del inventario de emisiones.***

Se plantea que además de la difusión de los resultados de inventario con esta tesis, la misma pueda ser publicada en la página web de alguno de los Ministerios involucrados directamente (DIGECA y MinSa).

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION.**

### **4 .PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

#### ***4.1. Introducción***

Las estimaciones realizadas en este inventario son a escala global dentro del área considerada, tomando como referencia el *Primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire para el GAM en el 2007* (IEM).<sup>49</sup>

La presentación de los detalles técnicos y resultados se basa en los formatos de inventarios desarrollados para ZMVM, en sus inventarios de contaminantes criterio y compuestos tóxicos iniciales (Inventario de contaminantes Criterio y Tóxicos ZMVM 2002-2006).<sup>6-12, 46</sup>

Los objetivos y usos básicos planteados para este inventario dependerán de los entes estatales involucrados, en particular DIGECA y MinSa, quienes apoyaron especialmente el desarrollo del mismo.<sup>12, 37, 40, 41, 44</sup>

#### ***4.2. Descripción general del área de estudio***

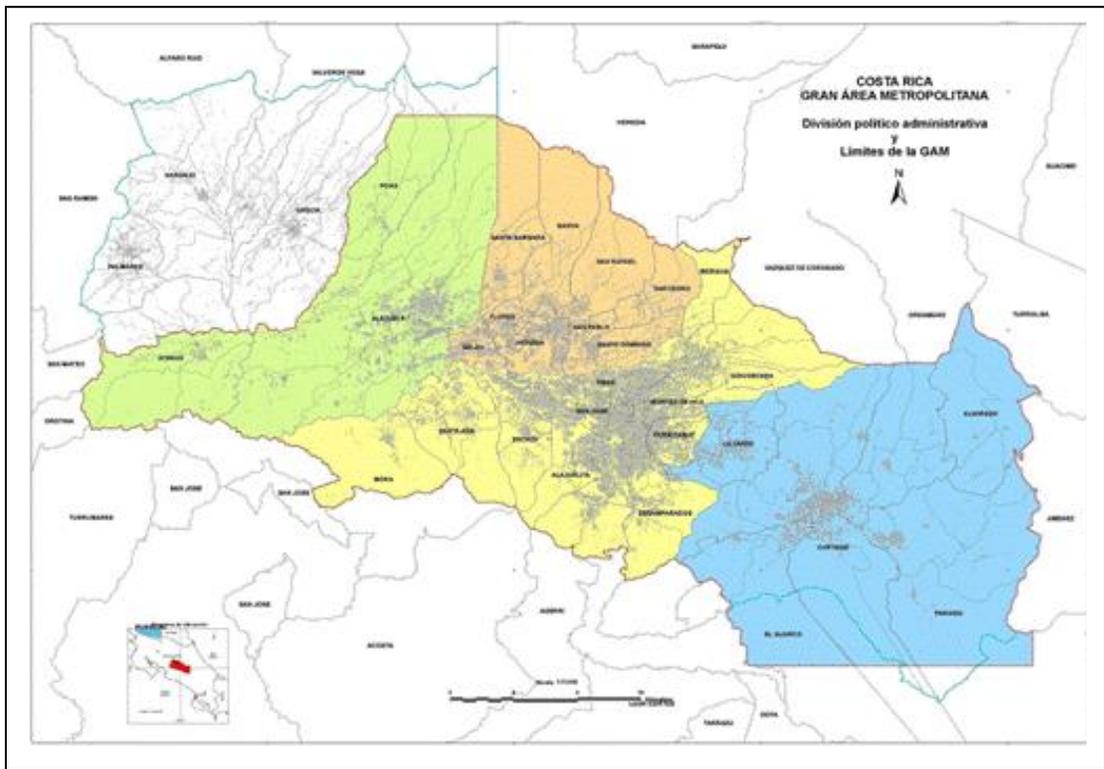
El GAM fue definido en el año 1968 (Ley de Planificación Urbana N° 4240) como una respuesta a un crecimiento urbano descontrolado en el Valle Central de Costa Rica.<sup>18, 37, 49, 53-55</sup> Constituye la principal área urbana de Costa Rica e incluye las principales zonas residenciales/industriales/comerciales de las ciudades de Alajuela, San José, Cartago y Heredia. En el GAM se concentra el 60% de la población del país, en un área de inferior al 4% del territorio nacional, donde se desarrolla más del 70% de las actividades industriales y comerciales, concentrando también otras infraestructuras como sedes gubernamentales y de servicios.<sup>39</sup> A continuación se detallan las principales características del GAM.

#### ***4.3. Descripción biofísica***

##### ***4.3.1. Aspectos físicos***

El Gran Área Metropolitana comprende gran parte del Valle Central de Costa Rica, tiene una extensión aproximada de 1967 km<sup>2</sup>, con altitudes que oscilan entre 1000 y 1500 metros

sobre el nivel del mar (msnm) con un promedio 1300 msnm, e incluye los 31 cantones principales o cabeceras de las 4 provincias centrales que se enumeran en el Cuadro 2.<sup>49, 53-56</sup>



**Figura 5.-** Detalle del GAM y su división política,<sup>39</sup> los colores indicativos de las provincias principales: San José (amarillo), Cartago (azul), Heredia (naranja) y Alajuela (verde).

**Cuadro 2.-** Listado de cantones por provincia en el GAM

Alajuela	Cartago	Heredia	San José
Alajuela	Cartago	Belén	Moravia
Atenas	La Unión	Flores	Goicoechea
Poas	Alvarado	Heredia	Montes de Oca
	Paraíso (Parcial)	San Pablo	Tibás
	El Guarco (Parcial)	Santo Domingo	San José
	Oreamuno (Parcial)	San Isidro	Curridabat
		San Rafael	Desamparado
		Barva	Alajuelita
		Santa Bárbara	Escazú

Santa Ana
Mora
Aserrí (Parcial)
Coronado (Parcial)

En la Figura 5 se muestra la división político administrativa y los límites territoriales del GAM. En el mapa del recuadro de esta misma figura se puede apreciar de manera gráfica la relación de tamaños del área del GAM con respecto al área total del país.

La zona de estudio abarca la cuenca superior del Río Grande de Tárcoles (Valle Occidental, San José, Heredia, Alajuela) y la cuenca superior del Río Reventazón (Valle Oriental, Cartago, Paraíso, Orosí), ubicadas entre la Cordillera Volcánica Central al noreste y las estribaciones de la Cordillera de Talamanca al suroeste. En general, el GAM presenta clima tropical húmedo y vegetación de bosque tropical húmedo y de pre montaña; se encuentra situado entre 10° 10' - 9° 44' de latitud Norte y 84° 30' - 83° 47' de longitud Oeste.<sup>18, 37, 39, 49, 53-56</sup>

#### **4.3.2. Rasgos geo climáticos generales del GAM**

Los aspectos geográficos y climáticos del GAM son de importancia relevante en la dispersión y/o acumulación de contaminantes.

En realidad el GAM consta de dos valles separados por la Cordillera de Ochomogo. Ambos valles principales tienen un comportamiento general similar, aunque con distintos valores de algunos parámetros climáticos producto de la diferente influencia de los vientos Alisios desde el Caribe sobre ellos: el Valle Oriental (Cartago) está más expuesto a los efectos de los vientos alisios, mientras que el Valle Occidental (San José) se encuentra protegido y sólo tiene algunos cañones de acceso de los vientos alisios al mismo.<sup>18, 56</sup>

La ubicación del GAM favorece una alta radiación solar constante casi todo el año, principalmente dependiente del grado de nubosidad, con un promedio de unos 15 MJ/m<sup>2</sup> y un brillo solar promedio de 5 horas.<sup>53, 56, 57</sup> En el Gráfico 1, se muestra el mapa de radiación solar para Costa Rica del año 2002, como referencia. Igualmente en el Gráfico 2 se muestra el mapa del brillo solar de Costa Rica para el año 2004.

Los vientos Alisios, que soplan desde el mar Caribe en dirección suroeste, con una alta intensidad de noviembre a marzo, descargan su humedad en la Vertiente Atlántica de la Cordillera Volcánica Central, produciendo, por el contrario, una época seca en el Valle

Central y el Pacífico, debido a su alta velocidad y baja humedad. Cuando la fuerza de los vientos Alisios disminuye, entre abril y octubre, por efecto de la confluencia intertropical, ocurre la entrada de masas de aire húmedo desde el Pacífico, con dirección noreste, que descargan lluvias en la zona central. 18, 56, 58

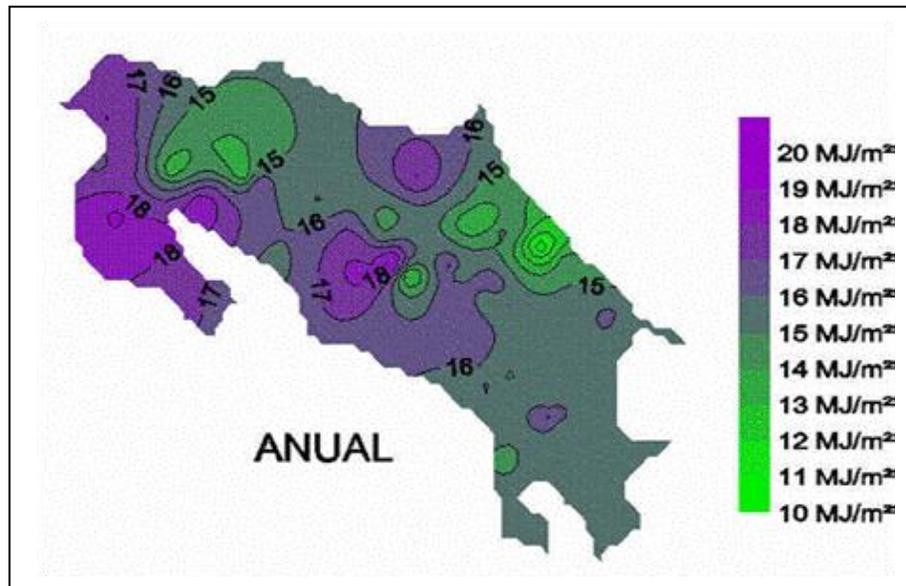
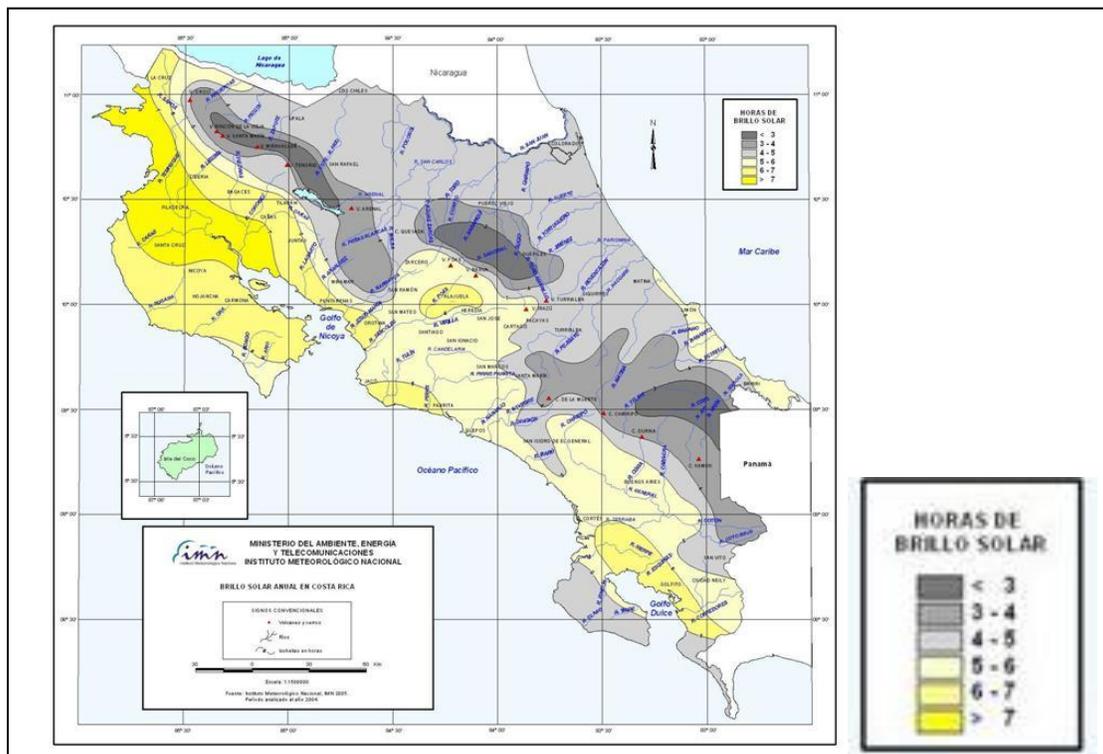
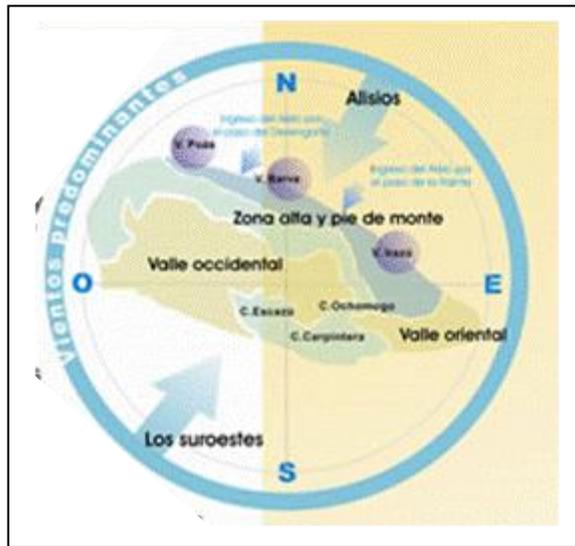


Gráfico 1.- Valores anuales de radiación para Costa Rica. 57



**Gráfico 2.-** Valores medios anuales de brillo solar en Costa Rica.<sup>53</sup>

En la Gráfico 3, se muestra la distribución principal de los vientos en el GAM. La velocidad de los vientos a nivel del suelo y en los valles es en general moderada en el verano, usualmente entre 10 y 15 km/h, mientras que es algo más elevada en invierno (mayo-octubre), producto de la influencia directa de los vientos alisios (usualmente más de 15 km/h, pudiendo llegar a unos 30 km/h).<sup>18, 56, 59</sup>



**Gráfico 3.-** Esquema de las direcciones principales de los vientos en el GAM.<sup>53</sup>

En el Gráfico 4 se muestran los valores medios anuales de precipitación para Costa Rica. En particular, el GAM tiene un promedio de 2300 mm, variando desde 1900 mm en el sector central hasta más de 3000 mm en zonas montañosas.

El Gráfico 5 presenta el comportamiento de los valores medios anuales de precipitación de los Valles Occidental y Oriental del GAM para el periodo 1961-1990. Se observan variaciones de los valores de acuerdo con el valle considerado.<sup>18, 60</sup>

En las últimas semanas de junio y las primeras de julio se produce el denominado “Veranillo de San Juan”, en las que generalmente se produce una disminución en las lluvias. Este fenómeno se produce por efecto del reforzamiento de los vientos alisios debido a la disminución de radiación en el Hemisferio Norte luego del solsticio de verano.

18, 60

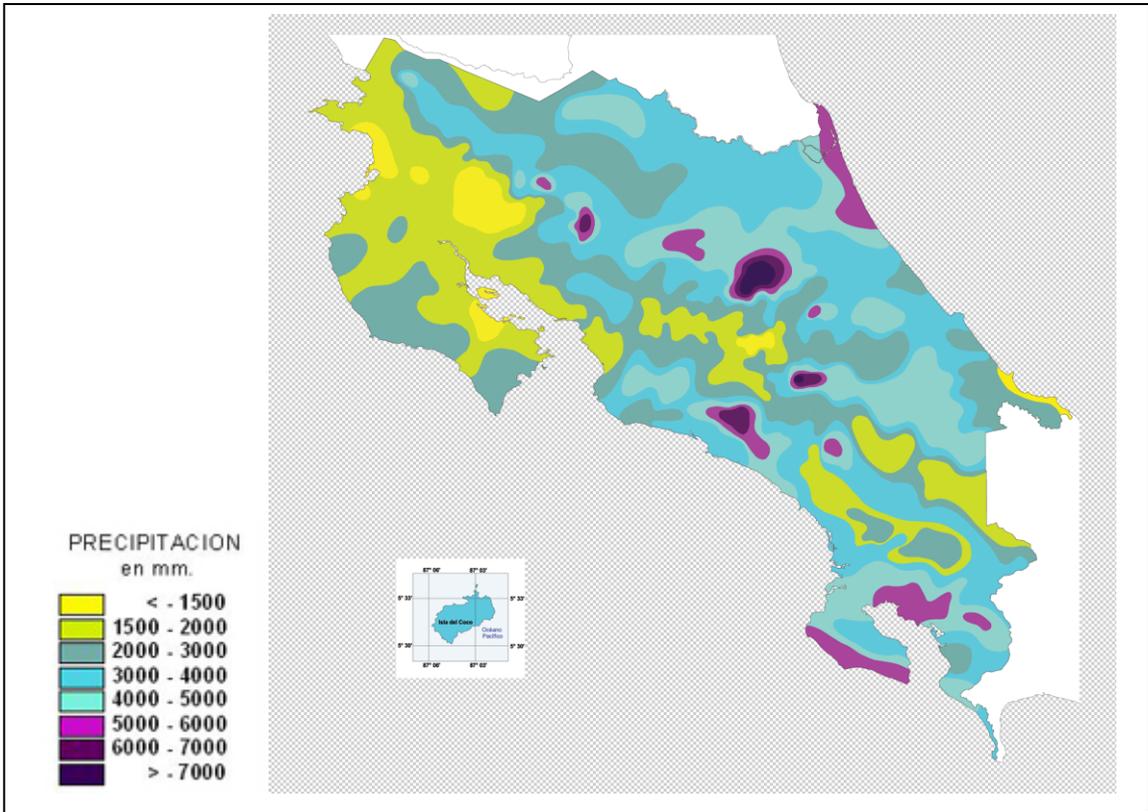
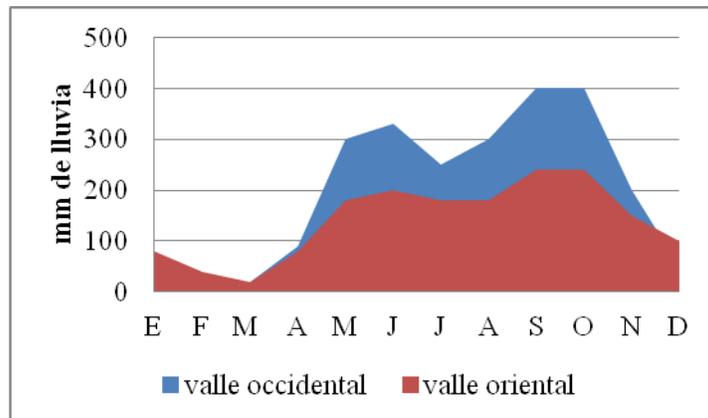


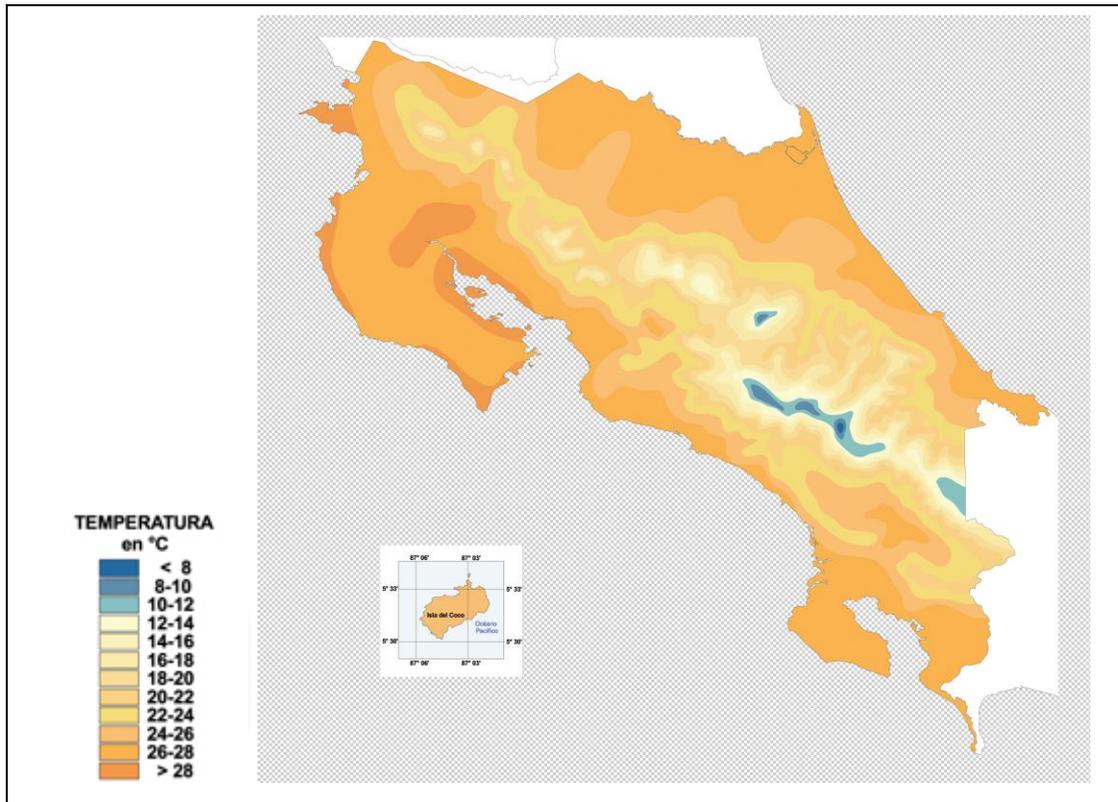
Gráfico 4.- Valores medios anuales de precipitación para Costa Rica.<sup>53</sup>



**Gráfico 5.-**Valores medios anuales de precipitación para los Valles Occidental y Oriental en el GAM en el periodo 1961-1990.<sup>53</sup>

El Gráfico 6 presenta los promedios de temperatura para Costa Rica. La temperatura en el país depende principalmente de la altitud;<sup>39</sup>

En las zonas más bajas del GAM las temperaturas se mantienen entre los 20 y 25 °C, sin presentar grandes cambios a lo largo del año. Generalmente presentan un ciclo donde el mínimo se despliega en el amanecer (alrededor de los 18 °C) y aumenta hasta medio día, cuando se alcanza el máximo, para luego ir disminuyendo hasta unos 20 °C al atardecer, manteniéndose relativamente constante durante la noche. Este comportamiento se muestra en los Gráficos 6 y 7.

