



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Inventario de emisiones de contaminantes criterio de Costa Rica en 2011

Emission inventory of criteria pollutants Costa Rica in 2011

Jorge Herrera

Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, jorge.herrera.murillo@una.cr.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica

Arturo Sánchez, Universidad de Alberta, Canadá

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica

Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski (†), Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Inventario de emisiones de contaminantes criterio de Costa Rica en 2011

Jorge Herrera

El autor, químico, es coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

Resumen

Se determinaron las emisiones de contaminantes criterio a la atmósfera, generadas en Costa Rica durante el año 2011, a partir de la aplicación de factores de emisión, medición en fuentes, aplicación de modelos mecanísticos y balance de materiales. En total se registraron 1 898 591 toneladas de contaminantes criterio, donde las fuentes móviles constituyen las principales aportaciones, con cerca de un 61 %, seguidas de las fuentes área y fijas, con 21 % y 18 %, respectivamente. El contaminante más abundante en peso, generado antropogénicamente durante el 2011, fue el monóxido de carbono (CO). Este se emitió a la atmósfera cerca de 856 264 toneladas al año, principalmente por las fuentes móviles; le siguen en orden de importancia las emisiones de gases orgánicos totales (GOT) con más de 434

Abstract

Criteria pollutant emissions were determined in Costa Rica in 2011, from the application of emission factors, measurement sources, the application of mechanistic models and material balance. A total of 1 898 591 tons of criteria pollutants which were recorded, mobile sources are the main contributions with nearly 61 %, followed by the area and stationary sources, with 21 % and 18 % respectively. The most abundant pollutant in weight, anthropogenically generated during 2011 was the carbon monoxide (CO), issuing into the atmosphere about 856 264 tonnes per year, mainly for mobile sources; next in order of importance emissions of total organic gases (GOT) with more than 434 777 tonnes per year, with mobile sources which generate 40 %.

Introducción

La contaminación atmosférica es, actualmente, uno de los problemas ambientales más serios debido a su impacto negativo sobre la calidad del aire, la salud pública, la conservación de ecosistemas y el desarrollo económico, razones por las cuales se requiere el desarrollo de políticas públicas que garanticen su control efectivo (Kara et al., 2013; Kunzli et al., 2001; Pandey et al., 2013). Los contaminantes que afectan la calidad del aire se clasifican en contaminantes criterio y no criterio. Los primeros se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos y recibieron esta denominación porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud y el medio ambiente. Actualmente el término “contaminantes criterio” ha sido adoptado en muchos países y se ubican en esta categoría los siguientes compuestos:

777 toneladas anuales, por lo que son las fuentes móviles las que generan el 40 %.

Palabras clave: contaminantes criterio, inventario de emisiones, emisiones a la atmósfera, fuentes móviles contaminantes, monóxido de carbono.

Keywords: criteria pollutants, emissions inventories, emissions, mobile source pollutants, carbon monoxide.

dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (MP), plomo (Pb), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃) (Mage et al., 1996). Para cada contaminante criterio se han desarrollado guías y normas, estos instrumentos son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos (INE, 2005).

La generación de los contaminantes criterio resulta de una compleja mezcla de fuentes, que van desde las chimeneas de procesos de combustión industriales y los vehículos de transporte público y privado, hasta el uso individual de productos de aseo, limpiadores domésticos y pinturas. Debido a la compleja naturaleza de la contaminación del aire, se requieren planes detallados para identificar las fuentes de emisión, así como el desarrollo de métodos para reducir el impacto sobre la salud, ocasionado por la exposición a los contaminantes (Tian et al., 2007).

Los inventarios de emisiones constituyen una pieza crucial para las actividades de gestión de la calidad del aire, tanto en los niveles urbano y regional como en el global, ya que son instrumentos que permiten identificar, para cada una de las diversas fuentes presentes en el ámbito geográfico de cobertura, cuáles contaminantes se están emitiendo, en qué tasa se producen, así como sus variaciones temporales y espaciales. Un inventario de emisiones con un bajo nivel de incertidumbre puede proveer información fundamental para explorar los mecanismos de formación de algunos de los contaminantes del aire y así servir de guía para los tomadores de decisiones con respecto al diseño de estrategias para el control de la contaminación del aire (Itahashi et al., 2013).

Los inventarios pueden incluir uno o varios tipos de fuentes: puntuales (aquellas que se dan en un punto fijo o estacionario, como calderas, hornos, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas), móviles (incluyen a las diversas formas de transporte sobre carretera tales como automóviles, camiones, motocicletas, etc.), área (serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que no puede ser incluida de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales, pero que en conjunto puede afectar la calidad del aire en una región) y naturales (TNRCC, 1999). La estimación de los aportes a las emisiones de las diversas fuentes se puede realizar utilizando alguna de las siguientes técnicas:

- **Muestreo en la fuente:** Son mediciones directas de la concentración de contaminantes en un volumen medido de gas y su respectivo caudal en la chimenea.
- **Modelos de emisión:** Son ecuaciones desarrolladas que permiten estimar las emisiones, a partir de uno o más parámetros que caracterizan los procesos y que resultan sustancialmente más fáciles de medir (Radian International, 1997).
- **Encuestas:** Son cuestionarios diseñados para recopilar datos de emisiones. A menudo son utilizados para reunir información de fuentes puntuales desarrolladas en el nivel de establecimiento.
- **Factores de emisión:** Son relaciones entre la cantidad de un contaminante emitido y una sola unidad de actividad. La actividad puede consistir en datos basados en procesos (e. g., producción, horas de operación, área superficial) o en datos basados en censos (e. g., población, número de empleados) (INE, 2005).
- **Balance de materiales:** Se usan mediciones de todos los componentes, de un proceso, excepto el aire para determinar las emisiones.