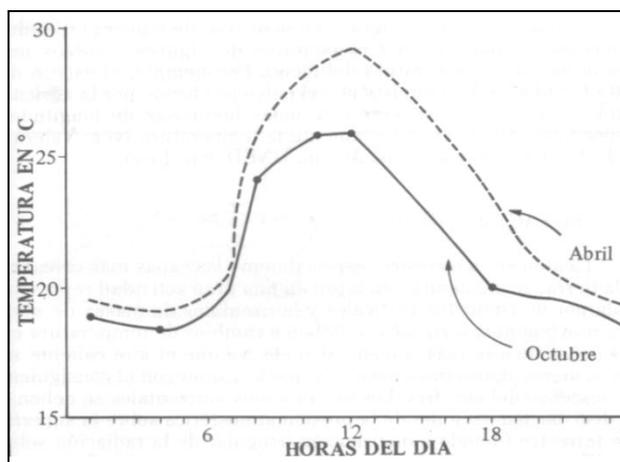


**Gráfico 6.-**Valores medios anuales de temperatura para Costa Rica.<sup>53</sup>

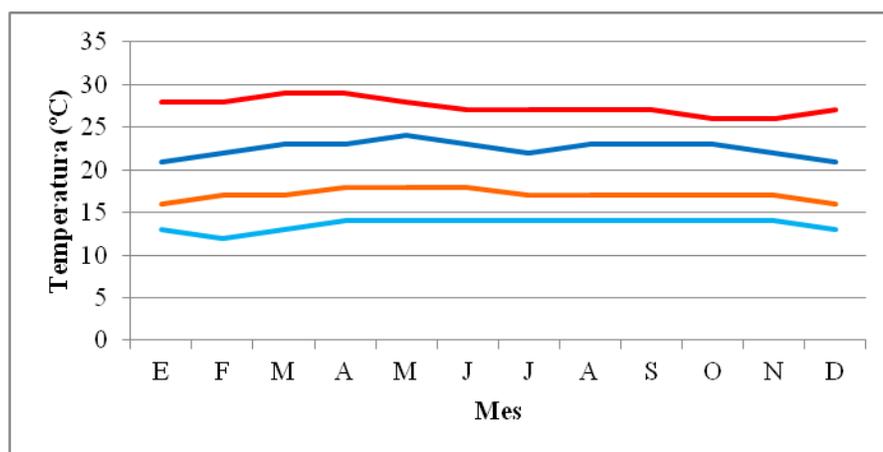
Este efecto varía según la época, pudiendo presentar valores algo más altos en la época seca y más bajos en la húmeda. Los máximos en general no exceden de los 29 °C.<sup>18, 56</sup>

En general, el Valle Occidental presenta temperaturas mayores, tanto para máximas como mínimas, que el Valle Oriental, teniendo amplitudes similares de unos 11 °C. Esto se muestra con detalle en la Gráfico 8.<sup>18</sup>

En el sector montañoso la temperatura máxima apenas alcanza los 23 °C en los meses de marzo y abril, y durante enero y febrero pueden bajar por debajo de los 10 °C.<sup>60</sup>



**Gráfico 7.-**Variación media de la temperatura en el GAM en función de las horas del día y las épocas del año, abril estación seca y octubre estación húmeda.<sup>53, 60, 61</sup>



**Gráfico 8.-**Variación de las temperaturas máximas y mínimas en el Valle Occidental (rojo y naranja) y Valle Oriental (azul y celeste) del GAM.<sup>53</sup>

La humedad relativa promedio anual en el GAM es cercana al 75%, con una oscilación del 10% a lo largo del año, con valores menores en la época seca y mayores en la lluviosa. En las partes montañosas el promedio es del 87% con un comportamiento similar.<sup>61, 62</sup>

La inversión térmica en el Valle Central es de corta duración debido a los factores climáticos propios de alta incidencia de radiación solar y el régimen de vientos, lo que los hace poco significativos.<sup>63</sup>

#### **4.3.2. 1. Situación geo climática en el 2007**

Específicamente para el 2007, se presentó la situación del fenómeno del Niño, asociada al aumento de temperaturas en las aguas del Océano Pacífico. Este fenómeno se inicia hacia setiembre del 2006, llegando a su máxima intensidad alrededor de enero del 2007, abarcando casi todo el primer trimestre del 2007. Posteriormente ocurrió un cambio brusco hacia condiciones fuertes del fenómeno de la Niña desde abril en adelante.<sup>50</sup>

Lo anterior provocó que en el año 2007 la temporada seca en el GAM fuera menos seca, con un aumento de las lluvias en ese periodo del 18%, y una posterior época húmeda con mayor nivel de precipitaciones en un 30%.

Por su parte, la variación de temperaturas se mantuvo dentro de los rangos climáticos usuales.

### **4.4. Aspectos socio económicos**

#### **4.4.1. Población**

La población estimada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) para Costa Rica en el año 2007, era de unos 4.390.000 habitantes (hab), de los cuales se estimaba en el área del GAM por lo menos unos 2.210.000 habitantes fijos, representando más del 50% de la población del país, con una densidad de población cercana a los 1.000 habitantes por kilómetro cuadrado.<sup>39, 65, 66</sup>

El crecimiento poblacional del país ha sido alrededor del 2% anual, según el censo de población del 2000 del INEC, teniendo un componente principal de migración interna hacia el GAM, que crece con factores mayores.<sup>62, 63</sup> En los mapas de los Gráficos 10 y 11, se ilustra lo anterior.

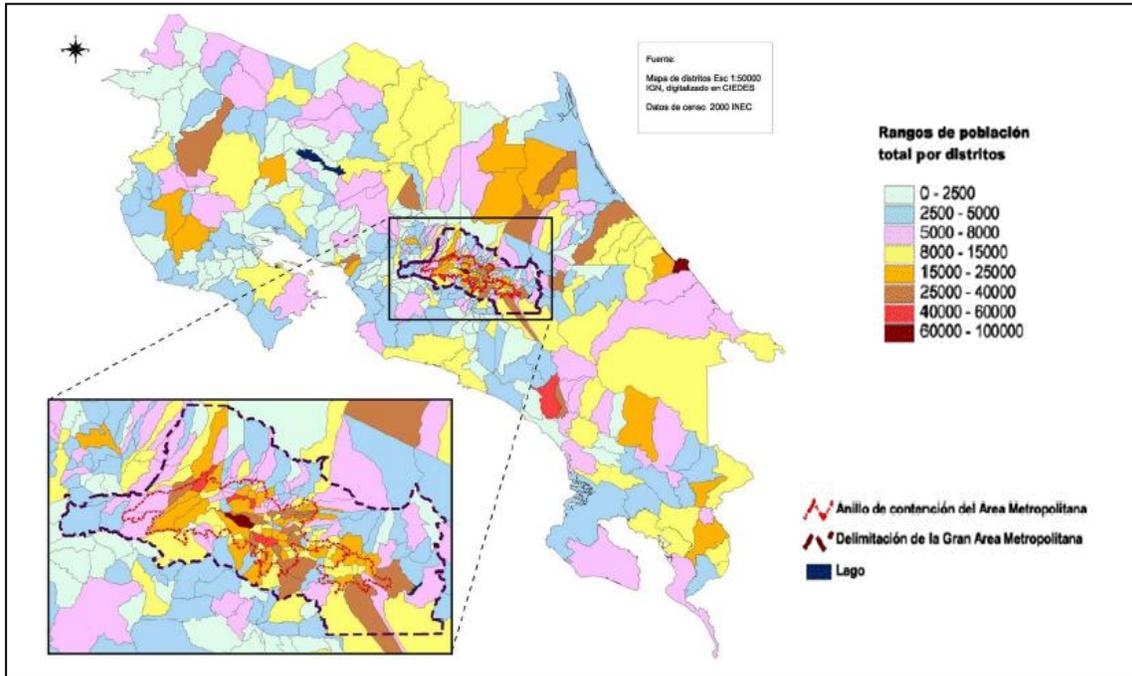
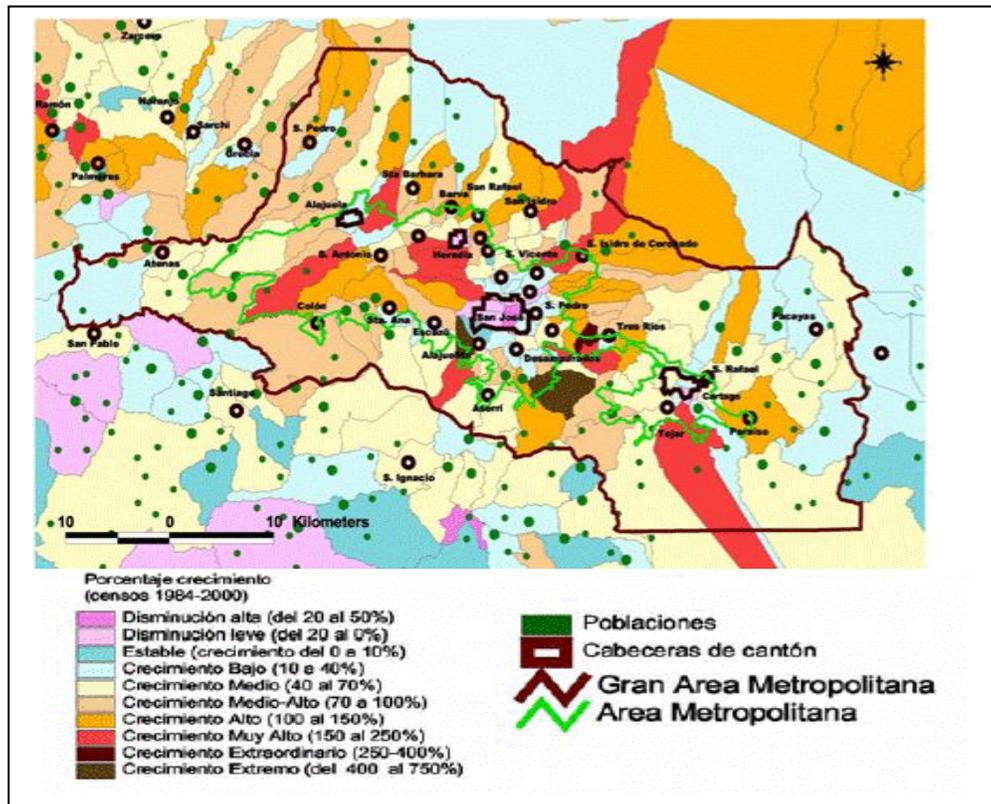


Gráfico 9.-Población en el GAM por cantones.<sup>39,65</sup>



## Gráfico 10.-Crecimiento poblacional por distrito en el GAM (Censos 1984 y 2000).<sup>65</sup>

### **4.4.2. Vivienda**

A partir del censo del año 2000, es posible estimar, según las expectativas de crecimiento anual del 2,3%, que en el GAM existan unas 700.000 viviendas para el año 2007, con un déficit habitacional estimado en el 2%.<sup>66, 67</sup>

La tendencia de crecimiento es preferencial para la periferia de San José, en cantones tales como Tibás, San Pedro, Curridabat, Moravia Desamparados, Escazú, Pavas, Zapote, Alajuelita, Uruca, y de igual forma en las cabeceras provinciales de Alajuela, Heredia y Cartago.<sup>39, 65</sup> El acceso a los bonos de vivienda se centraron principalmente en la población de recursos medios (45%).<sup>66</sup>

En general, las viviendas tienen condiciones superiores a las de otras regiones del país, tanto en calidad de materiales como en servicios disponibles y espacio por ocupante. A pesar de lo anterior, en la zona del GAM existe alrededor de un 15% de la población en situación de asentamiento marginal o definidos como hogares pobres.<sup>39, 65, 66</sup>

### **4.4.3. Industria**

La estructura industrial del GAM mantiene su predominancia económica principalmente con base en sus condiciones logísticas, su disponibilidad de mano de obra y materiales, así como en un crecimiento poblacional y de consumo. En esta zona del país se ubican unas 44.000 empresas, lo que representa cerca del 85% del total de las industrias del país.<sup>39, 65-68</sup>

Se ha producido una distribución de las industrias en función de la ubicación de parques industriales y zonas francas, así como de áreas con accesibilidad a rutas principales o instalaciones comerciales (aeropuerto especialmente). La inversión extranjera se basa en la creación de empresas de alta tecnología, servicios exteriores, farmacéuticas, turismo y manufacturas específicas o encadenamientos productivos.<sup>66</sup>

La estructura de empleos muestra una clara afectación de la actividad industrial, con el 20% de los empleos directos asociados a la misma, siendo el principal generador de trabajo la actividad terciaria, con más del 70%.<sup>39, 65, 66</sup>

Más de 95% de las empresas registradas son Pequeñas y Medianas Empresas (PYME), en su mayoría asociadas a comercio o servicios.<sup>67, 68</sup>

Las tasas de desempleo para el 2007 fueron del orden de 4,5%, con una tasa de población ocupada en el GAM del orden del 60%, pero de ellos solo el 30% son mujeres. Los empleos generados se caracterizaron por ser mayormente formales y calificados.<sup>66</sup>

#### **4.4.4. Transporte**

El crecimiento de la población en el GAM, así como el aumento de la flota vehicular particular en Costa Rica desde los años 90, ha tenido un ritmo cercano al 10% anual, sin crecimiento sustancial de las vías públicas. Esto ha contribuido a la dificultad en el transporte y el aumento de los tiempos de desplazamiento.<sup>39, 69</sup> Tal y como se aprecia en el Gráfico 11, desde 1970 se ha dado un crecimiento vehicular que es consecuente con el crecimiento de la población; sin embargo, la relación de vehículos por habitantes ha crecido con el tiempo. Por ejemplo, en 1982 había aproximadamente un vehículo por cada 12 o 13 habitantes, mientras que en el 2007 ya existía una relación de un vehículo por cada 4 habitantes.<sup>39, 69</sup>

A pesar de esto, la mayoría de la población (más del 60%) utiliza transporte público por autobús, pero el sistema de transporte público no tiene integración, lo que redundará en una utilización ineficiente de costos y tiempo.

La flota de buses es heterogénea, en algunos casos anticuados y/o inadecuados, contaminantes, sin la seguridad necesaria, dando como resultado una baja calidad del servicio. Esto también favorece la utilización de otros medios de transporte secundarios como taxis o porteadores, así como microbuses o transportes livianos.<sup>39, 69</sup>

Con respecto a la distribución de la flota vehicular por tipo de vehículo, en el Cuadro 3 se muestra la estructura de parque de vehículos de los años 1996 al 2002. Durante el período abarcado no se aprecian cambios significativos en los porcentajes, de acuerdo con el tipo de vehículo; en segundo lugar se aprecia que el transporte público representa aproximadamente un 5%, mientras que el de carga constituye alrededor del 24% del parque automotor.<sup>69</sup>

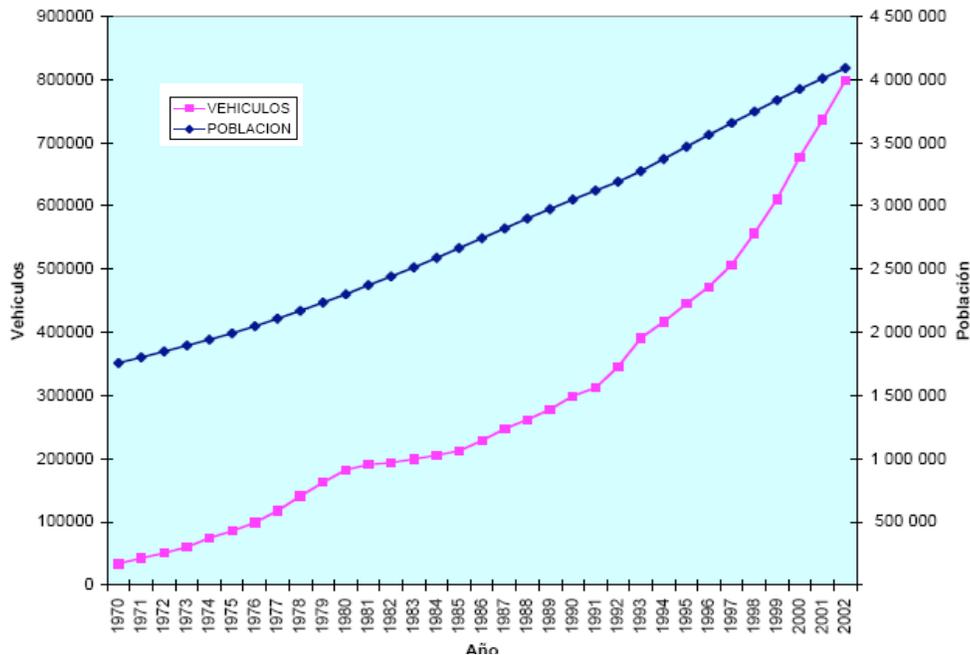


Gráfico 11.-Crecimiento de la población y del parque vehicular en Costa Rica por año.<sup>69</sup>

Las tendencias en la constitución del parque automotor se mantienen durante el periodo reportado, y para el 2007 se tiene una distribución de vehículos similar, como se muestra en el Cuadro 4, que reporta también el tipo de vehículo en función del combustible que utiliza. El transporte de carga representa un porcentaje importante del conjunto de vehículos diesel, aproximadamente un 20% del total de vehículos.

La distribución de edad de los vehículos por tipo se expresa en el Gráfico 12a, donde se observa un incremento de vehículos particulares ensamblados durante los años 1986 y 1998, con edades promedio de unos 13 años. A partir del 2004 hay un incremento sustancial de las motocicletas, en tanto los otros vehículos tienen tendencias más estables.

La edad media de los vehículos se muestra en el Gráfico 12b; el promedio es de unos 12 años, teniendo los taxis, los buses y las motocicletas valores menores, mientras para el resto de los vehículos la edad media oscila entre 13 y 19 años.

En cuanto al tren, el mismo está bajo la administración del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER); fue suspendido el servicio en el año 1995 debido a su situación deficitaria. Retomó actividades en el GAM en el año 2000, sirviendo rutas de transporte de

pasajeros, con un restablecimiento lento. En el 2007 llegaba a San Pedro de Montes de Oca y Pavas desde San José, con frecuencias cada media hora, durante las horas pico (6 a 9 a.m. y 4 a 8 p.m.). Las locomotoras utilizadas funcionan con diesel y relativamente antiguas, siendo poco significativo su aporte al transporte de pasajeros.<sup>70</sup>

**Cuadro 3.-** Distribución del parque automotor por tipo de vehículo para el período 1996-2002.<sup>69</sup>

<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>
Automóvil	38,3%	39,0%	40,0%	40,9%	42,4%	42,2%	43,9%
Vehículo Rural	10,3%	10,1%	10,0%	10,8%	11,3%	10,5%	10,2%
Microbús familiar	3,4%	3,4%	3,3%	3,2%	3,0%	2,7%	2,6%
Carga Liviana	22,1%	21,6%	21,2%	20,4%	19,3%	19,8%	19,1%
Carga Pesada	3,9%	3,7%	3,7%	3,6%	3,4%	3,4%	3,3%
Motos	15,6%	15,9%	15,8%	15,5%	15,2%	14,3%	14,0%
Autobús	1,2%	1,2%	1,2%	1,1%	1,0%	1,0%	1,0%
Taxis	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%	0,3%	1,2%	1,1%
Microbús de Transporte	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%	0,7%	0,7%
Equipo Especial	4,2%	4,1%	3,9%	3,6%	3,4%	3,3%	3,2%
Otros	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,8%	0,9%
<b>N° de Vehículos</b>	<b>471.960</b>	<b>507.247</b>	<b>556.836</b>	<b>610.907</b>	<b>677.883</b>	<b>736.192</b>	<b>798.710</b>
<b>Tasa de crec. Anual</b>		<b>7,5%</b>	<b>9,8%</b>	<b>9,7%</b>	<b>11,0%</b>	<b>8,6%</b>	<b>8,5%</b>

**Cuadro 4.-** Parque automotor por tipo de combustible en el 2007.<sup>66</sup>

<b>Tipos de vehículo</b>	<b>Cantidad</b>		<b>% por combustible</b>		<b>% por vehículo</b>		<b>Total</b>	<b>%</b>
	<i>Gasolina</i>	<i>Diesel</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Diesel</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Diesel</i>		
<b>Particular</b>	444.524	889	84,08%	0,71%	99,80%	0,20%	<b>445.413</b>	82,80%
<b>Carga liviana</b>	12.036	89.106	2,28%	71,56%	11,90%	88,10%	<b>101.141</b>	18,80%
<b>Carga pesada</b>		23.724		19,05%	0,00%	100,00%	<b>23.724</b>	4,41%
<b>Trasporte público</b>	116	10.101	0,02%	8,11%	1,13%	98,87%	<b>10.217</b>	1,90%
<b>Motos</b>	64.154		12,13%	0,00%	100,00%	0,00%	<b>64.154</b>	11,93%
<b>Taxis</b>	7.853	697	1,49%	0,56%	91,85%	8,15%	<b>8.550</b>	1,59%
<b>TOTAL</b>	<b>435.386</b>	<b>102.544</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>			<b>537.929</b>	

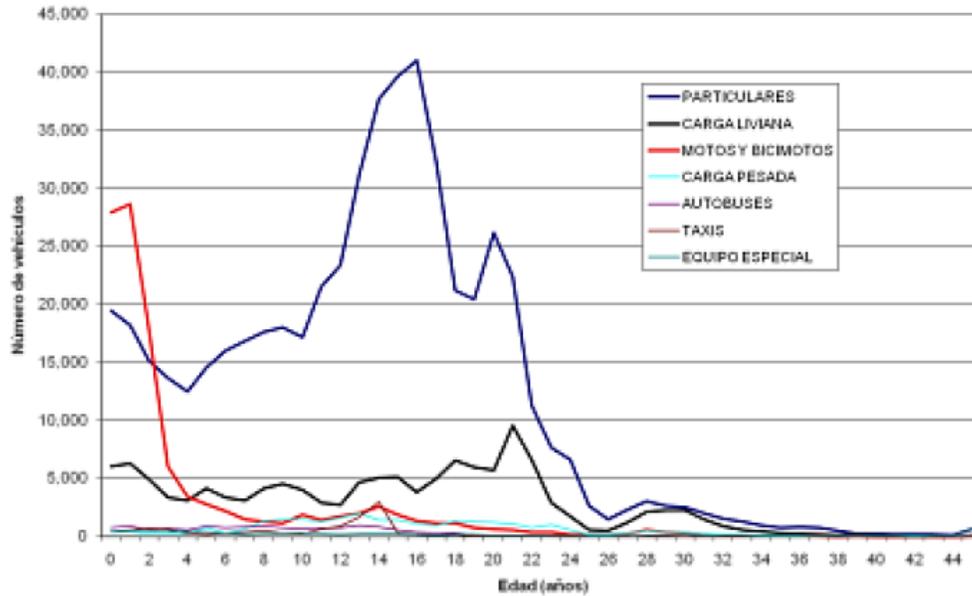


Gráfico 12.a.- Distribución de edad del parque automotor para inicios del 2008.<sup>69, 75, 76, 85</sup>

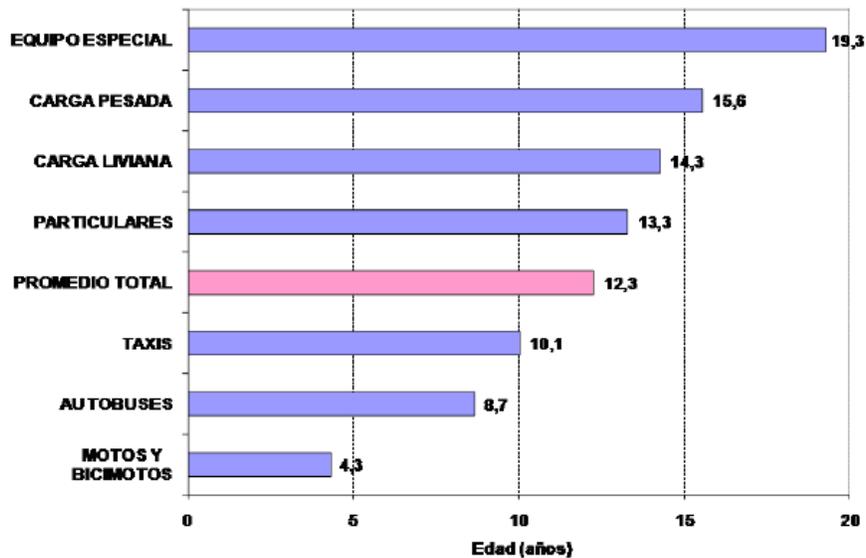


Gráfico 12.b.- Edad promedio de los distintos tipos de vehículos a inicios del 2008.<sup>69, 75, 76, 85</sup>

#### 4.4.5. Servicios

Los servicios como actividad comercial relacionada con la vida urbana y sus necesidades, presentan un crecimiento en el área del GAM asociado al incremento de población, y como tal ubicándose en las zonas de tránsito preferentemente. También se presentan desarrollos de servicios a nivel internacional a través de centros de atención al cliente (“call centers”),

software, procesamiento de datos, servicios turísticos, logística y servicios económicos.<sup>67,</sup>  
68, 71

El crecimiento promedio del sector servicios ronda el 6% anual, siendo el 70% del tipo micro empresas y un 25% del tipo pequeñas empresas; el valor económico con respecto al volumen de ventas es del orden del 25%, con un aporte de empleos del 15% y con un número de empresas estimado en 8300 (más de 80% en el GAM).<sup>65, 71-74</sup>

Los servicios públicos están afianzados en el GAM desde hace bastante tiempo, brindando cobertura de agua y energía eléctrica a más del 95% de la población y presentando un déficit importante en saneamiento y tratamiento de residuos en algunas áreas.<sup>39, 65, 66</sup>

#### **4.4.6. Vegetación y actividad agropecuaria**

La vegetación característica de bosque tropical lluvioso de los valles centrales de Costa Rica, ha sido degradada con el tiempo en favor de la utilización de sus maderas y la actividad agropecuaria, mayormente para cultivos comerciales, en especial café.

La falta de manejo adecuado de la tierra, así como una mala planificación de cultivos o aplicación de procesos, unido a una intensa deforestación y urbanización descontrolada, ha propiciado un deterioro de la tierra agrícola en el GAM, el cual puede ser visualizado en la Gráfico 13.<sup>65</sup>

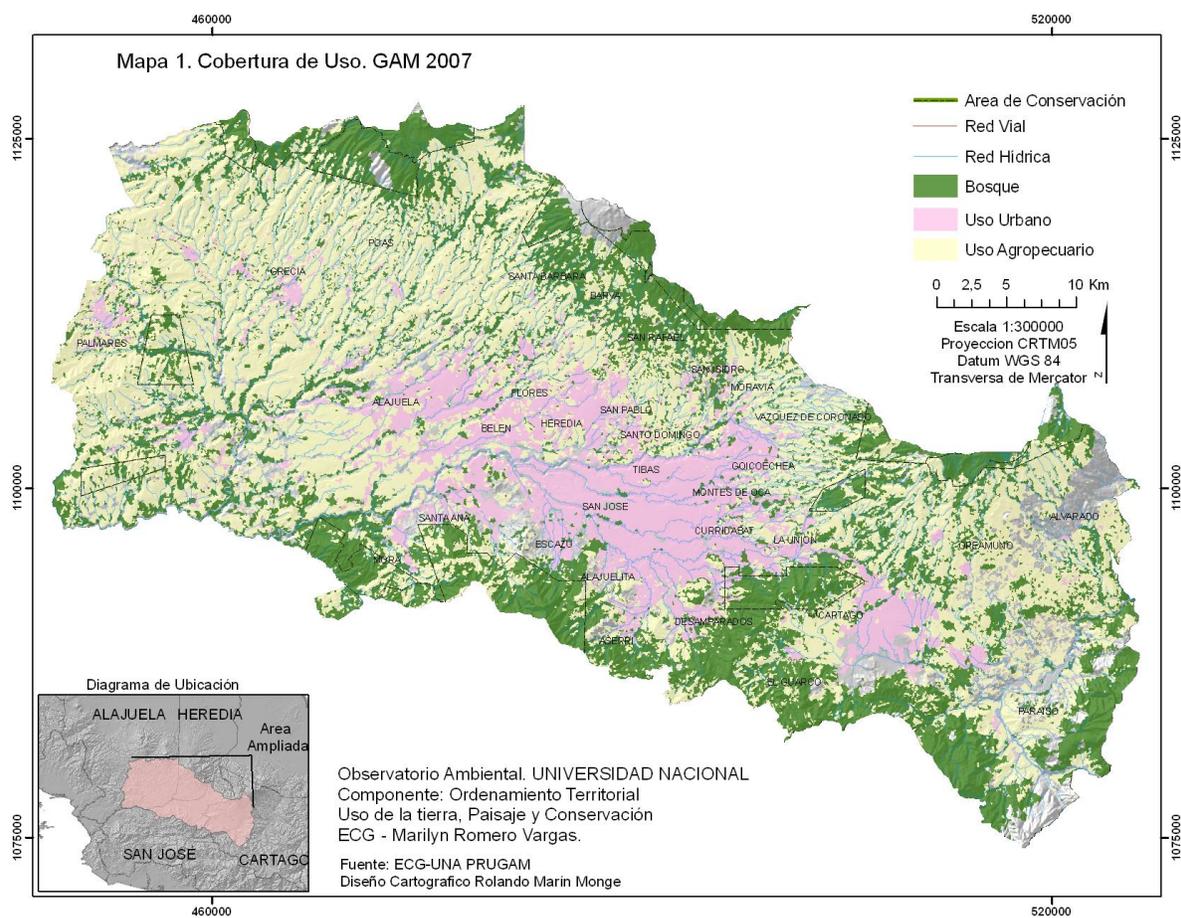
Se pueden clasificar los tipos de vegetación existentes en el GAM en función de su utilización en: zona urbana, pastizales o charrales, área agrícola o cafetalera, bosques, áreas protegidas.

El área boscosa está asociada mayormente al área protegida en el entorno de las montañas, los parques nacionales y/o volcanes circundantes. El resto representa mayormente área urbana con parches de actividad agrícola o tierras sin uso (charrales).

La actividad agrícola está ligada a la producción para el consumo local, aunque también se realiza el cultivo de café tradicional. En áreas de montaña o más aisladas se desarrollan actividades ganaderas así como la cría de animales, pollos y cerdos principalmente. Se estima que menos del 50% del área del GAM es utilizada en alguna actividad productiva agropecuaria y más de un 30% corresponde a bosques o áreas que no tiene usos fijos definidos, compitiendo las mismas con las zonas destinadas a la urbanización, las áreas de protección de fuentes de agua o biodiversidad, el turismo y la reforestación.<sup>66</sup>

La actividad agropecuaria presenta una productividad aproximadamente constante, manteniendo un nivel de mano de obra sin aumentos sustanciales en los últimos años.<sup>39, 65,</sup>

66



**Gráfico 13.-**Mapa de cobertura forestal, agropecuaria y área urbana.<sup>39</sup>

#### 4.4.7. Consumo energético

En términos generales, Costa Rica presenta un crecimiento del 3% al año en el consumo de energía, viéndose una disminución promedio del 2,5% del consumo energético por unidad de PBI.<sup>75, 76</sup>

El consumo medio de energía para el 2007 es de unos 5 BEP (Barriles Equivalentes de Petróleo) por habitante o unos 19 TJ cada 1000 habitantes. Se sigue manteniendo una dependencia de los combustibles fósiles, que representan más del 60% de la energía

utilizada, como se puede apreciar en el Gráfico 14. Se tiene una tasa de crecimiento de aproximadamente 5% anual en el consumo de combustibles derivados del petróleo.<sup>75, 76</sup>

Los Gráficos 15 al 20 muestran que el consumo principal de energía está asociado al sector transporte, que abarca casi el 50% del consumo energético nacional y casi el 80% de los combustibles derivados del petróleo, siendo la gasolina y luego el diesel los más utilizados.

<sup>65, 76</sup> Las residencias tienden a usar gas licuado de petróleo (GLP) como combustible principal, en tanto la industria utiliza principalmente bunker.

El consumo de energía eléctrica también presenta un crecimiento del orden del 5% anual, con valores energéticos netos de un 3% por cada 1000 habitantes.<sup>75, 76</sup>

La base de generación es hidroeléctrica, o de energías renovables, en más de un 80% con menos de un 8% como energía térmica.

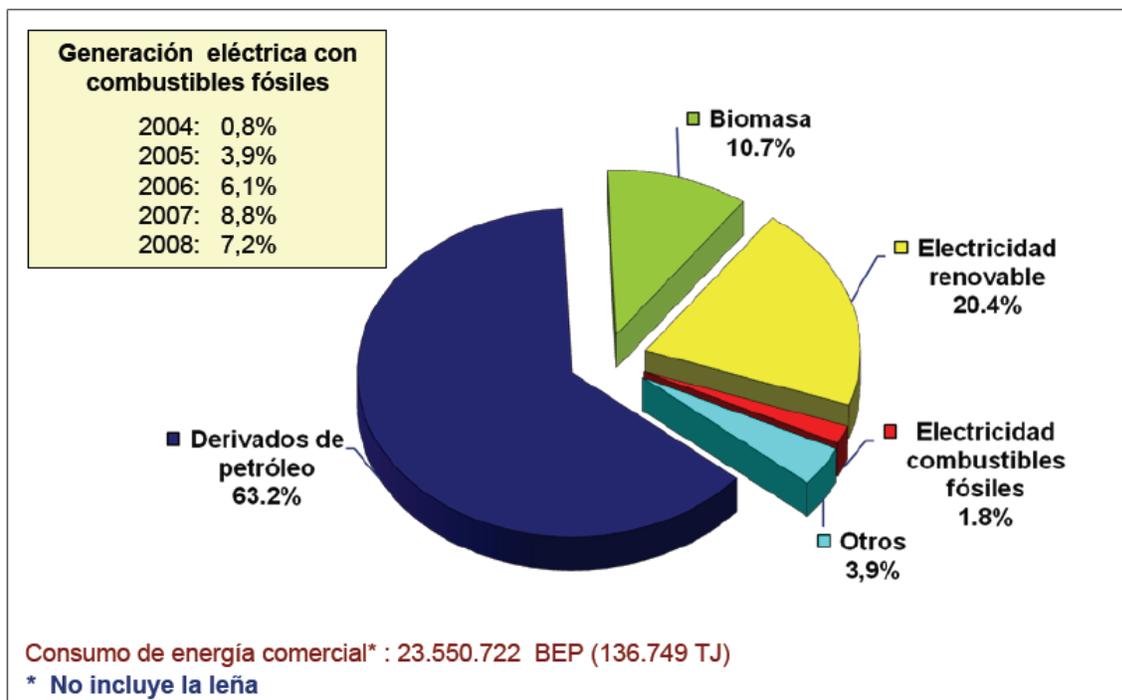
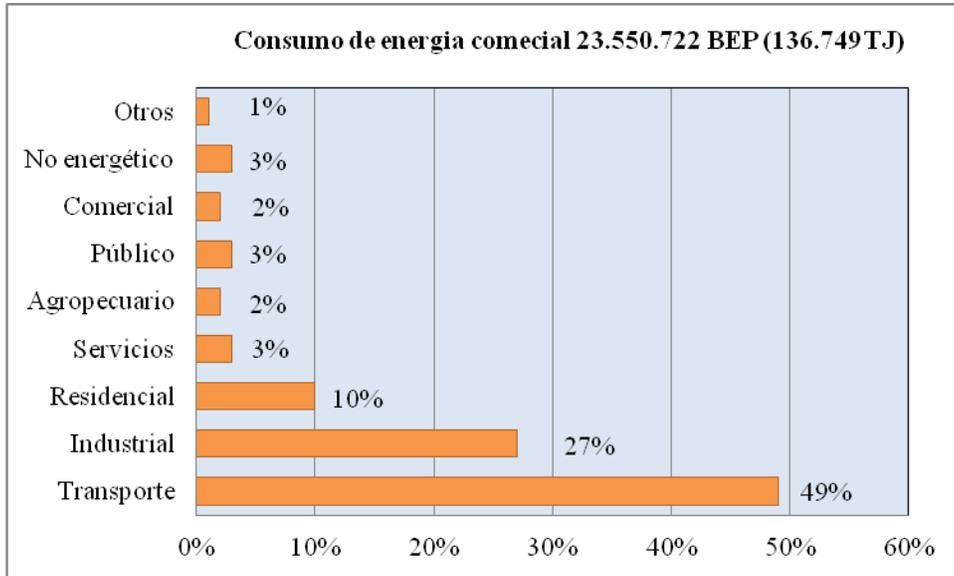
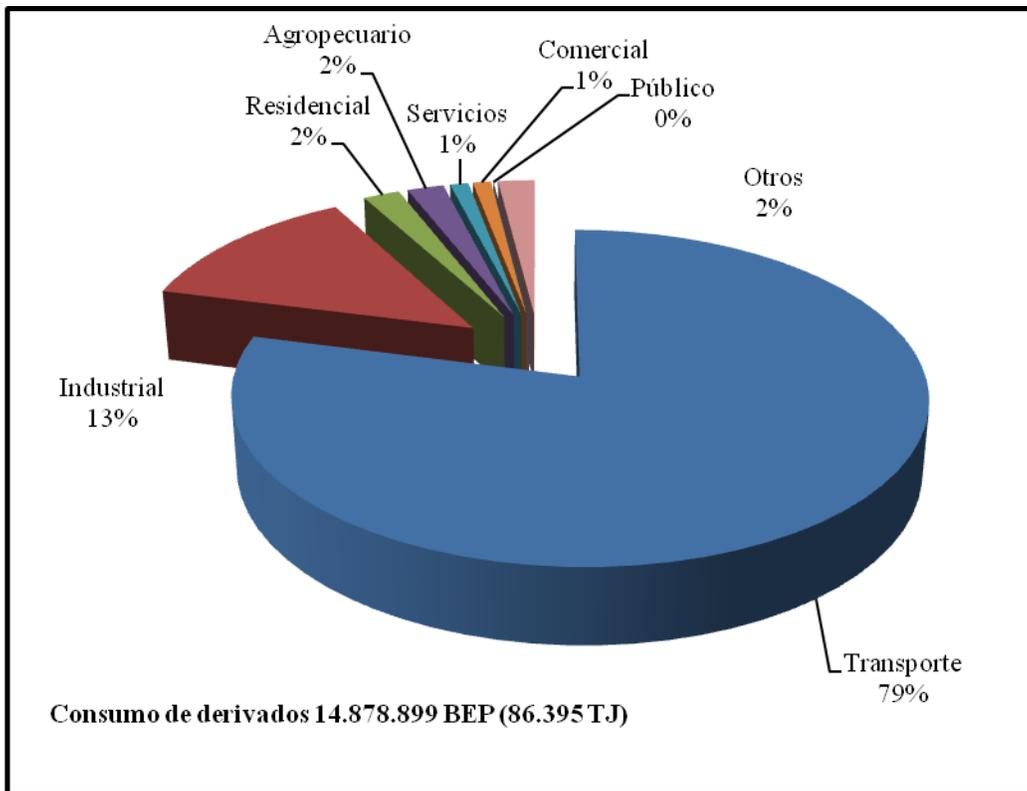