- **Extrapolación:** Consiste en el escalamiento de las emisiones de una fuente dada a otra, con base en un parámetro de escalamiento conocido para ambas fuentes (e. g., cantidad de producción, área del terreno, número de empleados).

El presente artículo muestra los principales resultados del inventario de emisiones de contaminantes criterio para Costa Rica, tomando como base el 2011, con el fin de identificar las principales fuentes contribuidoras de la generación de los diversos contaminantes que influyen en la calidad del aire de los centros urbanos del país, y así apoyar la generación de política pública que ayude a abatir los problemas de contaminación atmosférica.

Metodología

Características del inventario

El inventario de emisiones (IE) desarrollado posee como año base 2011, debido a que la totalidad de las dependencias gubernamentales contaban con información completa para ese año. El período de este inventario corresponde a un año con una cobertura geográfica nacional y una resolución a escala cantonal. El IE incluye las emisiones estimadas para siete contaminantes, a saber: óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), gases orgánicos totales (GOT), gases orgánicos reactivos (GOR), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas (PM) y amoníaco (NH₃). En materia de especiación, únicamente, se trabajó en material particulado en las fracciones de tamaño PM₁₀ y PM_{2,5}.

Técnicas para el cálculo de las emisiones

Fuentes móviles

Las emisiones generadas por esta categoría fueron estimadas mediante la técnica de factores de emisión, las cuales se obtuvieron utilizando el software Mobile 6; este es un modelo

computacional desarrollado por la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, por sus siglas en inglés) y modificado de acuerdo con las condiciones imperantes en Costa Rica. En la tabla 1 se muestra la información requerida por el modelo Mobile 6 para el cálculo de los factores de emisión. Además de lo anterior, este programa

requiere los siguientes datos de la flota vehicular (USEPA, 2002):

- Fracciones de participación de la flota por tipo de vehículo y año modelo.
- Fracciones de los kilómetros recorridos por tipo de vehículo y año modelo.

Tabla 1. Información requerida como datos de entrada para la operación del modelo MOBILE 6

Parámetro	Datos de entrada proporcionados
Región	Ciudad a una altitud menor o igual a 5 500 ft (1 677 m)
Año calendario por evaluar	2011
Velocidad promedio de circulación en la región	33,1 km/h ⁽¹⁾
Temperatura máxima diaria para la región	35,9 °C ⁽²⁾
Temperatura mínima diaria para la región	14,6 °C ⁽²⁾
Presión de vapor Reid de la gasolina	64,05 kPa ⁽³⁾
Contenido de azufre en diésel	10 ppm ⁽³⁾
Contenido de azufre en gasolina	80 ppm ⁽³⁾
Contenido de oxigenados en gasolina	0,55 % ⁽³⁾

(1) Dato tomado del Estudio de Oferta y Demanda de Transporte, PRUGAM (2010).

(2) Promedio de las estaciones del Instituto Meteorológico Nacional ubicadas en la zona.

(3) Información proporcionada por la Refinadora Costarricense de Petróleo.

Adicionalmente, se clasificó la flota vehicular en circulación del país, a enero del 2011, de acuerdo con las categorías establecidas por el Mobile 6 (tabla 2). La base de datos utilizada como insumo para realizar dicha clasificación fue obtenida del Departamento de Marchamos del Instituto Nacional de Seguros. A partir de estos datos, se realizaron las siguientes consideraciones:

- El parque vehicular que circula en el país tiene un rango de antigüedad de más de 30 años; sin embargo, debido a las necesidades del modelo Mobile 6, fue necesario acortar la clasificación a 25 años modelo.
- Las unidades de clasificación utilizadas corresponden a automóviles, carga liviana, carga pesada, autobuses, taxis y motocicletas.

- Para los efectos del cálculo de factores de emisión, se consideraron los tractocamiones como parte de la categoría de carga pesada, al igual que los remolques, los cuales se contaron como unidades independientes.
- Se asume que los vehículos que circulan en el país tienen actividad los 365 días del año, haciendo a un lado el programa de restricción vehicular existente en la ciudad de San José, debido a que su área de cobertura es despreciable con respecto al área de estudio.

Los datos de actividad fueron tomados de la Encuesta del recorrido medio anual de los vehículos en circulación en Costa Rica, elaborada por la Dirección Sectorial de Energía de Costa Rica (DSE, 2009) (tabla 3).

Tabla 2. Categorías vehiculares empleadas por Mobile 6

Número	Tipo de vehículo	Descripción
1	LDGV	Vehículos ligeros a gasolina (autos de pasajeros)
2	LDGT1	Camiones ligeros a gasolina clase 1 (PBV* de 0 a 2,722 kg; PP** de 0 a 1,701 kg)
3	LDGT2	Camiones ligeros a gasolina clase 2 (PBV de 0 a 2,722 kg; PP > 1,701 a 2,608 kg)
4	LDGT3	Camiones ligeros a gasolina clase 3 (PBV > 2,722 a 3,856 kg; PPA*** de 0 a 2,608 kg)
5	LDGT4	Camiones ligeros a gasolina clase 4 (PBV > 2,722 a 3,856 kg; PPA de 2,609 kg y mayores)
6	HDGV2b	Vehículos pesados a gasolina clase 2b (PBV > 3,856 a 4,536 kg)
7	HDGV3	Vehículos pesados a gasolina clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 kg)
8	HDGV4	Vehículos pesados a gasolina clase 4 (PBV > 6,350 a 7,258 kg)
9	HDGV5	Vehículos pesados a gasolina clase 5 (PBV > 7,258 a 8,845 kg)
10	HDGV6	Vehículos pesados a gasolina clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 kg)
11	HDGV7	Vehículos pesados a gasolina clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 kg)
12	HDGV8a	Vehículos pesados a gasolina clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 kg)
13	HDGV8b	Vehículos pesados a gasolina clase 8b (PBV > 27,216 kg)
14	LDDV	Vehículos ligeros a diésel (autos de pasajeros)
15	LDDT12	Camiones ligeros a diésel clases 1 y 2 (PBV de 0 a 2,722 kg)
16	HDDV2b	Vehículos pesados a diésel clase 2b (PBV de 3,856 a 4,536 kg)
17	HDDV3	Vehículos pesados a diésel clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 kg)
18	HDDV4	Vehículos pesados a diésel clase 4 (PBV > 6,350 a 7,258 kg)
19	HDDV5	Vehículos pesados a diésel clase 5 (PBV > 7,258 a 8,845 kg)
20	HDDV6	Vehículos pesados a diésel clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 kg)
21	HDDV7	Vehículos pesados a diésel clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 kg)
22	HDDV8a	Vehículos pesados a diésel clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 kg)
23	HDDV8b	Vehículos pesados a diésel clase 8b (PBV > 27,216 kg)
24	MC	Motocicletas a gasolina
25	HDGB	Autobuses a gasolina (escolar y transporte urbano e interurbano)
26	HDDBT	Autobuses de transporte urbano e interurbano a diésel
27	HDDBs	Autobuses escolares a diésel
28	LDDT34	Camiones ligeros a diésel clases 3 y 4 (PBV > 2,722 a 3856 kg)

Tabla 3. Datos de actividad de la flota vehicular que circula en Costa Rica

Categoría de vehículo	Kilómetros promedio recorridos en un año
Automóvil particular	20768
Carga liviana	27990
Carga pesada	38934
Taxis	86109
Buses	43417
Motos	16091

Fuente: Dirección Sectorial de Energía, 2009.

Fuentes fijas

Para fines de cálculo de las emisiones correspondientes a esta categoría, se utilizaron las siguientes fuentes de información:

- Listado de empresas y establecimientos comerciales con domicilio en Costa Rica, inscritos en el sistema de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) con cuarenta o más funcionarios registrados en planilla durante el año 2011.
- Encuestas aplicadas a una población muestral de fuentes fijas ubicadas en el área de estudio, a partir del listado obtenido en el punto anterior.
- Balance de energía para la República de Costa Rica, 2011.
- Factores de emisión para distintas actividades industriales, obtenidos vía encuestas directas a las industrias en Costa Rica.

Las emisiones generadas por proceso productivo fueron calculadas utilizando los factores de emisión, de acuerdo con el Source Code Classification (SCC) de la USEPA (1995). Los factores utilizados son factores sin control, ya que en la encuesta que se aplicó a la muestra seleccionada de fuentes fijas, el industrial proporciona información de los equipos de control con que cuenta, así como de la eficiencia de dichos equipos.

La información utilizada para estimar las emisiones por combustión en fuentes fijas incluyó el levantamiento de la capacidad del equipo de combustión, el consumo y tipo de combustible utilizado, el tipo de quemador y si cuenta con algún sistema de control para los gases de combustión y, por último, los horarios de operación.

Toda la información es evaluada, analizada y procesada con la siguiente ecuación:

$$E = A * FE \quad \text{Ecuación 1 (Sin control)}$$

$$E = A * FE * \left(1 - \frac{EC}{100}\right) \quad \text{Ecuación 2 (Con control)}$$

E = emisión de contaminante [$\frac{kg}{hr}$ de contaminante emitido]

A = tasa de actividad [$\frac{m^3}{año}$ de combustible]

FE = factor de emisión, [kg de contaminante emitido por m^3 de combustible quemado]

EC = eficiencia del sistema de control [%]

Para el cálculo de las emisiones por combustión se consideró lo siguiente:

- De la encuesta aplicada a las fuentes fijas se toma el consumo y tipo de combustible reportado por la industria, para cada equipo de combustión, así como la capacidad térmica de estos, se aplica el factor de emisión correspondiente y se realiza el cálculo de las emisiones, tomando en cuenta las horas y los días de operación de los equipos.
- Si el equipo de combustión cuenta con algún dispositivo para controlar sus emisiones, se considera la eficiencia de control, y la emisión de este equipo debe ser afectada por dicha eficiencia para estimar la emisión total (emisión controlada y emisión sin control), es decir, la emisión que realmente se emite a la atmósfera.
- En aquellas industrias a las cuales no se les aplicó la encuesta, se tomaron los datos de consumo de combustibles para el sector industrial del Balance Energético de Costa Rica del 2011.

Fuentes de área

En general, se aplicó la metodología de estimación de emisiones propuesta en los manuales del Programa de Inventario de Emisiones para México (Radian Internacional, 1997). Los procedimientos para estimar las emisiones de este sector son variados, debido a que las fuentes emisoras

involucran tanto procesos de combustión, como de degradación biológica, fugas de combustibles y evaporación de disolventes, entre otros. En la

tabla 4 se presentan las principales categorías y subcategorías de fuentes de emisión, así como su respectiva metodología de cálculo.