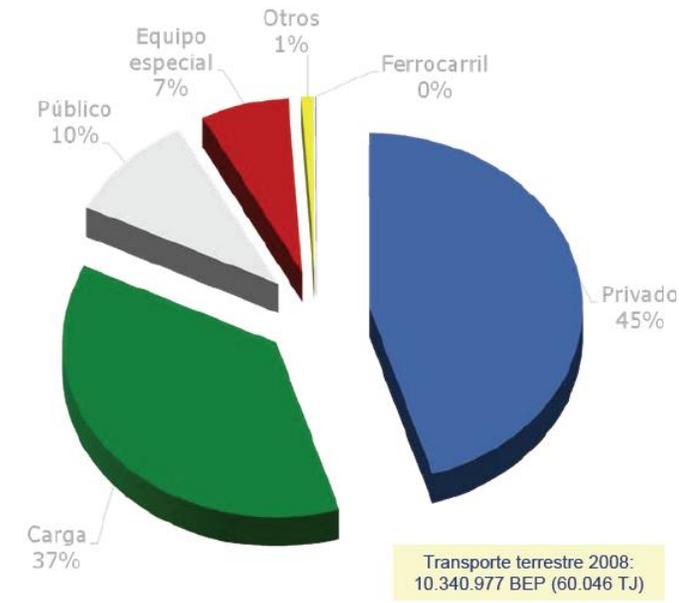
Gráfico 14.- Distribución del consumo final de energía en Costa Rica como función de la fuente.<sup>69,76</sup>



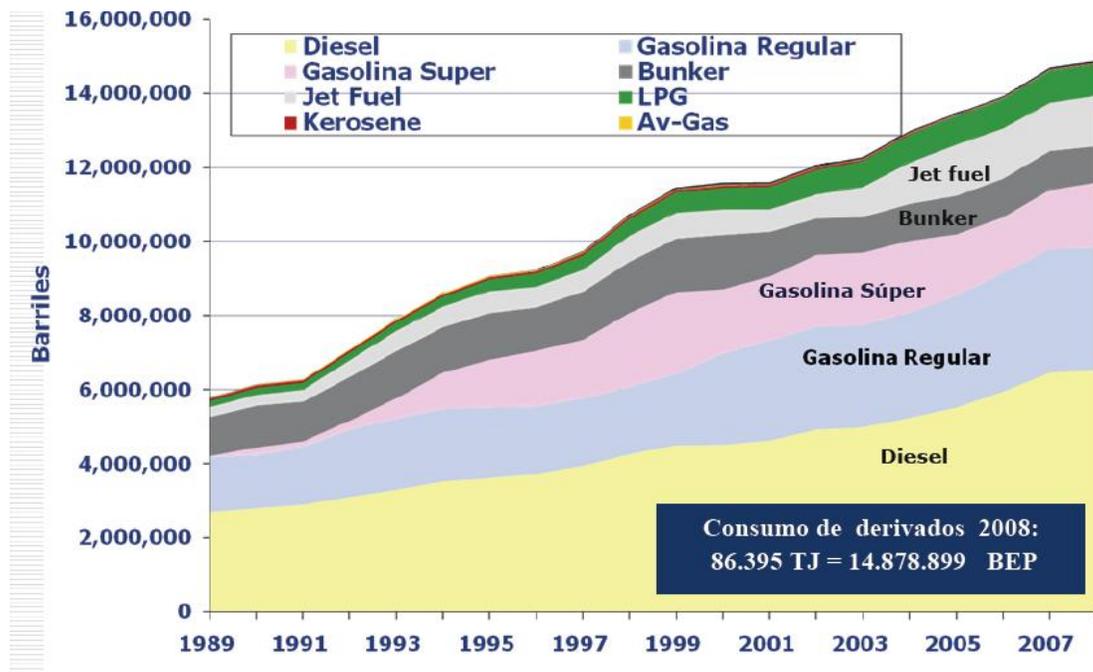
**Gráfico 15.** Distribución porcentual del consumo energético por sector.<sup>75,76</sup>



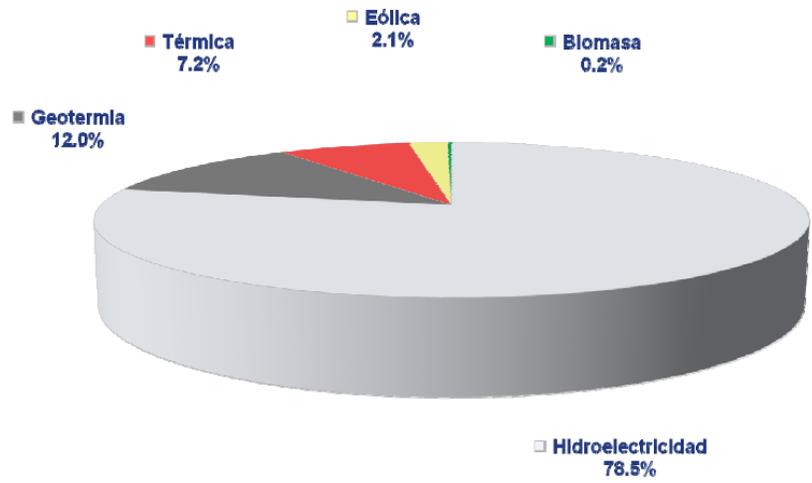
**Gráfico 16.-** Consumo de combustibles fósiles por tipo de uso.<sup>76</sup>



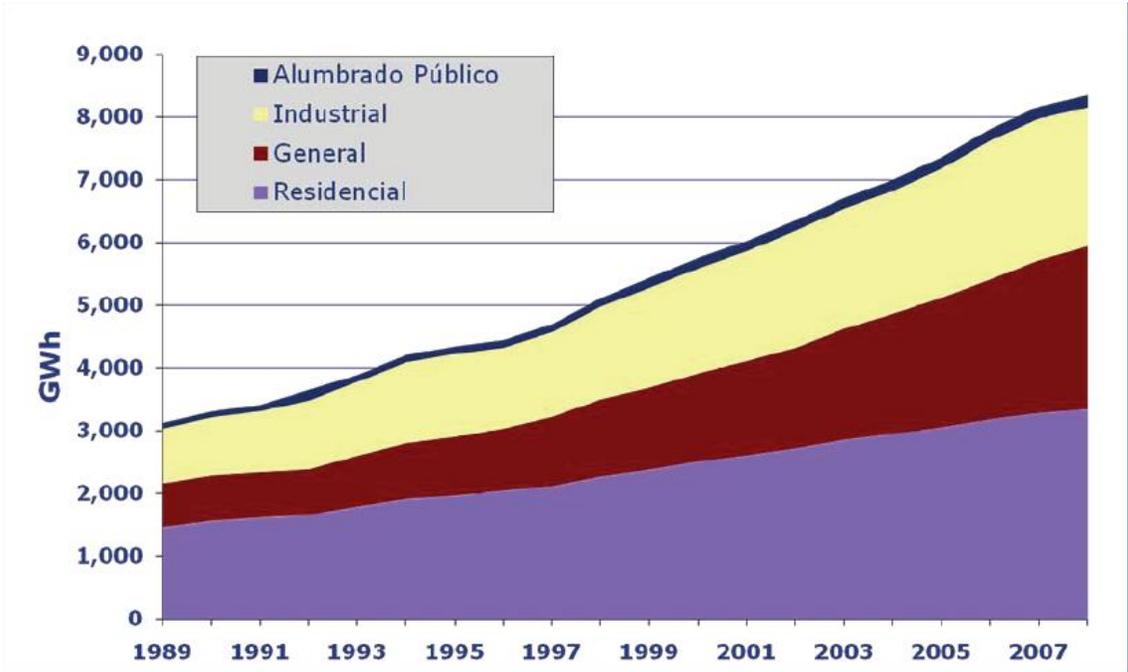
**Gráfico 17-** Consumo de los combustibles de petróleo en el transporte.<sup>76</sup>



**Gráfico 18-** Consumo de derivados de petróleo y su crecimiento.<sup>73</sup>

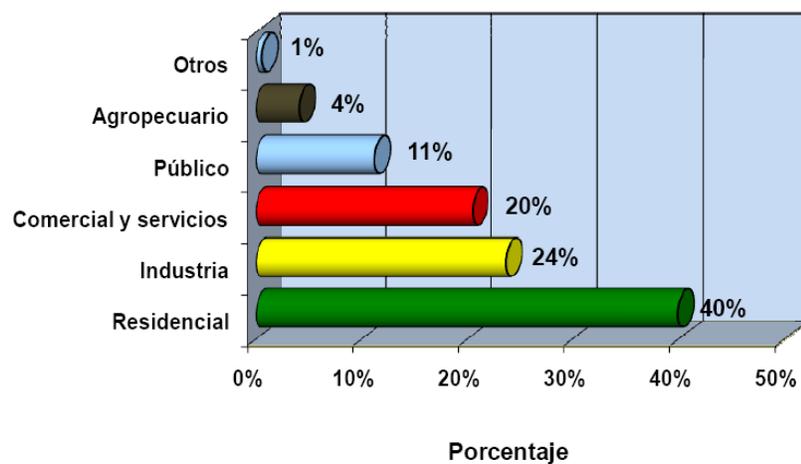


**Gráfico 19.-**Distribución de fuentes de generación de energía. <sup>75</sup>



**Gráfico 20.-** Crecimiento del consumo eléctrico. <sup>76</sup>

En el Gráfico 21 se detalla el consumo de energía eléctrica por sector. El consumo de energía eléctrica se dirige principalmente a un uso residencial, que representa un 40% del total, seguido por la industria y el comercio, con un 24% y 20% respectivamente. <sup>65, 75, 76</sup>



**Gráfico 21.-** Consumo de electricidad por sectores. <sup>69</sup>

## ***4.5. Alcance y procesos***

La metodología desarrollada en el Capítulo 3 define gran parte del alcance y los procesos básicos necesarios de la misma, por lo cual se harán referencias concretas a los temas enumerados a continuación y específicamente asociadas al proceso llevado a cabo para este inventario.

### ***4.5.1. Características del inventario***

El Inventario de Contaminantes Tóxicos del Aire se desarrolla para el GAM tomando como referencia el año 2007.

Los contaminantes tomados como base son los de la EPA (Anexo 1), pretendiendo considerar inicialmente una gran cantidad de este tipo de compuestos, con el fin de valorar en este inventario cuales son los compuestos tóxicos prioritarios. Los tipos y categorías de fuentes se basan en los inventarios y metodologías utilizadas como referencia, especialmente los inventarios de México y las metodologías aportadas por la EPA.<sup>6-30</sup>

### ***4.5.2. Características temporales***

Las estimaciones de emisión realizadas en este inventario tienen como característica temporal una visión de emisiones anuales para el año 2007, principalmente porque existe mayor disponibilidad de información por parte de los entes públicos y otros estudios relacionados, como el IEM, para este año.

No se evalúan variaciones estacionales o de otro nivel de tiempo dentro del año considerado.

### ***4.5.3. Características espaciales***

Generalmente se definen dos términos asociados a condiciones espaciales, que son el dominio del inventario y su resolución espacial

El dominio del inventario es el GAM, la cual presenta características propias influenciadas de manera concreta y estacional por el clima, pero esencialmente con poca perturbación de otras áreas en cuanto al posible transporte de contaminantes. La resolución espacial, por su

parte, considera con qué detalle debe definirse la ubicación de las emisiones de contaminante, situación que aunque considerada inicialmente solo puede esbozarse en términos generales, asociándose a los valores de cada tipo de fuente y su ubicación dentro del área de dominio.

#### **4.5.4. Resolución de especies**

La resolución de especies se basa en la posibilidad de discriminar en una emisión qué tipo de compuestos tóxicos se emiten. Esto se busca a través de factores específicos para cada compuesto, siempre que ello sea posible. Siendo en general fracciones de COT o PM10 asociadas a cada compuesto tóxico, y donde casi nunca es posible utilizar estimaciones con parámetros locales.

#### **4.5.5. Manejo y obtención de datos**

Los datos obtenidos de las distintas fuentes se tabularon en planillas de Microsoft Excel, para facilitar su análisis y cálculos asociados. Los datos provienen de numerosas fuentes, pero tienen una base en los datos obtenidos en el IEM y los valores de importación de los compuestos tóxicos considerados, ya que la gran mayoría son sintéticos y no se producen en el país.

En este sentido, el aporte de los entes asociados a aduanas y la promoción del comercio, como PROCOMER, son básicos para la evaluación de los volúmenes de los compuestos tóxicos del aire utilizados en el país para el año en estudio. Otros aportes de información como los del Instituto Costarricense de Drogas (ICD), el Instituto Regional de Estudio de Sustancias Tóxicas (IRET) u otros organismos, aunque parciales, permiten realizar una contrastación de los valores obtenidos a partir de las importaciones.

En el Anexo 5 se enumeran los valores obtenidos de las evaluaciones de importación, junto con las valoraciones realizadas de su calidad por contraste con otras informaciones disponibles.

Paralelamente los valores del IEM permiten una estimación general de los compuestos tóxicos asociados con valores de producción, consumo, o con los parámetros derivados del IEM, en especial de COT y PM10.<sup>49</sup>

#### **4.5.6. Control de calidad**

El control de calidad de los datos recopilados se hace cualitativamente, con la intención de obtener una idea de la bondad del inventario desarrollado. Las calificaciones utilizadas se adaptaron del enfoque de la EPA para la evaluación de emisiones de dioxinas y furanos, la cual se describe en el Capítulo 4.7.<sup>52</sup>

La aplicación de estas calificaciones permite valorar las posibilidades de mejora de la información en próximos inventarios, a fin de mejorar las estimaciones y visualizar la confiabilidad de las mismas.

## ***4.6. Inventario de emisiones de compuestos tóxicos del aire en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2007***

El Inventario de Emisiones de Compuestos Tóxicos del Aire (ITA) presenta los niveles de los compuestos tóxicos detectados, en toneladas por año, en el 2007.

Las metodologías, el detalle de cálculo y las estimaciones obtenidas para cada tipo de fuente se describen en el Anexo 6 de este documento.

De los 235 compuestos considerados inicialmente (Anexo 1) se estimaron emisiones para 84 de ellos. Estos compuestos son aquellos, para los cuales fue posible estimar su consumo o generación en el área considerada, con base en las informaciones disponibles para el año base utilizado. Para el resto de los compuestos considerados no fue posible plantear emisiones debido a la falta de alguna de las informaciones requeridas.

### ***4.6.1. Emisiones Generales***

Las emisiones anuales estimadas para el GAM en el 2007 son de unas 1.309.372 t/año, de los cuales 6.974 t/año son antropogénicas. Se observa un peso importante de las emisiones por fuentes naturales (99,5%) con respecto a las antropogénicas; lo anterior puede deberse al alto porcentaje de área agrícola forestal en el GAM (85%).

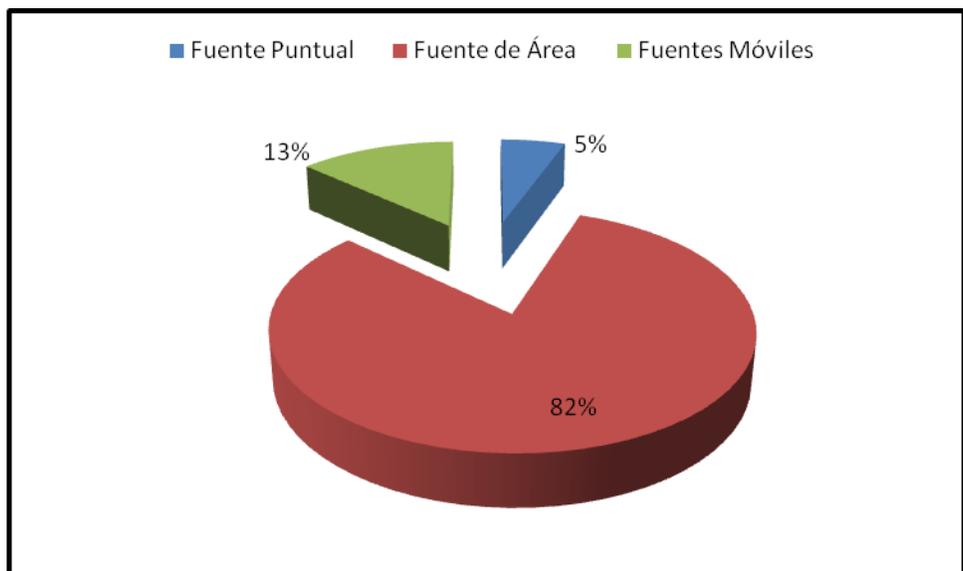
Los valores de emisión antropogénicos relacionados con la población (3.321 t/hab) y el área (1,69 t/(hab km<sup>2</sup>)) son similares a los obtenidos a partir de otros inventarios de la región.<sup>5-12</sup>

Dentro de las emisiones antropogénicas las fuentes de área presentan una preponderancia muy alta (81,5%), como se muestra en el Cuadro 5, y en el Gráfico 22.

En general, las fuentes de área oscilan alrededor del 60% en otros inventarios, por lo que el resultado obtenido en este trabajo representa un nivel elevado si se compara con los valores usuales; este comportamiento se debe posiblemente a la amplia utilización de disolventes domésticos y pinturas. Por el contrario, se encontró un valor relativamente bajo de emisiones de fuentes móviles, que en general es del orden del 35%. Las fuentes puntuales tienen un orden similar a lo esperado del 5%.<sup>5-12, 15, 16, 27, 40, 41, 47, 49</sup>

**Cuadro 5.** Emisiones globales de tóxicos del aire por fuente y porcentajes correspondientes

FUENTE	t/año	% General	% Antropogénico
Fuente puntual o fija	379,16	0,03%	5,44%
Fuente de área	5.680,45	0,43%	81,45%
Fuentes móviles	914,49	0,07%	13,11%
Fuentes naturales	1.303.088,00	99,52%	
Total	1.309.371,78	100,00%	
Total Antropogénico	6.974,10		100,00%



**Gráfico 22.-**Porcentajes de emisiones de contaminantes tóxicos antropogénicas.

El Cuadro 6 muestra la distribución de las emisiones obtenidas por tipo de fuente, así como los porcentajes de cada una con respecto al total y al total antropogénico.

La separación entre global y antropogénica se realiza debido a que las fuentes antropogénicas son aquellas generadas por el hombre y donde puede ser posible una acción más directa de control o mitigación.