Tabla 4. Descripción de las fuentes de área incluidas en el inventario de emisiones

Categoría	Nombre de la fuente	Técnica de estimación	Fuentes de información
Quemado de combustibles en fuentes estacionarias	Uso doméstico de combustibles: leña	Factor de emisión	Viviendas que utilizan leña por municipio (Encuesta Nacional de Hogares, INEC). Consumo anual doméstico de leña en el país (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso doméstico de combustibles: GLP	Factor de emisión	Viviendas que utilizan GLP por municipio (Encuesta Nacional de Hogares, INEC). Consumo anual doméstico de GLP en el país (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso doméstico de combustibles: queroseno	Factor de emisión	Viviendas que utilizan queroseno por municipio (Encuesta Nacional de Hogares, INEC). Consumo anual doméstico de queroseno en el país (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso comercial de combustibles: GLP	Factor de emisión	Estadísticas del sector comercial por municipio (INEC). Consumo anual de GLP en el país para el sector comercial (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso comercial de combustibles: diésel	Factor de emisión	Estadísticas del sector comercial por municipio (INEC). Consumo anual de diésel en el país para el sector comercial (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso de diésel en el sector público	Factor de emisión	Estadísticas de empleo en el sector público por municipio (Encuesta Nacional de Hogares, INEC). Consumo anual de diésel en el sector público del país, 2011 (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso de <i>fuel oil</i> en el sector público	Factor de emisión	Estadísticas de empleo en el sector público por municipio (Encuesta Nacional de Hogares, INEC). Consumo anual de <i>fuel oil</i> en el sector público del país, 2011 (Dirección Sectorial de Energía).
	Uso de GLP en el sector transporte	Factor de emisión	Estadísticas de población (Encuesta Nacional de Hogares, INEC). Consumo anual de GLP en el sector transporte del país (Dirección Sectorial de Energía).
Fuentes móviles que no circulan por carreteras	Ferrocarriles	Factor de emisión	Datos de consumo de combustible en la operación del ferrocarril durante el 2011 (DSE)

Categoría	Nombre de la fuente	Técnica de estimación	Fuentes de información
Fuentes móviles que no circulan por carreteras	Aeronaves	Factor de emisión (modelo FAEED 3.1)	Número de operaciones (incluyendo modelos de aeronaves) realizadas en los aeropuertos ubicados en el área de estudio, durante el 2011 (Dirección General de Aviación Civil).
	Terminales de autobuses	Factor de emisión (Mobile 6 USEPA)	Ubicación de estaciones de autobuses, número de autobuses, número de operaciones de los autobuses, modelos y tipo de combustibles de los autobuses (Consejo de Transporte Público, MOPT).
Uso de disolventes	Recubrimiento de superficies arquitectónicas	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC).
	Pintado de carrocerías	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC).
	Pintura de tráfico	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC).
	Uso doméstico de solventes	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC).
	Lavado en seco	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC).
	Artes gráficas	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC).
Almacenamiento y transporte de derivados del petróleo	Distribución de gasolina	Factor de emisión	Volumen de gasolina distribuido en las estaciones de servicio del país (ARESEP).
	Carga de combustible en aeronaves	Factor de emisión	Volumen de combustible para aviones distribuido en los aeropuertos del país (RECOPE).
	Distribución de gas licuado del petróleo	Factor de emisión	Uso total de GLP en el área de estudio (Dirección Sectorial de Energía).
Fuentes industriales ligeras y comerciales	Panaderías	Factor de emisión	Población de Costa Rica 2011 (INEC). Consumo de pan por habitante: 24,8 kg/hab. por año (Ministerio de Salud, 2001).
	Esterilización en hospitales	Factor de emisión	Factor de emisión asociado a la unidad médica (Procedures for Estimating and Allocating Area Source Missions of Air Toxics. EPA Contract no. 68-02-4254 Work Assignment no. 105). Número de camas por unidad médica (CCSS).
	Actividades de construcción	Factor de emisión	Área total de construcción en el 2011 (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos).

Categoría	Nombre de la fuente	Técnica de estimación	Fuentes de información
Actividades agrícolas	Uso de plaguicidas	Factor de emisión	Uso anual de plaguicidas por ingrediente activo (SFE, MAG). Método de aplicación de los plaguicidas (MAG). Presiones de vapor de los ingredientes activos (USEPA AP42, tabla 9.2.2-1). Tipo de formulación (emulsión, solución, etc.): casas comerciales, etiquetas de productos.
	Aplicación de fertilizantes	Factor de emisión	Uso anual de fertilizante por tipo de producto (SFE, MAG). Contenido de nitrógeno por tipo de fertilizante (SFE, MAG).
	Desechos de animales	Factor de emisión	Población estimada de animales (Cámara de Avicultores, Cámara de Porcicultores, etc.).
	Labranza agrícola	Factor de emisión	Área agrícola cultivada total por tipo de cultivo (INEC).
Manejo de residuos	Quema de basura a cielo abierto	Factor de emisión	Cantidad de viviendas en donde se quema basura (INEC). Tasa de generación de basura por habitante (Ministerio de Salud).
	Rellenos sanitarios	Factor de emisión	Ministerio de Salud: datos de cantidad de residuos ingresada a vertederos y rellenos durante el 2011.
	Tratamiento de aguas residuales	Factor de emisión	Volumen de aguas residuales vertidas con previo tratamiento en Costa Rica (Ministerio de Salud).
	Emisiones domésticas de amoníaco (pañales, mascotas, respiración humana, transpiración humana, desechos humanos)	Factor de emisión	Datos de población de Costa Rica, 2011 (INEC).
	Humo de cigarrillos	Factor de emisión	Datos de población de Costa Rica, 2011 (INEC).
	Incendios en construcciones	Factor de emisión	Datos de vivienda (INEC). Datos de incendios acontecidos en el 2011 (Cuerpo de Bomberos de Costa Rica).
	Incendios forestales	Factor de emisión	Área quemada por año (SINAC, MINAE). Distribución del tipo de bosque (SINAC, MINAE). Carga de combustible (biomasa quemada).

Categoría	Nombre de la fuente	Técnica de estimación	Fuentes de información
Fuente de áreas misceláneas	Polvo de caminos pavimentados	Factor de emisión	Población (INEC). Tasas KRV per cápita (Dirección Sectorial de Energía, MINAE). Distribución de KRV en caminos pavimentados y no pavimentados (MOPT). Carga de sedimentos (LANAME, UCR). Peso promedio de los vehículos (INS). Datos sobre precipitación (IMN).
	Polvo de caminos no pavimentados	Factor de emisión	Población (INEC). Tasas KRV per cápita (Dirección Sectorial de Energía, MINAE). Distribución de KRV en caminos pavimentados y no pavimentados (MOPT). Carga de sedimentos (LANAME, UCR). Peso promedio de los vehículos (INS). Datos sobre precipitación (IMN).

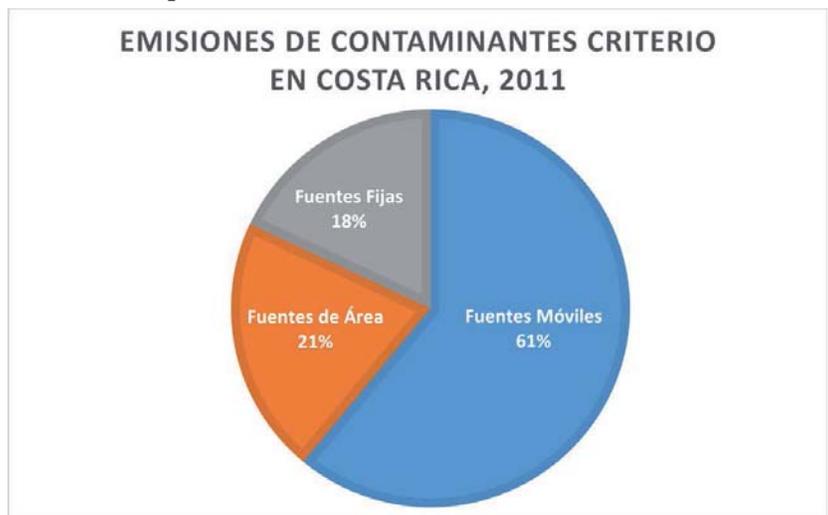
Evaluación de la incertidumbre

La metodología empleada en la identificación de la incertidumbre se basó en lo descrito en el Manual de Control y Aseguramiento de la Calidad del Programa de Mejoramiento de los Inventarios de Emisiones de la US EPA (ERG, 1997), así como en las directrices y la orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, propuesta por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por sus siglas en inglés). Cabe aclarar que no existen metodologías de incertidumbre establecidas para inventarios de contaminantes criterio, por lo que la US EPA recomienda las guías desarrolladas por el IPCC.

De manera general, se utilizó el método TIER 1 para combinar incertidumbres, basado en la propagación de errores. Es un método de combinación de varianzas y covarianzas para una variedad de funciones, incluyendo las que se utilizan en inventarios. Da una solución exacta

para funciones lineales aditivas y una aproximación para productos de dos términos. La mayoría de los inventarios de emisiones son sumas de emisiones, que son los productos de datos de actividad y factores de emisión. Suponiendo que ambas cantidades tengan alguna incertidumbre, esas ecuaciones de inventarios no son lineales con respecto a los cálculos de incertidumbres (IPCC, 2000).

Figura 1. Distribución de la contribución a las emisiones por tipo de fuentes en el inventario de 2011



Resultados y discusión

Datos generales

Durante el 2011, se emitieron en Costa Rica un total de 1 898 591 toneladas de contaminantes criterio al aire donde, según se muestra en la figura 1, las fuentes móviles constituyen las principales aportaciones con cerca de un 61 %, seguido de las fuentes área y fijas, con 21 % y 18 %, respectivamente. Si se divide la cantidad de contaminantes emitidos con respecto a la población existente en el país durante este año, se puede observar que en promedio cada costarricense emitió alrededor de 0,44 ton durante ese período. Al comparar este indicador nacional con los respectivos valores para otros países de la región como Guatemala y El Salvador (0,40 y 0,24 ton/hab., respectivamente), se puede concluir que el país posee un patrón de emisión, per cápita, mayor.

El contaminante más abundante en peso, generado antropogénicamente durante el año 2011, fue el monóxido de carbono (CO), del cual se emitieron a la atmósfera cerca de 856 264 toneladas al año y fue generado principalmente por las fuentes móviles; le siguen en orden de importancia las emisiones de gases orgánicos totales (GOT) con más de 434 777 toneladas anuales, así que son las fuentes móviles las que generan el 40 %. Referente a la contaminación antropogénica por NO_x, se estima que se liberaron al aire alrededor de 138 597 toneladas y el 79,1 % lo generaron las fuentes móviles; de las PM₁₀, se tiene que de las 36 453 ton/año que se emiten, el 62,1 % se desprende de fuentes de área; del total

de PM₁₀, aproximadamente el 69 % son partículas menores a 2,5 μm (PM_{2,5}) y con respecto al cálculo del amoníaco que se estima en 16 328 toneladas, las fuentes de área son las principales emisoras, en particular, por la categoría de emisiones domésticas (figura 3).