**Cuadro 6.-** Emisiones anuales estimadas por categoría, así como sus porcentajes generales y antropogénico.

<b>FUENTES</b>	<b>t/año</b>	<b>% Gral.</b>	<b>% Antrop.</b>
<b>FUENTES DE AREA</b>	<b>42.916,5570</b>	<b>0,434%</b>	<b>81,45%</b>
Leña doméstica	3,1713	0,00%	0,05%
GLP doméstico	0,3358	0,00%	0,00%
Queroseno doméstico	0,0049	0,00%	0,00%
Leña comercial	1,5448	0,00%	0,02%
GLP comercial	0,0584	0,00%	0,00%
Diesel comercial	0,0737	0,00%	0,00%
Fuel Oil comercial	0,0095	0,00%	0,00%
Leña industrial	53,8705	0,00%	0,77%
Bagazo industrial	16,9912	0,00%	0,24%
GLP industrial	0,5466	0,00%	0,01%
Gas natural industrial	2,4385	0,00%	0,03%
Queroseno industrial	0,0018	0,00%	0,00%
Gasóleo industrial	0,0178	0,00%	0,00%
Diesel industrial	0,3476	0,00%	0,00%
Fuel Oil industrial	0,6897	0,00%	0,01%
Diesel sector público	0,0108	0,00%	0,00%
Fuel Oil sector público	0,1500	0,00%	0,00%
GLP sector transporte	12,1781	0,00%	0,17%
Almacenamiento, despacho y distribución de gasolina	51,0160	0,00%	0,73%
Almacenamiento masivo de gasolina	1,3047	0,00%	0,02%
Recarga de aeronaves	1,2386	0,00%	0,02%
Ferrocarriles	0,0032	0,00%	0,00%
Aeronaves	2,0015	0,00%	0,03%
Terminales de autobuses	0,4588	0,00%	0,01%

**Cuadro 6.-** Emisiones anuales estimadas por categoría, así como sus porcentajes generales y antropogénico (continuación)

<b>FUENTES</b>	<b>t/año</b>	<b>% Gral.</b>	<b>% Antrop.</b>
Pinturas industriales y arquitectónicas	1.990,4530	0,15%	28,54%
Pintura automotriz	243,3471	0,02%	3,49%
Pintura de calles	0,0519	0,00%	0,00%
Disolventes domésticos	2.277,4400	0,17%	32,66%
Limpieza industrial	24,8960	0,00%	0,36%
Lavado en seco	135,9499	0,01%	1,95%
Artes gráficas	561,6780	0,04%	8,05%
Asfalto	15,7200	0,00%	0,23%
Pesticidas	41,5726	0,00%	0,60%
Cría de ganado	-	0,00%	0,00%
Quema de basuras	229,9200	0,02%	3,30%
Rellenos sanitarios	1,6230	0,00%	0,02%
Aguas residuales	0,2330	0,00%	0,00%
Esterilización hospitalaria	0,4242	0,00%	0,01%
Fuentes misceláneas	8,6807	0,00%	0,12%
<b>FUENTES FIJAS O PUNTUALES</b>	<b>379,1632</b>	<b>0,029%</b>	<b>5,44%</b>
Elaboración de productos de plástico	0,0250	0,00%	0,00%
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	316,3935	0,02%	4,54%
Fabricación de mezcla asfáltica	0,4184	0,00%	0,01%
Combustión de diesel	0,2800	0,00%	0,00%
Combustión de combustóleo pesado	1,9825	0,00%	0,03%
Fabricación de envases y otros productos de madera y corcho (Excluye muebles)	0,0320	0,00%	0,00%
Fabricación y reparación de muebles principalmente de madera (Incluye colchones)	0,0003	0,00%	0,00%
Fabricación y reparación de muebles principalmente de madera (aplicación de adhesivo)	0,0466	0,00%	0,00%

**Cuadro 6.-** Emisiones anuales estimadas por categoría, así como sus porcentajes generales y antropogénico (continuación)

<b>FUENTES</b>	<b>t/año</b>	<b>% Gral.</b>	<b>% Antrop.</b>
Imprentas, editoriales e industrias conexas (proceso general)	0,0711	0,00%	0,00%
Imprentas, fabricación e industrias conexas (aplicación de adhesivo)	0,0203	0,00%	0,00%
Manufactura de celulosa, papel y sus productos,	0,0069	0,00%	0,00%
Industria textil (proceso general)	0,6495	0,00%	0,01%
Fabricación de sustancias químicas básicas (Excluye las petroquímicas básicas)	0,1957	0,00%	0,00%
Industria textil (teñido)	0,0148	0,00%	0,00%
Alfarería y cerámica (Excluye materiales de construcción)	0,0219	0,00%	0,00%
Fabricación de materiales de arcilla para la construcción	0,0012	0,00%	0,00%
Fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos a base de minerales no metálicos	2,0297	0,00%	0,03%
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	0,0000	0,00%	0,00%
Aplicación de recubrimientos en superficie	0,0189	0,00%	0,00%
Industria básica del hierro (fundición)	0,0917	0,00%	0,00%
Industria del hule	2,0560	0,00%	0,03%
Fabricación de perfiles, tubería y conexiones de resinas termoplásticas	1,6390	0,00%	0,02%
Industrias básicas de metales no ferrosos, Incluye el tratamiento de combustibles nucleares	0,2288	0,00%	0,00%
Fundición y moldeo de piezas metálicas, ferrosas y no ferrosas	0,4461	0,00%	0,01%
Fabricación de otros productos metálicos	0,3548	0,00%	0,01%
Otras industrias manufactureras (promedio)	1,3841	0,00%	0,02%
Fabricación y reparación de muebles principalmente de madera (Incluye colchones)	0,0001	0,00%	0,00%
Manufactura de celulosa, papel y sus productos	0,0073	0,00%	0,00%
Fabricación de sustancias químicas básicas (Excluye las petroquímicas básicas)	0,1013	0,00%	0,00%
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	0,3223	0,00%	0,00%
Fabricación de mezcla asfáltica	0,6972	0,00%	0,01%
Fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos a base de minerales no metálicos	6,2845	0,00%	0,09%
Industria básica del hierro y del acero	0,1305	0,00%	0,00%

**Cuadro 6.-** Emisiones anuales estimadas por categoría, así como sus porcentajes generales y antropogénico (continuación)

<b>FUENTES</b>	<b>t/año</b>	<b>% Gral.</b>	<b>% Antrop.</b>
Industrias básicas de metales no ferrosos, Incluye el tratamiento de combustibles nucleares	0,0113	0,00%	0,00%
Fundición y moldeo de piezas metálicas, ferrosas y no ferrosas	0,7221	0,00%	0,01%
Fabricación y/o ensamble de maquinaria, equipo y accesorios eléctricos, Incluye para la generación de energía eléctrica	1,0154	0,00%	0,01%
Fabricación de otros productos metálicos (Excluye maquinaria y equipo)	0,0831	0,00%	0,00%
Fabricación de materiales de arcilla para la construcción	0,0000	0,00%	0,00%
Industria automotriz	0,0001	0,00%	0,00%
Otras industrias manufactureras	41,3794	0,00%	0,59%
<b>FUENTES MOVILES</b>	<b>914,4860</b>	<b>0,070%</b>	<b>13,11%</b>
Automóviles a gasolina	376,0374	0,03%	5,39%
Automóviles a diesel	0,5723	0,00%	0,01%
Carga liviana y microbuses a gasolina	262,7874	0,02%	3,77%
Carga liviana a diesel	9,3846	0,00%	0,13%
Carga pesada a diesel	88,0930	0,01%	1,26%
Taxis a gasolina	12,5707	0,00%	0,18%
Taxis a diesel	1,4673	0,00%	0,02%
Autobuses a diesel	63,2334	0,00%	0,91%
Motocicletas y bicimotos a gasolina	100,3398	0,01%	1,44%
<b>FUENTES NATURALES</b>	<b>1.303.088,0000</b>	99,468%	-
GLOBAL	1.303.088,0000	99,47%	
<b>TOTAL</b>	<b>1.309.371,78</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

#### 4.6.2. Principales categorías de emisión

En el Cuadro 6 se reporta la distribución general de las emisiones en función de la categoría y expresada cada una como porcentaje para la emisión general y antropogénica. De estas categorías de emisiones analizadas se puede aislar una lista de las 14 principales fuentes de emisión antropogénicas, tomando como criterio emisiones superiores a 50 t/año, las cuales se enumeran en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.-** Categorías principales de las emisiones antropogénicas estimadas de contaminantes tóxicos del aire.

FUENTE	CATEGORIAS	t/año	% Antrop.
FA	Disolventes domésticos	2.277,4400	32,66%
FA	Pinturas industriales y arquitectónicas	1.990,4530	28,54%
FA	Artes gráficas	561,6780	8,05%
FM	Automóviles a gasolina	376,0374	5,39%
FP	Fabricación de vidrio y productos de vidrio	316,3935	4,54%
FM	Carga liviana y microbuses a gasolina	262,7874	3,77%
FA	Pintura automotriz	243,3471	3,49%
FA	Quema de basuras	229,9200	3,30%
FA	Lavado en seco	135,9499	1,95%
FM	Motocicletas y bicimotos a gasolina	100,3398	1,44%
FM	Carga pesada a diesel	88,0930	1,26%
FM	Autobuses a diesel	63,2334	0,91%
FA	Leña industrial	53,8705	0,77%
FA	Almacenamiento, despacho y distribución de gasolina	51,0160	0,73%
	Otras	223,5432	3,21%
	<b>TOTAL Antropogénico</b>	<b>6.974,10</b>	<b>100,00%</b>

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

Las **fuentes de área** son consideradas las principales fuentes emisoras, teniendo varias que presentan niveles elevados de emisión, asociadas principalmente al *Uso de disolventes domésticos* y a las *Pinturas industriales y arquitectónicas*. En una segunda categoría se ubican las fuentes asociadas con las *Artes gráficas*, las *Pinturas Automotrices*, la *Quema de basura* y el *Lavado en seco*.

En otros inventarios aparecen estas fuentes como principales pero en distintos órdenes o proporciones, a excepción de la *Quema de basura*, asociada posiblemente a un problema de disposición de residuos.

En **fuentes móviles** los *Automóviles particulares a gasolina*, los vehículos de *Carga liviana y microbuses de gasolina* constituyen las fuentes principales. En segundo

término, las *Motos*, los vehículos de *Carga pesada* y los *Autobuses* de motor diesel son los siguientes generadores de los tóxicos evaluados.

En otros inventarios no influyen tanto los transportes de carga, lo que indicaría una elevada circulación de las mismas dentro del GAM.

En lo que respecta a las **fuentes puntuales** de emisión de compuestos tóxicos del aire solo la *Fabricación de vidrio* muestra niveles importantes, esto probablemente debido a lo limitado de la información en estas fuentes.

#### **4.6.3. Principales tóxicos emitidos**

En el Cuadro 8 se presentan las emisiones antropogénicas de los 84 compuestos evaluados, discriminadas por tipo de fuente. Por su parte, en el Cuadro 9 se detallan los principales compuestos emitidos a partir de actividades antropogénicas, indicando las masas (en toneladas por año) estimadas y los porcentajes correspondientes.

En el Gráfico 23 se muestran los aportes, en términos porcentuales, de diferentes tipos de fuentes antropogénicas a los contaminantes tóxicos principales del GAM. Los 11 compuestos principales con más de 200 t/año, representan más del 80%, mientras que los 22 primeros tienen emisiones de más de 50 t/año, representando en conjunto más del 95% del total. Los principales compuestos emitidos a partir de actividades antropogénicas son el tolueno, el metanol, los xilenos (isómeros y mezclas), el formaldehído, el benceno y el bromuro de metilo, con más de 300 t/año.

Los tóxicos principales estimados son los usualmente encontrados en otros inventarios, donde algunos presentan emisiones antropogénicas de más del 10%, mientras que los otros disminuyen hasta el 5% o menos.<sup>5-12, 15, 16, 27, 41,</sup>

Casi todos los tóxicos principales tienen una emisión debida mayormente a las fuentes de área ya indicadas, a excepción del benceno y el formaldehído. Ambos tienen un aporte importante de fuentes móviles, principalmente vehículos con motor gasolina, mientras que el formaldehído también proviene de fuentes fijas asociadas principalmente a la *Fabricación de vidrio*.

**Cuadro 8.-** Compuestos tóxicos antropogénicos del aire en el GAM para el 2007, por tipo de fuente.

Nombre EPA	Fuentes de área (t/año)	Fuentes fijas (t/año)	Fuentes móviles (t/año)	TOTAL (t/año)	%
Tolueno	1.470,35	0,33	-	1.470,68	21,09%
Metanol	757,61	0,31	-	757,91	10,87%
Xilenos (isómeros y mezclas)	690,32	0,11	-	690,43	9,90%
Formaldehído	12,95	317,36	245,19	575,50	8,25%
Benceno	106,62	0,06	421,22	527,89	7,57%
Bromuro de metilo	350,96	-	-	350,96	5,03%
Hexano	273,50	0,43	-	273,92	3,93%
m-Xileno	262,09	-	-	262,09	3,76%
Ácido clorhídrico, anhidro	255,92	-	-	255,92	3,67%
p-Xileno	243,40	-	-	243,40	3,49%
Clorobenceno (monoclorobenceno)	234,00	-	-	234,00	3,36%
Metilisobutil cetona (Hexona)	143,29	-	-	143,29	2,05%
Tricloroetileno	128,14	-	-	128,14	1,84%
Metiletil cetona (2-Butanona) (MEK)	116,52	0,37	-	116,88	1,68%
Butadieno (1,3 Butadieno)	0,19	2,24	114,38	116,81	1,67%
Acetaldehído	9,62	-	90,60	100,22	1,44%
Metilerc-butiléter	67,04	-	31,49	98,53	1,41%
1,4-Diclorobenceno	98,27	-	-	98,27	1,41%
o-Xileno	80,44	0,21	-	80,65	1,16%
Naftaleno	67,57	0,41	-	67,98	0,97%
2,2,4-Trimetilpentano	66,75	0,01	-	66,76	0,96%
Etil benceno	63,37	0,04	-	63,42	0,91%
Ácido 2,4 diclorofenoxiacético	32,28	-	-	32,28	0,46%
Plomo (compuestos)	7,83	22,36	-	30,19	0,43%

**Cuadro 8.-** Compuestos tóxicos antropogénicos del aire en el GAM para el 2007, por tipo de fuente (continuación).

Nombre EPA	Fuentes de área (t/año)	Fuentes fijas (t/año)	Fuentes móviles (t/año)	TOTAL (t/año)	%
Óxido de etileno	28,69	-	-	28,69	0,41%
Estireno (Fenil etileno)	26,11	1,53	-	27,64	0,40%
Cumeno	23,68	-	-	23,68	0,34%
Acroleína	7,61	0,00	11,62	19,23	0,28%
1,1,1-Tricloroetano	11,53	0,01	-	11,53	0,17%
Arsénico (compuestos)	0,27	10,94	-	11,21	0,16%
Manganeso (compuestos)	4,92	3,55	-	8,47	0,12%
Antimonio (compuestos)	0,19	7,03	-	7,21	0,10%
Fósforo	5,97	0,76	-	6,72	0,10%
Triclorofluorometano (CFC-11)	5,67	0,13	-	5,80	0,08%
Endosulfán	4,48	-	-	4,48	0,06%
Cloro	2,04	2,15	-	4,19	0,06%
2-Etoxietanol (Ter Monoetilico del Etilenglicol) (Celosolve)	3,71	0,00	-	3,71	0,05%
Etilen glicol	3,39	0,00	-	3,39	0,05%
Cadmio (compuestos)	0,03	3,06	-	3,09	0,04%
Cloruro de metileno	2,57	-	-	2,57	0,04%
Níquel (Compuestos)	0,53	1,76	-	2,28	0,03%
Carbarilo	1,85	-	-	1,85	0,03%
Isoforona (3,5,5-trimetil-2-ciclohexen-1-ona)	1,46	-	-	1,46	0,02%
Captán	1,38	-	-	1,38	0,02%
Cromo (compuestos)	0,44	0,84	-	1,28	0,02%
Fosfina	1,27	-	-	1,27	0,02%
1,1,2,2-Tetracloroetileno	1,11	-	-	1,11	0,02%

Selenio (compuestos)	0,01	0,93	-	0,95	0,01%
----------------------	------	------	---	------	-------

**Cuadro 8.-** Compuestos tóxicos antropogénicos del aire en el GAM para el 2007, por tipo de fuente (continuación).

Nombre EPA	Fuentes de área (t/año)	Fuentes fijas (t/año)	Fuentes móviles (t/año)	TOTAL (t/año)	%
Anilina	-	0,85	-	0,85	0,01%
Cobalto (compuestos)	0,07	0,66	-	0,73	0,01%
Furanos	0,56	-	-	0,56	0,01%
1,2-Diclorobenceno	0,39	-	-	0,39	0,01%
Cadmio	0,38	-	-	0,38	0,01%
Bifenilo	-	0,33	-	0,33	0,00%
Mercurio (compuestos)	0,23	0,07	-	0,29	0,00%
Fenol	0,12	0,10	-	0,22	0,00%
Aldehído propiónico	0,16	-	-	0,16	0,00%
Hexacloroetano	0,12	-	-	0,12	0,00%
Dibutilftalato	-	0,09	-	0,09	0,00%
Tetracloruro de carbono	0,08	-	-	0,08	0,00%
Diclorodifluorometano	-	0,08	-	0,08	0,00%
1,1,1,2-Tetracloroetano	0,05	0,02	-	0,07	0,00%
Berilio (compuestos)	0,01	0,06	-	0,07	0,00%
1,2-Dicloropropano	0,06	-	-	0,06	0,00%
1,2-Dicloroetano	0,05	-	-	0,05	0,00%
Cloroformo	0,05	-	-	0,05	0,00%
Metilparation	0,05	-	-	0,05	0,00%
Clorometano (cloruro de metilo)	0,04	-	-	0,04	0,00%
Cloruro de vinilo	0,03	-	-	0,03	0,00%
1,3-Dicloropropeno	0,02	-	-	0,02	0,00%

Acetofenona	0,02	-	-	0,02	0,00%
Dietanolamina	0,02	-	-	0,02	0,00%

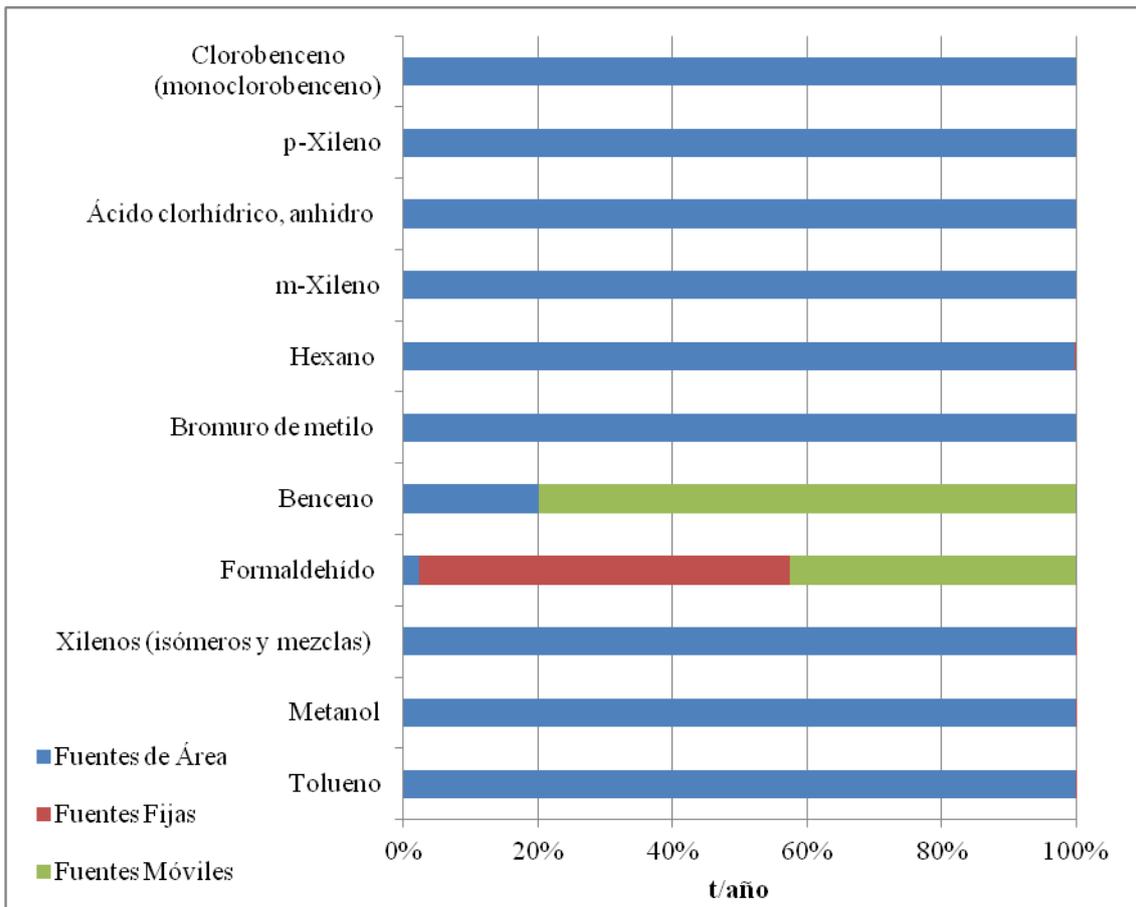
**Cuadro 8.-** Compuestos tóxicos antropogénicos del aire en el GAM para el 2007, por tipo de fuente (continuación).