Figura 2. Distribución de las emisiones por contaminante criterio emitido en Costa Rica durante 2011

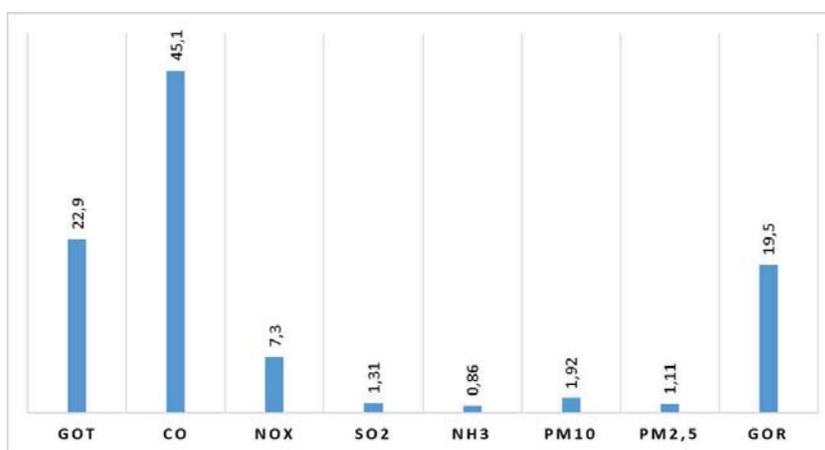
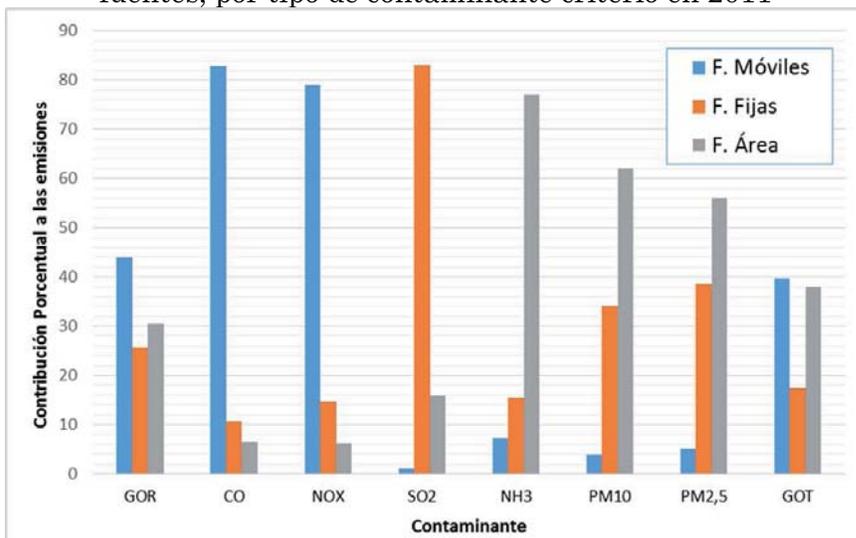


Figura 3. Distribución porcentual de la contribución de las fuentes, por tipo de contaminante criterio en 2011



Emisiones por contaminante

La importancia de desagregar las emisiones por contaminante, básicamente, obedece a la necesidad de conocer qué fuente es la generadora más representativa de las emisiones de cada contaminante y con ello dirigir acciones directas sobre esta emisión para mejorar la calidad del aire. La siguiente sección describe con mayor detalle las emisiones, por cada uno de los contaminantes estimados, así como sus principales generadores.

Partículas menores a 10 y 2,5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2,5}): En Costa Rica, la generación de partículas se debe principalmente a la circulación por caminos sin pavimentar, sector que forma parte de las fuentes de área. En total, se tienen 36 506 toneladas anuales de PM₁₀, de estas, las vialidades sin pavimentar aportan el 27,4 % y las vialidades pavimentadas el 5,2 %. Otros sectores de importancia son las fuentes fijas con 34,1 %, las actividades agrícolas y el tratamiento de residuos con el 9,2 % y el 13,6 %, así como los vehículos de carga liviana con el 10, 8%. Para el inventario, se tiene que el 32,6 % de las PM₁₀ en el 2011 es de origen geológico, asumiendo que las partículas generadas por las vialidades pavimentadas y no pavimentadas

corresponden a este tipo de partículas. El factor de actividad para el cálculo de emisiones de partículas resuspendidas en las vialidades son los kilómetros recorridos por los vehículos sobre ellas, los cuales van en aumento conforme crece la flota vehicular, con lo cual, es de esperar que las partículas de este tipo vayan en aumento.

Las PM_{2,5} se estimaron en 21 074 toneladas anuales y son las principales generadoras las actividades de manejo de residuos, especialmente la quema de basura a cielo abierto, con un 24,8 %. Les siguen en orden de importancia los vehículos de carga liviana, con una aportación del 22,6 % y, en conjunto, las fuentes puntuales generan el 14,2 %. Cabe resaltar que las emisiones de PM_{2,5} de los vehículos de carga liviana, pesada y autobuses provienen de la combustión del diésel.

Dióxido de azufre (SO₂): La industria emitió el 83 % de las 24 872 toneladas totales de SO₂ que se generaron en Costa Rica, y fue la rama más contaminante la industria de fabricación de cemento y vidrio. Las fuentes móviles en su categoría de autos de carga liviana contribuyeron con el 3,5 %, azufre que proviene de la gasolina y del diésel que consumen según sea su tipo de motor.

Tabla 5. Emisiones generadas por fuentes móviles en Costa Rica, durante 2011, segregadas por tipos de vehículos

Categoría	GOR	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}	GOT
Autobuses de gasolina	16,2	683,1	45,1	0,21	0,2	0,3	0,2	9,0
Autobuses de diésel	1 340	4 749	15 410	3,90	11,8	147,3	125,2	1278,3
Particulares de gasolina	108 187	468 692	33 667	173,8	782,0	201,5	97,6	71 815
Particulares de diésel	3 137	1045,4	2 321	2,1	6,9	117,8	96,6	2 471
C. liviana de gasolina	6 364	145 719	5 774	31,7	111,5	30,5	15,2	56 728
C. liviana de diésel	17 224	9 374	27 011	14,5	44,0	547,2	465,1	16 351
Motocicletas	8 752	47 533	2 050	17,2	17,9	59,1	33,0	8 198
Carga pesada	15 037	9 521	21 136	7,3	22,1	275,4	234,0	14 348
Taxis de gasolina	2 334	22 092	1 935	10,0	45,1	11,6	5,6	1 216
Taxis de diésel	217,5	143,4	243,5	0,4	1,3	22,4	18,3	164,0
Total	162 608	709 553	109 593	261	1 043	1 413	1 091	172 579

Monóxido de carbono (CO): El 82,9 % del CO fue emitido por las fuentes móviles. Se tiene que de las 709 553 toneladas anuales los sectores de mayor importancia son los autos particulares con el 54,9 %, así como los vehículos de carga liviana y las motocicletas con el 18,1 % y 6,7 %, respectivamente. Estas emisiones se generan debido a la combustión incompleta del combustible en los vehículos.