Nombre EPA	Fuentes de área (t/año)	Fuentes fijas (t/año)	Fuentes móviles (t/año)	TOTAL (t/año)	%
Acetato de vinilo	0,01	-	-	0,01	0,00%
Acetonitrilo	0,00	-	-	0,00	0,00%
Dioxinas	0,00	-	-	0,00	0,00%
Cresol puro, (mezcla de isómeros)	0,00	-	-	0,00	0,00%
Acrilonitrilo	0,00	-	-	0,00	0,00%
2,4-Dinitrofenol	0,00	-	-	0,00	0,00%
4-Nitrofenol	0,00	-	-	0,00	0,00%
Pentaclorofenol	0,00	-	-	0,00	0,00%
Bis(2 etilhexil) ftalato	0,00	-	-	0,00	0,00%
Arsénico inorgánico	0,00	-	-	0,00	0,00%
2,4,6-Triclorofenol	0,00	-	-	0,00	0,00%
Bifenilospoliclorados	0,00	-	-	0,00	0,00%
<b>TOTAL (t/año)</b>	<b>42.916,56</b>	<b>379,16</b>	<b>914,49</b>	<b>6.974,10</b>	<b>100%</b>
<b>% Antropogénico</b>	<b>81,45%</b>	<b>5,44%</b>	<b>13,11%</b>	<b>100%</b>	



**Cuadro 9.-Principales compuestos tóxicos antropogénicos emitidos en el GAM en el 2007**

Nombre EPA	TOTAL (t/año)	%
Tolueno	1.470,68	21,09%
Metanol	757,91	10,87%
Xilenos (isómeros y mezclas)	690,43	9,90%
Formaldehído	575,50	8,25%
Benceno	527,89	7,57%
Bromuro de metilo	350,96	5,03%
Hexano	273,92	3,93%
m-Xileno	262,09	3,76%
Ácido clorhídrico, anhidro	255,92	3,67%
p-Xileno	243,40	3,49%
Clorobenceno (monoclorobenceno)	234,00	3,36%
Otros	1.331,41	19,09%
<b>TOTAL</b>	<b>6.974,10</b>	<b>100,00%</b>



**Gráfico 23.- Aportes de tipos de fuentes antropogénicas a los contaminantes tóxicos principales del GAM**

**4.6.4. Metales tóxicos**

El Cuadro 10 presenta los valores de las emisiones estimadas de metales, así como su proporción por tipo de fuente antropogénica y los porcentajes de la emisión total de metales y dentro de las emisiones antropogénicas.

En general, se incluyen en esta categoría los metales tóxicos (y algunos no metales como selenio y arsénico) en el aire. Si bien los metales tóxicos generaron menos del 1% de las emisiones antropogénicas del GAM en el año 2007, las 66,14 t/año emitidas representa un valor proporcionalmente elevado, por cuanto generalmente las emisiones asociadas con metales tóxicos son inferiores al 0,2% del total de las emisiones.<sup>5-12, 15, 16, 27, 47, 49</sup>

Las principales emisiones provienen de fuentes fijas sin especificar, definidas como *Otras industrias de manufactura*, con una emisión que oscila alrededor del 60%, seguidas por la *Quema de basura* y la *Fabricación de cementos, cal, yesos o similares*, cada una con un aporte del orden del 10% de los metales emitidos.

**Cuadro 10.-Emisiones de metales tóxicos del aire estimados para el GAM en el 2007**

Nombre EPA	Fuentes de área (t/año)	Fuentes fijas (t/año)	Fuentes móviles (t/año)	TOTAL (t/año)	% Global Antrop.	% de Metales
Plomo (compuestos)	7,83	22,36	-	30,19	0,43%	45,64%
Arsénico (compuestos)	0,27	10,94	-	11,21	0,16%	16,94%
Manganeso (compuestos)	4,92	3,55	-	8,47	0,12%	12,81%
Antimonio (compuestos)	0,19	7,03	-	7,21	0,10%	10,91%
Cadmio (compuestos)	0,03	3,06	-	3,09	0,04%	4,66%
Níquel (Compuestos)	0,53	1,76	-	2,28	0,03%	3,45%
Cromo (compuestos)	0,44	0,84	-	1,28	0,02%	1,93%
Selenio (compuestos)	0,01	0,93	-	0,95	0,01%	1,43%
Cobalto (compuestos)	0,07	0,66	-	0,73	0,01%	1,10%
Cadmio	0,38	-	-	0,38	0,01%	0,58%
Mercurio (compuestos)	0,23	0,07	-	0,29	0,00%	0,44%
Berilio (compuestos)	0,01	0,06	-	0,07	0,00%	0,10%
Arsénico inorgánico	0,00	-	-	0,00	0,00%	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>14,89</b>	<b>51,25</b>		<b>66,14</b>	<b>0,95%</b>	

#### **4.6.5. Emisiones por tipo de fuente**

##### **4.6.5.1. Fuentes fijas**

Para las fuentes fijas el principal contaminante estimado fue el formaldehído, con casi el 84% de las emisiones calculadas. En segundo término pero muy por debajo hay una serie de metales como el plomo, el arsénico, el antimonio, el manganeso y el cadmio, los cuales representan alrededor del 12%.

El formaldehído está asociado principalmente a las emisiones de la *fabricación de vidrio*, mientras que los metales están ligados a *otras industrias manufactureras* y a la *fabricación de cementos, cal, yesos o similares*.

Con respecto a la emisión total de fuentes fijas, el aporte de la *fabricación de vidrio* es un 83,5%, mientras que *otras industrias manufactureras* representan cerca del 11% y la *fabricación de cementos, cal, yesos o similares* es solo el 1,7%

Las características de las fuentes puntuales dependen de las industrias existentes en el área de estudio y la información referente a ellas. En este caso las dos actividades de emisión principales están dentro de las empresas principales del GAM y se dispuso de datos asociados a ellas.

En el Cuadro 11 se presentan las emisiones de fuentes fijas y las relaciones porcentuales de cada tóxico con respecto a la emisión total de fuente fija (toneladas de X/toneladas totales de fuentes fijas) y a la emisión global del tóxico considerado (toneladas de X en fuentes fijas/ toneladas totales antropogénicas de X).

Se aprecia que para muchos de los compuestos los porcentajes que representan las fuentes fijas son elevados, mientras que para otros no resulta significativa.

**Cuadro 11.-** Tóxicos emitidos por fuentes fijas y sus porcentajes relativos a fuentes fijas y respecto a la emisión global antropogénica de dicho tóxico.

Nombre EPA	Fuentes fijas (t/año)	% de fuente fija	% Global antropogénica.
Formaldehído	317,36	83,70%	55,15%
Plomo (compuestos)	22,36	5,90%	74,08%
Arsénico (compuestos)	10,94	2,89%	97,62%
Antimonio (compuestos)	7,03	1,85%	97,42%
Manganeso (compuestos)	3,55	0,94%	41,90%
Cadmio (compuestos)	3,06	0,81%	99,05%
Butadieno (1,3 Butadieno)	2,24	0,59%	1,92%
Cloro	2,15	0,57%	51,37%
Níquel (Compuestos)	1,76	0,46%	76,94%
Estireno (Fenil etileno)	1,53	0,40%	5,54%
Selenio (compuestos)	0,93	0,25%	98,46%
Anilina	0,85	0,22%	100,00%
Cromo (compuestos)	0,84	0,22%	65,77%
Fósforo	0,76	0,20%	11,29%
Cobalto (compuestos)	0,66	0,17%	90,30%
Hexano	0,43	0,11%	0,16%
Naftaleno	0,41	0,11%	0,61%
Metiletil cetona (2-Butanona) (MEK)	0,37	0,10%	0,31%
Bifenil	0,33	0,09%	100,00%
Tolueno	0,33	0,09%	0,02%
Metanol	0,31	0,08%	0,04%
o-Xileno	0,21	0,05%	0,26%
Triclorofluorometano (CFC-11)	0,13	0,04%	2,30%
Xilenos (isómeros y mezclas)	0,11	0,03%	0,02%
Fenol	0,10	0,03%	44,07%
Dibutilftalato	0,09	0,02%	100,00%
Diclorodifluorometano	0,08	0,02%	100,00%
Mercurio (compuestos)	0,07	0,02%	22,62%
Berilio (compuestos)	0,06	0,02%	91,82%
Benceno	0,06	0,01%	0,01%
Etil benceno	0,04	0,01%	0,07%
1,1,2,2-Tetracloroetano	0,02	0,01%	29,07%
2,2,4-Trimetilpentano	0,01	0,00%	0,01%
1,1,1-Tricloroetano	0,01	0,00%	0,05%
Acroleína	0,00	0,00%	0,01%
2-Etoxietanol (éter monoetílico del etilenglicol)	0,00	0,00%	0,01%
Etilen glicol	0,00	0,00%	0,01%
<b>TOTAL</b>	<b>379,19</b>	<b>100%</b>	<b>-</b>

#### 4.6.5.2. Fuente de área

Dentro de las fuentes de área se obtiene la emisión de los tóxicos indicados en el Cuadro 12, donde los principales compuestos son el tolueno, el metanol y el xileno, que juntos aportan el 51,37% del total de las emisiones.

**Cuadro 12.-** Tóxicos principales emitidos por fuentes de área.

Nombre EPA	TOTAL (t/año)	% de Fuente de área
Tolueno	1.470,348	25,88%
Metanol	757,607	13,34%
Xilenos (isómeros y mezclas)	690,321	12,15%
Bromuro de Metilo	350,956	6,18%
Hexano	273,497	4,81%
m-Xileno	262,088	4,61%
Ácido clorhídrico, anhidro	255,916	4,51%
p-Xileno	243,400	4,28%
Clorobenceno (monoclorobenceno)	233,998	4,12%
Metilisobutil cetona (Hexona)	143,290	2,52%
Tricloroetileno	128,138	2,26%
Metiletil cetona (2-Butanona) (MEK)	116,516	2,05%
Benceno	106,621	1,88%
Otros	647,758	11,40%
<b>TOTAL</b>	<b>5.680,453</b>	<b>100,00%</b>

En el Cuadro 13 se presenta la composición de los nueve principales compuestos tóxicos evaluados (con más de 300 t/año), los cuales tienen como fuentes principales la *Utilización de disolventes*, a excepción del ácido clorhídrico que deriva principalmente del *Manejo de residuos*.

Para el tolueno las principales fuentes de emisión son la *Pintura industrial y arquitectónica* (57%), los *Disolventes de uso doméstico* (15%), *Artes gráficas* (14%) y *Pintura automotriz* (11%). De forma similar las emisiones de xileno están asociadas a la *Pintura industrial y arquitectónica* (62%), así como a los *Disolventes domésticos* (38%). En el caso del metanol las emisiones están asociadas casi totalmente con los *Disolventes Domésticos*.

El resto de los compuestos tóxicos distribuyen sus emisiones principalmente entre *Pintura industrial y arquitectónica*, el uso en *Disolventes domésticos*, *Artes gráficas*, *Pintura automotriz* y *Lavado en seco*.

El *Uso de disolventes* representa más del 93% de las emisiones de fuentes de área, seguido por el manejo de residuos con casi un 5%.



**Cuadro 13.-** Tóxicos principales emitidos por fuentes de área discriminados por categorías generales.

Nombre EPA	Combustión (t/año)	Distribución de gasolina (t/año)	No circulan por carretera (t/año)	Utilización de disolventes (t/año)	Actividad agrícola (t/año)	Manejo de residuos (t/año)	Fuentes varias (t/año)	TOTAL (t/año)
Tolueno	3,9036	15,4576	0,0511	1.450,6457	-	0,1786	0,1115	1470,348
Metanol	-	-	-	757,5800	-	-	0,0270	757,607
Xilenos (isómeros y mezclas)	-	-	-	690,3200	-	-	0,0009	690,321
Bromuro de Metilo	0,0275	-	-	350,6900	0,2382	-	-	350,956
Hexano	2,8336	16,5050	-	254,0800	-	0,0320	0,0466	273,497
m-Xileno	-	0,2570	0,0142	260,9857	-	0,8310	-	262,088
Ácido clorhídrico	34,8328	-	-	-	-	221,0000	0,0830	255,916
p-Xileno	1,2062	0,2570	0,0142	241,9229	-	-	-	243,400
Clorobenceno (monoclorobenceno)	0,0605	-	-	233,9374	-	-	-	233,998
<b>TOTAL (t/año)</b>	42,8642	32,4766	0,0795	4240,1617	0,2382	222,0416	0,269	<b>4538,131</b>
%	0,94%	0,72%	0,00%	93,43%	0,01%	4,89%	0,01%	100,00%

Dentro de los cálculos de *Usos de disolventes*, la emisión principal se debe a *Uso doméstico de disolventes* con más del 40%, seguido por el uso en *Pinturas industriales y arquitectónicas* con un 35%, para luego pasar a los usos en *Artes gráficas* con una emisión cercana al 10%. De la misma forma resultan elevadas las emisiones por *Quema de basura*, con 4% de las emisiones de fuentes de área, probablemente asociada a un problema de disposición de residuos (Anexo 6).

Se plantea una importancia elevada del *Uso de disolventes* respecto a otros inventarios de la región, donde su estimación es del orden del 60%. Asimismo, la *Quema de basura* no se plantea en general como un emisor importante en esos casos.<sup>5-12, 15, 27</sup>

### 4.6.5.3. Fuentes móviles

Para la evaluación de las emisiones originadas de fuentes móviles se consideraron los 6 compuestos tóxicos principales de las emisiones vehiculares; entre ellos los más significativos son el benceno y el formaldehído. Se consideraron además las emisiones de escape y evaporación que se presentan en el Cuadro 14, donde se aprecian los porcentajes relativos de cada tóxico respecto al total de emisiones de fuentes móviles considerado.

**Cuadro 14.-** Emisiones de compuestos tóxicos originados a partir de fuentes móviles

Tóxico	Escape (t/año)	Evaporación (t/año)	Total (t/año)	% de Fuentes Móviles
Benceno	421,217		421,22	46,06%
MTBE	7,340	24,146	31,49	3,44%
1,3 Butadieno	114,377		114,38	12,51%
Formaldehído	245,188		245,19	26,81%
Acetaldehído	90,599		90,60	9,91%
Acroleína	11,620		11,62	1,27%
<b>TOTAL</b>	<b>890,34</b>	<b>24,15</b>	<b>914,49</b>	
<b>%</b>	<b>97,4%</b>	<b>2,6%</b>		<b>100%</b>

El principal tóxico de emisiones móviles es el benceno (46%), seguido por el formaldehído (26,8%) y posteriormente por 1,3 butadieno (12,5%) y acetaldehído (9,9%).

Estos compuestos aparecen en los inventarios de tóxicos de la región, aunque en distintas proporciones y con otros componentes adicionales.<sup>5-12, 15, 27, 28,30, 41, 47, 49, 94</sup>

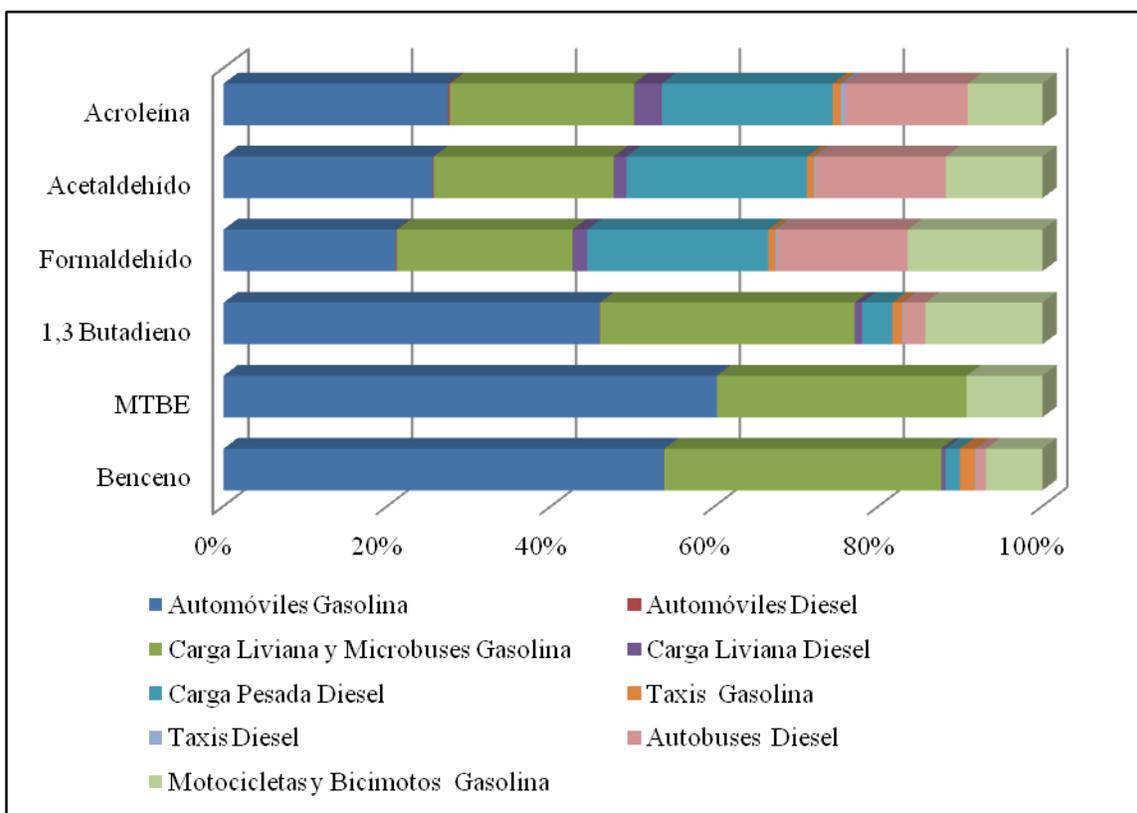
Los *Automóviles particulares a gasolina* son los que aportan en mayor medida casi todos los contaminantes tóxicos considerados (41,2%), pero afectando especialmente a la emisión de benceno, MTBE y 1,3 Butadieno. En segundo término los aportes de *Microbuses y carga liviana a gasolina* (28,7%), así como de *Motocicletas y bicimotos* (11%) son los siguen en importancia.

Los vehículos de *Carga pesada* y los *Autobuses a diesel*, aunque en menor grado (9,6% y 6,9% respectivamente), también afectan en forma importante la emisión de formaldehído, acetaldehído y acroleína al aire.

Las emisiones asociadas al transporte de *Carga liviana y microbuses* no son tan importantes en otros inventarios, pudiendo deberse a una necesidad de transporte interno al GAM por su actividad comercial e industrial.<sup>5-12, 15, 27, 28, 30, 41, 47, 49, 94</sup>

El Gráfico 24 y el Cuadro 15 muestran los porcentajes de aporte de cada categoría a las emisiones de cada tóxico considerado. En general, para los compuestos tóxicos, los vehículos más viejos (fabricados antes de 1984) son los que emiten en mayor proporción los contaminantes (24%), en tanto todos los anteriores a 1992 cerca del 60%, debido a la falta de tecnología de control de emisiones. Esta situación se presenta en otros inventarios de la región.<sup>6-12</sup>

Los valores porcentuales de emisiones de escape (97,4%) respecto a las emisiones evaporativas (2,6%) no son tan acentuados en otros inventarios, siendo en general 75% y 25%, respectivamente. Esto probablemente obedezca a lo limitado del cálculo que se pudo realizar.<sup>5-12, 15, 27, 28, 30, 41, 47, 49, 94</sup>



**Gráfico 24.-**Porcentajes de emisiones de tóxicos de fuentes móviles por categoría

**Cuadro 15.-** Detalle de emisiones por categoría de vehículos en toneladas por año

<b>Código MOBILE</b>	<b>LDVG</b>	<b>LDDV</b>	<b>LDGT 2 y 1</b>	<b>LDDT 12</b>	<b>HDDV 5 y 7</b>	<b>LDVG</b>	<b>LDDV</b>	<b>HDDBT</b>	<b>MC</b>
<b>Nº</b>	<b>1</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>14</b>	<b>26</b>	<b>24</b>
<b>Tipo de Vehículo</b>	<b>Automóviles</b>	<b>Automóviles</b>	<b>Carga liviana y microbuses</b>	<b>Carga liviana</b>	<b>Carga pesada</b>	<b>Taxis</b>	<b>Taxis</b>	<b>Autobuses</b>	<b>Motocicletas y bicimotos</b>
<b>Contaminante</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Diesel</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Diesel</b>	<b>Gasolina</b>
Benceno	226,592	0,137	142,431	2,251	7,278	7,981	0,352	5,224	28,972
MTBE	18,965	0	9,606	0	0	0,002	0	0	2,913
1,3 Butadieno	52,502	0,062	35,583	1,013	4,228	1,450	0,159	3,035	16,345
Formaldehído	51,620	0,265	52,638	4,343	54,200	2,186	0,680	38,905	40,350
Acetaldehído	23,174	0,084	19,914	1,384	19,961	0,836	0,214	14,328	10,701
Acroleína	3,184	0,024	2,616	0,394	2,426	0,115	0,062	1,741	1,058
<b>TOTAL (t/año)</b>	<b>376,037</b>	<b>0,572</b>	<b>262,787</b>	<b>9,385</b>	<b>88,093</b>	<b>12,570</b>	<b>1,467</b>	<b>63,233</b>	<b>100,340</b>
%	41,12%	0,06%	28,74%	1,03%	9,63%	1,37%	0,16%	6,91%	10,97%

#### 4.6.5.4. Fuentes naturales

Las emisiones de fuentes naturales presentan un valor elevado en el ITA, del orden de las 1.303.088 t/año. El alto porcentaje de área cultivable y bosques dentro del GAM (más del 85%) genera una influencia elevada de dichas emisiones.