Óxidos de nitrógeno (NOx): Los óxidos de nitrógeno, al igual que el CO, fueron generados principalmente por las fuentes móviles, así que contribuyeron con el 79,1 % de las 138 597 toneladas anuales que se emitieron de este contaminante. Los autos particulares fueron los que más aportaron con el 29,5 %, le siguen en orden de importancia los vehículos de carga liviana que generaron el 24,3 %; con una menor emisión se tiene a los autobuses, así como a la generación de energía que participan con el 14,4 % y 6 % cada uno, respectivamente. Los NOx se generaron fundamentalmente por la oxidación del nitrógeno del aire a altas temperaturas, durante la ignición del combustible.

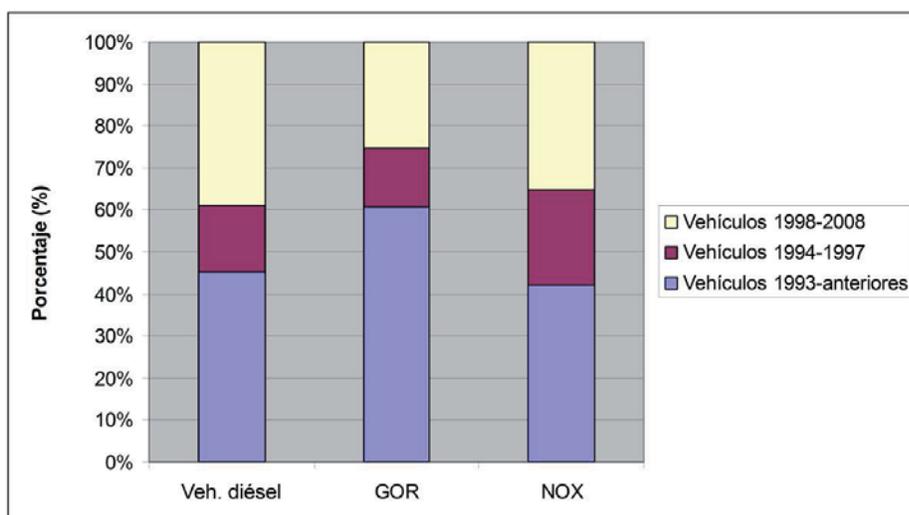
Gases orgánicos reactivos (GOR): Se estimaron 370 225 toneladas anuales de estos contaminantes, entre los cuales las fuentes móviles y de área generaron las mayores emisiones, con 43,9 % y 30,4 %, respectivamente. Entre los sectores más contaminantes se tienen a los autos particulares y a las fuentes fijas, los cuales representaron el 40,7 % y 25,6 % del total, respectivamente; también se puede mencionar al consumo de solventes para uso doméstico, los que en conjunto generaron el 11 %. Es importante referirse a que los GOR son un conjunto de compuestos con alto índice de reactividad, que al interactuar con los NOx en presencia de energía solar contribuyen a la formación del ozono.

Emisiones de fuentes móviles

En la tabla 5 se muestran las emisiones causadas por las fuentes móviles que circulan en carreteras en Costa Rica, por contaminante y tipo de vehículo en el año 2011. Tal como se puede observar, la mayor cantidad de las emisiones de partículas por fuentes móviles es aportada por los vehículos de carga liviana, los cuales generan el mayor porcentaje de toneladas anuales de partículas PM_{10} y $PM_{2,5}$ (40,9 % y 44 %, respectivamente). Una situación diferente se presenta al analizar las emisiones de NOx y CO, cuando los vehículos particulares resultaron ser la principal fuente emisora de estos gases resultantes del proceso de combustión.

En la figura 4, se tiene la comparación porcentual entre la emisión de los precursores de ozono (gases orgánicos reactivos y óxidos de nitrógeno), así como el porcentaje de vehículos de diésel, que se encontraban en circulación en Costa Rica para el 2011, de acuerdo con el año-modelo. Se observa que el 46,5 % de los vehículos (años-modelo 1993 y anteriores) emite el 64,8 % de los gases orgánicos reactivos y el 43,5 % de los óxidos de nitrógeno. Los vehículos años-modelo 1994-1997 (tecnología EPA 94) representan el 18% de

Figura 4. Contribución porcentual a las emisiones de GOR y NOx de los vehículos que operan con diésel en Costa Rica, 2011



la flota vehicular, los cuales emiten el 12,5 % de los gases orgánicos reactivos y el 25 % de los óxidos de nitrógeno. Finalmente, los vehículos que corresponden a los años-modelo 1998-2008 (tecnología EPA 98) representan el 41 % de la flota de vehículos de diésel y aportan el 26,5 % y el 37 % de los gases orgánicos reactivos y de los óxidos de nitrógeno, respectivamente. Complementando este análisis, en la figura 5, se consideró el resto de la flota, es decir, vehículos que utilizan gasolina como combustible, de acuerdo con el año-modelo correspondiente a los estratos tecnológicos y su aporte de emisiones de GOR y NOx.