Como consideración general, los factores seleccionados deben ser tomados con cuidado debido a que corresponden a otras latitudes y regiones climáticas.

Dentro de los contaminantes tóxicos de fuentes naturales el principal es el metanol, que aporta más del 90% de las emisiones. Esto debido a que representa más del 50% de las emisiones de COT de fuentes naturales consideradas por el *Global Biosphere Emissions and Interactions System* (GloBEIS), mientras que los otros compuestos tóxicos tienen valores porcentuales inferiores al 3%. En el Cuadro 16 se presentan los tóxicos estimados.

**Cuadro 16.-** Emisiones de tóxicos del aire de fuentes naturales

Nombre EPA	Emisión (t/año)	% de Fuente Naturales
Metanol	1.192.769	91,53%
Acetaldehído	59.638	4,58%
Formaldehído	47.711	3,66%
Xilenos (isómeros y mezclas)	2.970	0,23%
<b>TOTAL</b>	<b>1.303.088</b>	<b>100%</b>

En general se observó que estas emisiones no tienen un peso importante en los inventarios, alrededor del 5%, debido principalmente a que las áreas agrícolas y boscosas no son importantes en las zonas evaluadas.

#### 4.6.5.5. Distribución espacial

Las consideraciones de evaluación de la distribución espacial escaparon a la disponibilidad de información y a las posibilidades económico-temporales del desarrollo de este inventario, por lo cual se considera dentro de las posibilidades de mejora para próximos inventarios, a ser aplicado a los principales contaminantes encontrados.

#### **4.7. Congruencia, incertidumbre y aseguramiento de los datos**

El objetivo del control de calidad de los datos es obtener de los mismos la mejor confiabilidad posible en cuanto a la precisión y aplicabilidad de dichos valores y de los factores de emisión considerados, al área de estudio.

Aunque estos objetivos son de carácter cualitativo, son necesarios para evaluar la bondad del inventario desarrollado, a fin de proponer acciones de mejora para próximos inventarios.

Los datos (factores y bases) son calificados según el enfoque de la EPA para la evaluación de emisiones de dioxinas y furanos, la cual se describe en el Anexo 6.<sup>25, 52</sup>

El objetivo de la aplicación de estas calificaciones es valorar las posibilidades de mejora de la calidad de la información que se recopile en próximos inventarios, de manera que las estimaciones futuras tengan una mayor confiabilidad.

Para evaluar la **Congruencia** de los datos se estimó el nivel de emisión calculado en función de los distintos parámetros de consumo disponibles en el Anexo 5, en especial respecto a los valores de importación aportados por PROCOMER.

En este sentido se espera que los niveles de emisión sean menores al 5% del consumo directo, sin contar fuentes naturales o emisiones derivadas de fuentes móviles.<sup>5-15, 25-30, 36, 80-</sup>

<sup>83</sup> Esto permitió reconsiderar algunos cálculos de estimación realizados, a fin de no cometer errores en exceso, debidos a datos o factores erróneos, en general asociados a suposiciones o equiparaciones con otros países.

Solo 4 compuestos superan la especificación considerada: benceno, naftaleno, 1,1,1-tricloroetano y el triclorofluoretano (CFC-11). El primero asociado con las emisiones de *fuentes móviles*, mientras que el naftaleno se asocia a *Disolventes domésticos* y el 1,1,1-tricloroetano y el triclorofluoretano (CFC-11) a *Limpieza industrial*.

Para la estimación de las **Incetidumbres** se consideró la aplicación de una escala cualitativa para los datos y los factores de emisión utilizados en cada categoría de emisión.<sup>25, 49, 52</sup> Se utilizan las calificaciones reportadas en el Cuadro 17, con lo cual se

obtuvieron evaluaciones cualitativas de las estimaciones de emisiones, realizadas para cada compuesto tóxico, obteniéndose una escala general de valores entre 0 y 1,2, como se muestra en el Cuadro 18

**Cuadro 17.-** Clasificación cualitativa de los datos de actividad y factores de emisión utilizados en los cálculos del inventario.

<b>Clasificación</b>	<b>Datos de actividad</b>	<b>Factores de Emisión</b>
<b>A = 0,2</b>	Basados en datos exhaustivos específicos para Costa Rica	Basados en datos exhaustivos específicos para Costa Rica
<b>B = 0,4</b>	Basado en datos limitados o extrapolados específicos para Costa Rica	Basado en datos limitados específicos para Costa Rica
<b>C = 0,6</b>	Basado en el discernimiento de expertos	Basado en el discernimiento de expertos
<b>D = 0,8</b>	Basado en factores de Estados Unidos o México	Basado en factores de Estados Unidos o México
<b>E = 1,0</b>	Datos insuficientes	No existen factores de emisión

Como promedio general se obtiene un valor que es de rango **Malo a Pobre**, lo cual indica que debe mejorarse el procedimiento de obtención de datos y la necesidad de incorporar factores de emisión locales.

Con respecto a las fuentes de emisión, el peso relativo de las fuentes de área es muy importante, teniendo un valor cualitativo en el rango de **Pobre**, el cual se va deteriorando por la acumulación de errores derivados de las otras fuentes, aunque estas tengan mejores valores cualitativos.

Las limitaciones de este inventario que le asignan evaluaciones cualitativas de **Pobre**, condiciona la congruencia de los datos en cuanto a su precisión y confiabilidad.

**Cuadro 18.-** Escala de Valoración cualitativa de incertidumbre

<b>Escala cualitativa</b>	<b>Valor cualitativo</b>
<b>&gt; 1</b>	<i>Muy Malo</i>
<b>0.9 a 1</b>	<i>Malo</i>
<b>0.8 a 0.9</b>	<i>Pobre</i>
<b>0.7 a 0.8</b>	<i>Medio</i>
<b>0.6 a 0.7</b>	<i>Leve</i>
<b>0.4 a 0.6</b>	<i>Bueno</i>
<b>0.2 a 0.4</b>	<i>Muy Bueno</i>
<b>0 a 0.2</b>	<i>Excelente</i>

Para una visión general se presenta en el Cuadro 19, la tabla de calificación general cualitativa de los compuestos. En dicho cuadro se reportan las toneladas estimadas de emisión para cada compuesto tóxico, los valores de error cualitativo y los porcentajes de emisión respecto a los volúmenes de importación..

**Cuadro 19.-** Compuestos tóxicos del aire en el GAM para el 2007, con su estimación cualitativa de error y porcentaje respecto a la importación

Nombre EPA	TOTAL (t/año)	Error Cualitativo	% de la Importación
1,1,1-Tricloroetano	11,53	1,131	10,780%
1,1,2,2-Tetracloroetano	0,07	0,925	0,047%
1,1,2,2-Tetracloroetileno	1,11	1,131	0,001%
1,2-Diclorobenceno	0,39	1,131	0,000%
1,2-Dicloroetano	0,05	0,894	0,007%
1,2-Dicloropropano	0,06	0,894	0,010%
1,3-Dicloropropeno	0,02	0,825	SD
1,4-Diclorobenceno	98,27	1,131	0,038%
2,2,4-Trimetilpentano	66,76	1,094	0,235%
2,4,6-Triclorofenol	0,00	0,894	0,000%
2,4-Dinitrofenol	0,00	0,894	0,000%
2-Etoxietanol (éter monoetílico del etilenglicol)	3,71	1,130	0,033%
4-Nitrofenol	0,00	0,894	0,000%
Acetaldehído	100,22	0,738	1,989%
Acetato de vinilo	0,01	1,000	0,000%
Acetofenona	0,02	0,894	0,026%
Acetonitrilo	0,00	1,000	0,000%
Acido 2,4-diclorofenoxiacético	32,28	0,825	0,190%
Ácido clorhídrico, anhidro	255,92	0,986	0,012%
Acilonitrilo	0,00	1,000	0,000%
Acroleína	19,23	0,790	2,777%
Aldehído propiónico	0,16	0,877	0,023%
Anilina	0,85	1,000	0,316%
Antimonio (compuestos)	7,21	1,000	0,133%
Arsénico (compuestos)	11,21	0,999	SD
Arsénico inorgánico	0,00	0,894	0,000%
Benceno	527,89	0,774	25,729%
Berilio (compuestos)	0,07	0,892	0,003%
Bifenilo	0,33	1,000	0,044%
Bifenilos policlorados	0,00	0,894	0,000%
Bis(2 etilhexil) ftalato	0,00	0,894	0,000%
Bromuro de metilo	350,96	1,131	0,083%
Butadieno (1,3-Butadieno)	116,81	0,727	0,015%
Cadmio (compuestos)	3,09	0,998	0,139%
Cadmio	0,38	0,998	0,018%
Captán	1,38	0,825	0,001%
Carbarilo	1,85	0,825	0,021%
Cloro	4,19	0,949	0,000%
Clorobenceno (monoclorobenceno)	234,00	1,131	0,036%
Cloroformo	0,05	0,894	0,003%
Clorometano (cloruro de metilo)	0,04	0,896	SD
Cloruro de metileno	2,57	1,131	0,001%
Cloruro de vinilo	0,03	0,894	SD
Cobalto (compuestos)	0,73	0,951	0,020%
Cresol puro, (mezcla de isómeros)	0,00	1,000	0,000%

Cromo (compuestos)	1,28	0,967	0,000%
Cumeno	23,68	1,125	SD
Dibutilftalato	0,09	1,000	0,000%
Diclorodifluorometano	0,08	1,000	0,000%
Dietanolamina	0,02	1,131	0,000%
Dioxinas	0,00	0,894	0,002%

**Cuadro 19.-** Compuestos tóxicos del aire en el GAM para el 2007, con su estimación cualitativa de error y porcentaje respecto a la importación (continuación)

Nombre EPA	TOTAL (t/año)	Error Cualitativo	% de la Importación
Endosulfán	4,48	0,825	SD
Estireno (Fenil etileno)	27,64	0,989	0,002%
Etil benceno	63,42	1,093	0,031%
Etilen glicol	3,39	1,000	0,002%
Fenol	0,22	0,939	0,000%
Formaldehído	575,50	0,783	0,296%
Fosfina	1,27	0,825	0,010%
Fósforo	6,72	0,998	SD
Furanos	0,56	0,894	0,000%
Hexacloroetano	0,12	1,131	0,002%
Hexano	273,92	1,078	0,048%
Isoforona (3,5,5-trimetil-2-ciclohexen-1-ona)	1,46	1,131	0,002%
Manganeso (compuestos)	8,47	0,961	0,001%
Mercurio (compuestos)	0,29	0,995	0,021%
Metanol	757,91	1,131	0,078%
Metiletil cetona (2-Butanona) (MEK)	116,88	1,079	0,008%
Metilisobutil cetona (Hexona)	143,29	1,004	0,026%
Metilparation	0,05	0,825	SD
Metilterc-butiléter	98,53	0,979	0,060%
m-Xileno	262,09	1,101	0,016%
Naftaleno	67,98	1,130	9,026%
Níquel (Compuestos)	2,28	0,977	0,236%
Óxido de etileno	28,69	1,131	1,069%
o-Xileno	80,65	1,116	0,005%
Pentaclorofenol	0,00	0,894	SD
Plomo (compuestos)	30,19	0,980	0,000%
p-Xileno	243,40	1,099	0,015%
Selenio (compuestos)	0,95	0,865	0,133%
Tetracloruro de carbono	0,08	0,894	0,154%
Tolueno	1470,68	1,044	0,025%
Tricloroetileno	128,14	1,129	0,628%
Triclorofluorometano (CFC-11)	5,80	1,131	5,487%
Xilenos (isómeros y mezclas)	690,43	1,050	0,014%

SD: sin datos

Las incertidumbres cualitativas obtenidas son relativamente elevadas debido a que la mayoría de los factores utilizados son de Estados Unidos o México, mientras que los datos son extrapolados para Costa Rica.

La mayoría de los compuestos presentan una proporción del orden del 1% en relación con los volúmenes de importación evaluados. Son excepciones a esto el benceno, el acetaldehído y la acroleína con un aporte importante de fuentes móviles, el 1,1,1-tricloroetano, triclorofluorometano (CFC-11) y el naftaleno asociados a la categoría de *Uso de disolventes* en fuentes de área.

Debido a la elevada cantidad de compuestos tóxicos y fuentes utilizadas no es posible plantear una tabla completa de las relaciones de incertidumbre consideradas dado el tamaño de la misma. Esta se encuentra para su revisión en la versión digital del presente trabajo.

Para el **Aseguramiento de los datos**, se utilizó la aplicación de medios informáticos en secuencia, con respaldo automático y en nubes de información o correos electrónicos.

Este tipo de respaldos múltiples permite recuperar y reconsiderar los datos utilizados, pero requiere un conocimiento sobre el proceso involucrado en la obtención del documento, en especial si existen cálculos.

En este sentido se plantean tablas Excel para los cálculos y paralelamente archivos Word para la explicación de la aplicación de las metodologías descritas en el Anexo 6.

La presente tesis plantea el resumen de los datos y las aplicaciones metodológicas, pero no los detalles de los cálculos que se encuentran en los archivos de la versión informática.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

Para de la realización de este Inventario de Emisiones de Tóxicos del Aire en el GAM para el 2007 se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El inventario realizado evaluó las emisiones de compuestos tóxicos al aire, a partir de la información disponible para las fuentes de emisión consideradas. Lo anterior representó una limitación en lo referente a la calidad de la información recolectada, pero permitió obtener información básica, resultados y estimaciones iniciales de las emisiones, de gran valor para próximos inventarios, donde el reto será disponer de mejores informaciones y metodologías de cálculo.
2. La cantidad general estimada de emisiones de compuestos tóxicos para el GAM en el 2007 fue de 1.309.372 t/año, de las cuales 6.974 t/año se asocian con emisiones originadas a partir de fuentes antropogénicas. Las emisiones antropogénicas son del orden de 3,321 t/hab y de 1,69 t/(hab km<sup>2</sup>), los cuales resultan similares a los obtenidos en los inventarios utilizados como patrones de comparación (por ej. Inventario de tóxicos del ZMVM en 2004 con 4,821 t/hab y 1,15 t/(hab km<sup>2</sup>))
3. Los resultados indican un aporte elevado de compuestos tóxicos asociados a fuentes naturales (1.303.088 t/año, más del 99,5% del total de emisiones). Esto puede deberse al elevado porcentaje de área agrícola-natural en el GAM (85% del área total). Este aporte en otros inventarios fue del orden de 5%, donde las zonas urbanizadas e industriales son más densas que en el GAM.  
  
Las emisiones de fuentes naturales se concentra en tres compuestos, principalmente: metanol (90%), acetaldehído y formaldehído, asociados a emisiones biogénicas. Este aporte debe ser considerado con cuidado, ya que los factores utilizados no son

de bosques tropicales, como correspondería a este caso, lo que podría implicar una sobrestimación.

4. Las relaciones entre las fuentes antropogénicas de compuestos tóxicos del aire mostraron un nivel de emisiones excesivamente alto de las fuentes de área (más del 81%), y superior a los valores observados en otros inventarios, donde son del orden del 60%. En particular las fuentes móviles mostraron niveles de emisión muy bajos (13%) respecto a los inventarios de zonas densamente pobladas (35%). Las emisiones asociadas con fuentes fijas, mostraron un orden de importancia similar a lo reportado en otros inventarios (5%).

Analizando las fuentes de emisión antropogénicas y sus diferentes categorías encontramos que:

5. Las **fuentes fijas** dependen mucho del tipo de industrias afincadas en el área de evaluación y es difícil una comparación con otros inventarios. Adicionalmente la disponibilidad de información depende del conocimiento de los niveles de consumo o producción de insumos, por lo que la información es limitada.  
En este caso las principales categorías son la *Fabricación de vidrio* con un 83,5% y la categoría de *Otras industrias manufactureras* con el 11%. Seguidas por las categorías de *Fabricación de cementos, cal, yesos o similares*, *la Fabricación de hules*, *Fabricación de tuberías de resinas termoplásticas* y la *Combustión de combustibles pesados*. La *Fabricación de vidrio* plantea emisiones de importancia para este inventario, en especial asociadas a residuos de su combustión en formaldehído, en tanto que las categorías *Otras industrias manufactureras* y *Fabricación de cemento* reportan importantes emisiones de metales, por lo que cabría considerar el control de estas emisiones en particular. Las otras fuentes fijas mostraron valores de emisión más variados en lo que respecta a los tóxicos generados.

6. Para las **fuentes de área**, las principales fuentes de emisión de tóxicos del aire se asocian principalmente a las categorías *Disolventes domésticos* (40%), *Pinturas arquitectónicas e industriales* (35%) y las *Artes gráficas* (10%). Seguidas por las *Pinturas automotrices*, la *Quema de basura* y el *Lavado en seco*. Estos resultados mostraron algunas similitudes con otros inventarios pero con ordenamientos diferentes y sin el peso de *Quema de basura* (4%), lo que implica un posible problema de disposición de los residuos, que llevan a su quema y a generar tóxicos del aire.

El *Uso de disolventes* como clasificación general, representa una proporción muy importante de las emisiones de fuentes del área (93%), respecto a otros inventarios donde ronda el 60%.

7. Para **fuentes móviles**, las categorías principales son *Automóviles particulares* (41,2%) y *Carga liviana o microbuses a gasolina* (28,7%), seguidos posteriormente por *Motocicletas*, *Carga pesada* y *Autobuses a diesel*. Estas relaciones son similares en otros inventarios para los *Automóviles particulares*, *Motocicletas* y *Autobuses a diesel*, donde se marca de forma importante la utilización del transporte vehicular en el GAM; pero se marca también en este caso una diferencia de importancia, en cuanto a las categorías asociadas al transporte de cargas en el GAM. Esto podría explicarse debido a la actividad comercial e industrial en el mismo, y a las dificultades de circulación de cargas, convirtiéndose en un área de la red vial del país sin muchas alternativas de circulación rápida o por fuera de la misma.

Los vehículos a gasolina aportan a todos los contaminantes, aunque en forma especial a benceno, MTBE y 1,3 butadieno; mientras que los vehículos a diesel aportan principalmente formaldehído, acroleína y acetaldehído.

Los aportes principales (más del 60% de las emisiones) derivan de los vehículos más viejos (anteriores a 1992), por la falta de tecnologías de control de emisiones apropiadas.

8. Los principales tóxicos antropogénicos identificados en este inventario en orden de importancia, fueron: tolueno, metanol, xileno, formaldehído, benceno. Por debajo

de estos y también entre los principales se encontramos al bromuro de metilo, hexano, m-xileno, ácido clorhídrico, p-xileno y clorobenceno. Estos compuestos aportan el 80% de las emisiones antropogénicas de tóxicos del aire en el GAM.

La mayoría de los compuestos citados tienen su origen principal (más del 90%) en fuentes de área, a excepción del formaldehído y el benceno. El benceno presenta una importante emisión por fuentes móviles (80%), con solo un 20% asociado a fuentes de área; mientras que el formaldehído tiene sus emisiones principales en fuentes móviles (43%) y fuentes fijas (55%), asociadas a las emisiones de la *Fabricación de vidrio*.

Esta relación se cumple en general para otros inventarios aunque no de forma tan marcada para fuentes de área y variando las consideraciones según las características de las emisiones de fuentes móviles y fijas.

Con respecto a los principales compuestos tóxicos encontrados, estos coinciden con los reportados en otros inventarios de contaminantes tóxicos del aire, aunque con posiciones relativas diferentes según el caso, con la eventualmente aparición de algún otro tóxico adicional. Los porcentajes relativos respecto a la emisión total siempre tienen uno o dos compuestos con valores porcentuales elevados, en este caso el tolueno, el metanol y xilenos con 10% o más, siendo el resto inferiores a ese valor, en general en el entorno del 5% o menos.

9. Las emisiones de tolueno derivan de categorías asociadas a fuentes de área, en especial de *Pinturas arquitectónicas e industriales* (57%), *Disolventes domésticos* (15%) y *Artes gráficas* (14%). Las de metanol tienen su origen principalmente en *Disolventes domésticos* (99%) y las de xileno en *Pinturas arquitectónicas e industriales* (62%) y a *Disolventes domésticos* (38%).

En los otros compuestos, a excepción del formaldehído, el benceno y el ácido clorhídrico, los porcentajes principales de emisión se relacionan con *Disolventes domésticos*, *Pinturas arquitectónicas e industriales*, *Artes gráficas* o *Lavado en seco*. Esto indicaría la necesidad de considerar algún tipo de evaluación de la utilización y posible control de dichos tóxicos en estos usos.

10. El benceno y el formaldehído tienen también un nivel importante de emisiones en **fuentes móviles**, en particular asociadas a *Automóviles a gasolina* y *Carga liviana o microbuses a gasolina* para el benceno (43 y 27%) y distribuida equitativamente para el formaldehído (42% en conjunto). Esto sugiere la necesidad de que se mantengan los controles de emisiones vehiculares, considerándose algún tipo de evaluación respecto a los niveles de VOC, especial para vehículos a gasolina
  
11. En cuanto al ácido clorhídrico su emisión principal es debido a la *Quema de basura* (86%), lo que indica que es necesario evitar este tipo de procesos, mejorando la disposición de residuos.
  
12. La emisión antropogénica de metales (y no 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 son menores (0,2%), por lo que debe tenerse en cuenta respecto a su 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 *Otras industrias de manufactura* (60%), a la *Quema de residuos* (13%) y a la *Fabricación de cementos* (10%), lo que sugiere establecer algún tipo de control sobre las emisiones de metales en estas fuentes.
  
13. Las emisiones de compuestos tóxicos representan, en términos generales, algo menos del 1% de las importaciones de dichos compuestos al país. Esto nos permite inferir una relación general entre los niveles de importación y los de emisión para el país. Por lo que las referencias del nivel de volúmenes importados son de gran importancia para la evaluación de las emisiones de tóxicos.
  
14. Las incertidumbres cualitativas obtenidas nos indican una valoración baja asociada a la calidad de los factores y datos utilizados.

Los factores utilizados son en su mayoría foráneos (de México o Estados Unidos de América), mientras que los datos utilizados son generalmente extrapolados para Costa Rica, a partir de estimaciones adaptadas al país.

Esto plantea una necesidad de mejorar para futuros inventarios la calidad de los datos obtenidos a partir de adecuar los factores a condiciones locales y lograr datos más exhaustivos y específicos para Costa Rica.

## **5.2. Recomendaciones**

Las recomendaciones surgen de la visualización de opciones de mejora tanto para los datos utilizados como para los factores de cálculo, así como para una mejor y más eficiente utilización del inventario como herramienta de Gestión Ambiental.

- El Inventario de Contaminantes Tóxicos del Aire para el GAM en 2007 debería actuar como referente de situación y mejora a nivel de la gestión ambiental de la calidad del aire en el GAM. Para ello debe darse continuidad a la generación de estos inventarios bajo el marco del Plan de Mejora de la Calidad de Aire del GAM.
- El inventario de fuentes fijas se basó en los datos sobre emisiones disponibles a partir de mediciones de fuentes en campo, encuestas y las bases de datos del Ministerio de Salud, aportados inicialmente para el IEM y ampliados para este inventario. Es necesario mejorar dichos datos (digitalizándolos y ampliando la información en ellos) y la forma de su obtención, para que los mismos sean más confiables, se logre una mayor precisión en los consumos, los volúmenes productivos y las posibles emisiones derivadas. La aplicación y desarrollo de los programas de RETC en el país, así como la actualización y mejora de las reglamentaciones que se asocian a la generación de reportes de operación y emisión de fuentes fijas, mejorarían esta situación.
- En este inventario la emisión de tóxicos en fuentes fijas se asocia principalmente a la *Fabricación de vidrio* (pero solo asociado a la emisión de formaldehído) y en un segundo nivel de emisión a *Otras industrias de manufactura*, a la *Fabricación de*

*hules, a la Fabricación de tuberías de resinas termoplásticas, a la Combustión de combustibles pesados, así como a la Fabricación de cementos, cal, yesos y similares.* Esto permitiría establecer un nivel de prioridades sobre la posible generación de factores de emisión locales.

- Debe procurarse la realización de una adecuada ubicación de las fuentes fijas, preferentemente con coordenadas geográficas, a fin de poder utilizar la información dentro de un sistema SIG y permitir la generación de mapas de niveles de emisión.
- En las fuentes de área se realizan muchas estimaciones asociadas a la población, utilizando estadísticas nacionales del INEC. Sería conveniente mejorar o actualizar la información de la distribución de la población por municipio a fin de poder realizar una mejor estimación geográfica de dichas emisiones.
- Debe ser mejorada la obtención de algunas informaciones a nivel local asociadas a los cálculos de emisiones de *Uso de disolventes, Actividades agrícolas* y de *Manejo de residuos*. Principalmente asociado a informaciones relacionadas con el MAG y MinSa.
- Así mismo se pueden mejorar las estimaciones de cálculo en algunos tipos de emisiones de fuentes de área utilizando nuevos sistemas de cálculos existentes o mejorando las estimaciones realizadas, como en el caso de las fuentes móviles que no circulan por carretera.
- Se observó un alto porcentaje de emisiones asociadas con vehículos de más de 20 años, producto de la falta de control de emisiones. En consecuencia se sugiere aumentar el control de emisiones en el parque automotor a fin de disminuir los valores encontrados.
- De igual forma sería beneficiosa la promoción de vehículos con menores niveles de emisiones contaminantes (a gas, eléctricos, híbridos, etc.).

- Se plantea que también es posible la estimación de emisiones para otros compuestos tóxicos asociados a fuentes móviles, pero que los mismos requieren la introducción de factores propios de dichos compuestos en el programa de MOBILE 6 - México, además de la colaboración de personal informático para la correcta aplicación de los mismos en el programa.
- En la utilización del MOBILE 6 - México para el cálculo de emisión de Fuentes móviles se consideró la aplicación de factores ajustados para Costa Rica, pero es menester no solo actualizar dichos factores para futuros inventarios, sino hacerlo más representativo para el país, obteniendo factores propios de manejo y uso de las carreteras.
- El país carece de un inventario forestal nacional actualizado, requerido para la estimación de emisión de fuentes naturales. Por lo que se sugiere la realización del mismo considerando una clasificación por especie, además de un estudio de los niveles de emisión de las mismas, para un adecuado uso en condiciones tropicales.
- Es necesario una estimación más adecuada del nivel de material particulado (PM10) aportado por las carreteras no pavimentadas, teniendo en cuenta sus características para la emisión de tóxicos en fuentes naturales.
- Deben realizarse la estimación cuantitativa de las incertidumbres, a fin de tener una mejor apreciación de los valores obtenidos, teniendo en cuenta que la valoración cualitativa es una guía para la revisión y los cuidados en los cálculos necesarios.
- Se torna importante un adecuado conocimiento de los volúmenes de importación de compuestos tóxicos del aire a través de PROCOMER y el sistema *Tecnología de Información para el Control Aduanero* (TICA), para visualizar las proporciones de emisión consideradas respecto a los volúmenes de importación. Sería recomendable ajustar con Aduanas las consideraciones de cómo evaluar correctamente los

porcentajes asociados a cada compuesto por cada arancel y como estimar más adecuadamente las relaciones de importación-exportación, para tener un nivel más exacto del consumo local de los compuestos tóxicos.

## REFERENCIAS

1. Muller, M., 2002, *Essentials of Inventory Management and Control*, American Management Association International, USA.
2. Canter, L. W., 2000, *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental*, 2ª Ed., Mac Graw Hill, Colombia, pp 177- 230.
3. Dirección Nacional de Medio Ambiente – MVOTMA, 2006, *Metodología para la actualización del Inventario de Emisiones No Intencionales*, Plan Nacional de Implementación, Uruguay.
4. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente, 2007, *Manual para el curso de elaboración y usos de inventarios de emisiones*, México.
5. Dirección de Gestión e Información Ambiental, Instituto Nacional de Ecología, 1997, *Inventario de emisiones y transferencia de contaminantes*, México.
6. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal, 2008, *Inventario de Contaminantes Tóxicos de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2006*, México.
7. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal, 2008, *Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2006*, México.
8. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal, 2010, *Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2008*, México.
9. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal, 2006, *Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2004*, México.
10. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal, 1996, *Programa de mejora de la calidad del aire en el valle de México, 1995- 2000*, México.

11. Secretaria de Medio Ambiente, Gobierno de Ciudad Juárez y Gobierno del Estado de Chihuahua, 1998, *Programa de mejora de la calidad del aire en Ciudad Juárez, 1998- 2002*, México.
12. Secretaria de Medio Ambiente, Secretaria de Salud y Gobierno del Estado de Jalisco, 1997, *Programa de mejora de la calidad del aire en Zona Metropolitana de Guadalajara, 1997- 2001*, México.
13. CONAMA, 2005, *Plan Nacional de Implementación para la Gestión de los Contaminantes Orgánicos Persistentes en Chile*, Chile.
14. Comisión de cooperación ambiental, 2001, *Inventario Preliminar de Emisiones Atmosféricas de Mercurio en México*, México.
15. Alfaro, R., 1998, *Informe de Calidad del Aire de las Capitales Centroamericanas, 1997*. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica.
16. Dirección General de Normas, 2001, *Registro de emisiones y transferencia de Contaminantes, lista de sustancias e informe*, México.
17. Ministerio de Ambiente Energía y Telecomunicaciones, *Dirección de Gestión de Calidad de Ambiental*, Costa Rica. <http://www.digeca.go.cr/aire/> (accesado 10 de abril de 2010).
18. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <http://www.pnuma.org/> (accesado 10 de abril de 2010).
19. Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. <http://www.conama.cl/retc/1279/channel.html> (accesado 10 de abril de 2010).
20. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. <http://www.semarnat.gob.mx/Pages/inicio.aspx> (accesado 10 de abril de 2010).
21. Instituto Nacional de Ecología, México. <http://www.ine.gob.mx/index.php> (accesado 10 de abril de 2010).
22. United Nations Institute for Training and Research. <http://www.unitar.org/cwm/es/node/254> (accesado 10 de abril de 2010).
23. Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo. [http://www.ccad.ws/legislacion/Costa\\_Rica.html](http://www.ccad.ws/legislacion/Costa_Rica.html) (accesado 12 de abril de 2010).
24. Secretaria de Medio Ambiente, México DF. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php> (accesado 12 de abril de 2010).

25. U. S. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/espanol/> (accesado 12 de abril de 2010).
26. Salinas A., 2007, *Preparación de Registros de Emisión y Transferencia de Contaminantes en América Latina y el Caribe*, México.
27. Secretaria de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal (2008) *Evolución y Tendencias de las Emisiones en la ZMVM, 1990-2006*, México.
28. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente, 2007, *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Vehiculares en las Ciudades Mexicanas*, Western Governors Association, México.
29. Díaz, E., García, A., Jazcilevich, A., Fernández, N., 2004, *Contaminación del Aire por Partículas Emitidas por Erosión Eólica*, UNAM. México.
30. Bekir, Gautam, S., 1997, *Contaminación Atmosférica por Vehículos Automotores. Experiencias Recogidas en Siete Centros Urbanos de América Latina*, Documento Técnico del Banco Mundial N° 373S, Banco Mundial, Washington, D.C., USA, p.306.
31. Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N. Jr., 2004, *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, Academic Press, New York, USA, pp 871-930.
32. Tarela, P., 2004, *Calidad De Aire E Impacto En La Salud: Herramientas De Simulación Computacional*, UBA, Buenos Aires, Argentina.
33. Jazcilevich, A.D., A.R. Garcia, L. G. Ruiz-Suarez, **2003**, *A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico*.
34. Comisión Centroamericana de Desarrollo Ambiental, 2005, *La implementación de la Convención de Estocolmo Sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes: Gestión de Tóxicos en la Región Centroamericana*, Guatemala.
35. Sistema Integración Centro Americana. <http://www.sica.int>. (accesado 8 de mayo de 2010).
36. 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.
37. MINAET, MOPT, MinSa, UNA, 2008, *Plan Nacional para Mejorar la Calidad del Aire en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2013*, Costa Rica.

38. MINAET, 2009, *Informe Sobre Productos Químicos CDS*, Costa Rica.
39. PRUGAM, 2009, *Plan Regional Urbano para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2030*, Costa Rica.
40. Herrera, J.; Rodríguez, S., 2007, *Tercer Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José, 2006*, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica.
41. Instituto Nacional de Ecología, 2006, *Diagnóstico Nacional Sobre Inventarios de Emisiones De Fuentes Móviles*, México.
42. Schwela, D., 1998, *Gestión de la calidad del aire y el sistema de la información sobre la gestión del aire (SIGA/AMIS)*, OMS, Ginebra; Suiza.
43. Ministerio de Salud, 2002, *Normas de Calidad de Aire. DE 30221-SALUD*, Diario Oficial la Gaceta 57, Costa Rica.
44. Folker, R., Reinoso, A., 2002, *Manual para MCCM*, INE, México.
45. Atkinson, R., Arey, J., **2003**, Atmospheric Degradation of Volatile Organic Compounds, ACS, *Chem. Rev.*, N°103, USA, pp. 4605-4638.
46. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental-SEMARNAT y Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, 2001, *Guía para la Correcta Selección y Empleo de Métodos de Estimación de Emisiones Contaminantes*, México.
47. Grupo de Producción Más Limpia, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana y Universidad del Norte, **2005**, *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo*, Ingeniería & Desarrollo, N° 17, Cali, Colombia, pp. 115-129.
48. Mellouki, A., Le Bras, G., Sidebottom, H., **2003**, *Kinetics and Mechanisms of the Oxidation of Oxygenated Organic Compounds in the Gas Phase*, ACS, *Chem. Rev.*, N°103, USA, pp. 5077-5096.
49. Herrera, J., Rojas, F., Rodríguez, S., Rojas, A., Rodríguez, J., 2011, *Primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica en el 2007*, UNA-CCAD, Costa Rica.

50. 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*.
51. Banco Central de Costa Rica, 2008, *Memoria Anual 2007*, BCCR, San José, Costa Rica.
52. Watson, J.G., Cooper, J. A., Huntzicker, J. J., **1984**, The Effective Variance Weighting for Least Squares Calculations Applied to the Mass Balance Receptor Model, *Atmos. Environ.*, 18:1347- 1355.
53. Instituto Meteorológico Nacional. *Información Climática de Costa Rica*. <http://www.imn.ac.cr/educacion/climacr/> (accesado 23 de abril de 2010).
54. Fernández, F., 1996. Manual de Climatología Aplicada. Ed. Síntesis. Madrid, España.
55. [Instituto de Fomento y Asesoría Municipal, 2003, Plan Regional Metropolitano y los Cantones del GAM, IFAM, San José, Costa Rica.](#)
56. Barrantes, J; Liao A.; Rosales, A. 1985 *Atlas Climatológico de Costa Rica*. Proyecto MAG-CORENA. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica
57. Wright, J., **2002**, Informe de Radiación Solar en Costa Rica, *Top. Meteor. Oceanog.*, 9: 79-87.
58. Barrantes, P., Martínez, A., 1992, Distribución espacial de los vientos máximos en Costa Rica Tesis de licenciatura en Geografía física, Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica
59. Morales, E., **2011**, La energía del viento en Costa Rica, *Ambientico*, 31: 11-14.
60. Solano, J., Villalobos, R., 2000, Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica, Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica.
61. Faniram, A., Jeje, L., 1983. *Humid tropical geomorphology*, Ed. Longman, New York, USA
62. Ortiz, Sancho, G., 2005, Efectos del ambiente en la duración del concreto, DURACON. Instituto Tecnológico de Costa Rica, pp28-42
63. Valdés J., 2001, 8º Informe Sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, *Gestión de la calidad del aire*, Costa Rica, pp 3-7.

64. Astorga, A., Astorga, Y., Hernández, G., Mora, J., Torres, I., Alfonso, F., López, R., 2000. *Proyecto Sistemas Integrados de Gestión y Calidad Ambiental (SIGA): Componente Costa Rica, Fase 1*. 1ª. Edición, San José, Costa Rica. p.245.
65. Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2008, *Anuario Estadístico 2007*, San José, Costa Rica.
66. Estado de la Nación, 2008, *Informe 14, 2008*, San José, Costa Rica. pp 83-200
67. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2008, *Estadísticas Sectoriales 2004-2007*, San José, Costa Rica
68. Ministerio de Economía Industria y Comercio, 2008, *Estadísticas de PYMEs 2007*, San José, Costa Rica.
69. Fernando Alvarado Z., 2009, *Informe de parque automotor en circulación*, Dirección Sectorial de Energía, San José, Costa Rica.
70. Cantero, M., Se Triplica el Número de Pasajeros del Tren Urbano en Tres Años, *La Nación*, 10 de junio, 2008, p.8
71. Lucke, R., Consolidación del Sector Servicios, *Actualidad Económica*, Finanzas 391, marzo 2008, p 10-15.
72. Costa Rica Investment Promotion Agency, 2011, *Estructura de Costos del Sector Servicios*, CINDE, San José, Costa Rica.
73. Martínez, J. M., Padilla, R., Schatan, C., 2008, *Comercio internacional: de bienes a servicios. Los casos de Costa Rica y México*, Centro de Estudios Para América Latina, México.
74. Cámara de Comercio de Costa Rica, 2009, *Estadística del Comercio, Aporte del sector comercio a la Economía*, San José, Costa Rica.
75. Villa, G., 2009, *Informe de Eficiencia Energética en Costa Rica, Logros y Retos*, DSE, Costa Rica.
76. Molina, A., Villa, G., 2008, *Balance Nacional de Energía*, DSE, Costa Rica.
77. PEMEX, 1997, *Efecto del Gas LP en la ZMCM*. Preparado por PEMEX-Gas y Petroquímica Básica, Ciudad de México, México.
78. INCOFER, 2010, *Información de Consumo de Combustible*, Instituto Costarricense de Ferrocarriles, solicitada por el IEM.

79. MOTP, 2010, *Información Estadística del Transporte Público*, Consejo de Transporte Público, solicitado por el IEM.
80. Ramírez, F. 2011. *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
81. Gouin, T., Wania, F., Ruepert, C., Castillo, L. E., **2008**, Field Testing Passive Air Samplers for Current Use Pesticides in a Tropical Environment, *Environ. Sci. & Tech.*, 42, p 6625.
82. Secretaria Ejecutiva del Planificación Sectorial Agropecuaria, 2011, *Boletín Estadístico Agropecuario N°21*, Costa Rica.
83. Servicio Fitosanitario del Estado, Base de Datos INSUMOSYS, consultas en línea. [www.sfe.go.cr](http://www.sfe.go.cr) (accesado 15 julio 2011).
84. PRESOL, 2007, *Diagnostico y Áreas Prioritarias*, CYMA, Costa Rica, pp 22-24.
85. Instituto Nacional de Seguros, 2010, *Estadística de Vehículos con Marchamo pago al 2008*, Información solicitada por el IEM.
86. Blanco, R., González, J., 2003, *Elaboración de Normas Técnicas sobre la Calidad del Combustibles Vendido en Costa Rica*, CELEQ, ARESEP y FUNDEVI, San José, Costa Rica.
87. Yarwood, G., Wilson, G., Shepard S., 2007, *Users Guide to the Global Biosphere Emissions and Interaction System*, ENVIRON Inc., California, USA.
88. California Emission Inventory Development and Reporting System, *Emission Inventory Documentation*, <http://www.arb.ca.gov/ei/documentation.htm> (accesado 8 de marzo 2011).
89. Martínez, M., Fernández, E., Valdés, J., Barboza, V., Van der Laat, R., Duarte, E., Malavassi, E., Sandoval, L., Barquero, J., Marino, T., **2000**, Chemical Evolution and Volcanic Activity of the Active Crater Lake of Poás Volcano, Costa Rica, 1993–1997, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 97, 127–141.
90. Castillo, A., Valdés, J., Sibaja, J., Vega, I., Alfaro, R., Morales, J., Esquivel, G., Barrantes, E., Black, P., Lean, D., **2011**, Seasonal and Diel Patterns of Total

- Gaseous Mercury Concentration In Atmospheric Air of the Central Valley of Costa Rica, *J. Appl. Geochem.*, 26, pp 242-248.
91. Vaselli, O., Tassi, F., Duarte, E., Fernández, E., Poreda, R. J., Delgado Huertas, A., **2010**, Evolution of Fluid Geochemistry at the Turrialba Volcano (Costa Rica) in the 1998-2008 Decade, *Bull. Of Volcanol.*, 72, pp 397-410.
  92. National Solar Research, 2008, *2007 Annual Report*, AURA, New Mexico, USA.
  93. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, UNEP, New York, USA.
  94. Herrera, J., Rodríguez, S., Rojas, F., **2012**, Determinación de las Emisiones de Contaminantes del Aire, Generados por Fuentes Móviles en Carreteras de Costa Rica, *Tecnología en Marcha*, 25, pp. 54-63.
  95. Chacón, A., Montenegro, J., Sasa, S., 2009, *Inventario Nacional de Emisiones de Gases con Efecto Invernadero y Absorción de Carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005*, MINET, IMN, San José, Costa Rica.
  96. McMurry, P., Shepherd, M., y Vickery, J., 2004. *Particulate Matter Science for Policy Makers. A NARSTRO Assessment*, Cambridge University Press, USA.