En la figura 5 se observa que los vehículos que no cuentan con sistemas para controlar emisiones (años-modelo 1990 y anteriores) representan el 23,2 % de los vehículos y contribuyen con el 79,2 % y el 20,3 % a las emisiones de GOR y de NOx, respectivamente. El 14,3 % de los vehículos corresponde a los años-modelo 1991 y 1992 que ya tienen incorporados algunos sistemas de control de emisiones como encendido electrónico y convertidor catalítico de dos vías, los cuales emiten el 8,8 % de los gases orgánicos reactivos y el 20,6 % de óxidos de nitrógeno. Por último, los vehículos correspondientes a los años-modelo 1993-2008

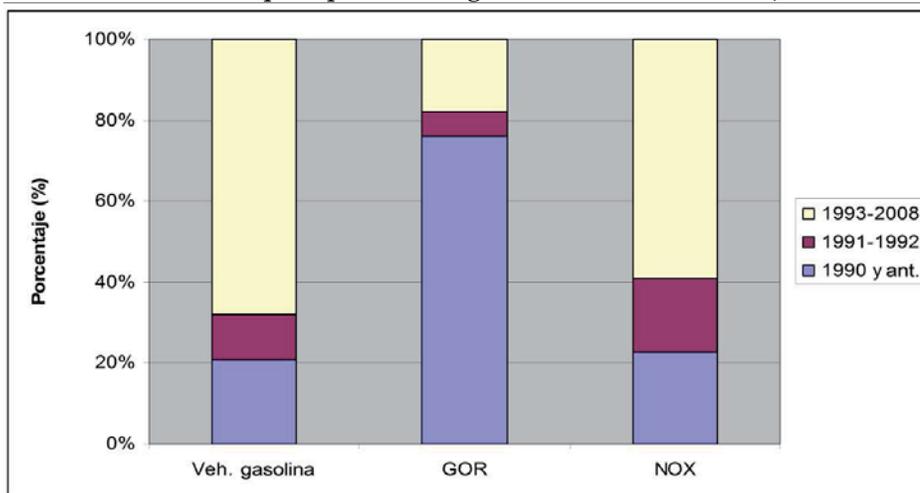
(68 %), los cuales se consideran los menos contaminantes debido a que están equipados con sistemas de control de emisiones avanzados (tales como convertidor catalítico de tres vías, canister para controlar las emisiones evaporativas, computadoras a bordo y sensores de oxígeno), aportan el 18 % de los gases orgánicos reactivos y el 59 % de los óxidos de nitrógeno.

Conclusiones

El inventario de emisiones obtenido plantea una ruta de trabajo para los tomadores de decisiones en materia de política pública en calidad del aire, donde las fuentes móviles emergen como las grandes contribuidoras. En esta materia, tal como se evidenció en el inventario, el envejecimiento de la flota vehicular es un factor crítico, donde los vehículos con más de 15 años son responsables de alrededor del 60 % del total de las emisiones. Medidas como la regulación de las importaciones de vehículos usados y el establecimiento de un modelo de control de emisiones vehiculares que sea más restrictivo hacia los vehículos de mayor edad deben ser valoradas en esta materia.

Adicionalmente, el aporte de las fuentes de emisión depende fuertemente del contaminante criterio en estudio, ya que, por ejemplo, mientras que para el CO y los NOx la principal contribución proviene de fuentes móviles, en el caso del SO₂ el aporte es mayoritariamente debido a fuentes fijas. Debido a lo anterior, un programa para mejorar la calidad del aire en Costa Rica deberá contar con una serie de medidas diferenciadas por contaminante.

Figura 5. Contribución porcentual a las emisiones de GOR y NOx de los vehículos que operan con gasolina en Costa Rica, 2010



Referencias

- Dirección Sectorial de Energía. (2009). Encuesta de recorridos medios de vehículos en Costa Rica 2009. Disponible en <http://www.dse.go.cr>
- ERG. (1997). Programa de Mejoramiento de los Inventarios de Emisiones (vol. VI). Capítulos del I al V. Preparado para Quality Assurance Committee Emission Inventory Improvement Program. USA. Disponible en <http://www.epa.gov/ttnchie1/eiip/techreport/volume06/vi04.pdf>
- INE-SEMARNAT. (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. México, D. F. Disponible en <http://www.ine.gob.mx/publicaciones>
- IPCC. (2000). Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (vols. 1-5). Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- Itahashi, S., Uno, I. y Kim, S. (2013). Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia based on CMAQ-HDDM. *Atmospheric Environment* 70, 204-217.
- Kara, E., Ozdilek, H. G. y Kara, E. (2013). Ambient air quality and asthma cases in Nigde, Turkey. *Environmental Science Pollution Research* 20, 4225-4234.
- Kunzli, N., Medina, S., Kaiser, R., Quenel, P., Horak, F. y Studnicka, M. (2001). Assessment of deaths attributable to air pollution: should we use risk estimates based on time series or on cohort studies? *American Journal of Epidemiology* 153, 1050-1055.
- Mage, D., Ozolins, G., Peterson, P. y Webster, R. (1996). Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment* 30 (5), 681-686.
- Pandey, P., Patel, D. K., Khan, A. H., Barman, S. C., Murthy, R. C. y Kisku, C. G. (2003). Temporal distribution of fine particulates (PM_{2.5}, PM₁₀), potentially toxic metals, PAHs and Metal-bound carcinogenic risk in the population of Lucknow City, India. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering* 48, 730-745.
- PRUGAM. (2010). Plan Regional Urbano para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2030, Costa Rica.
- Radian International. (1997). Manuales del Programa de Inventario de Emisiones de México. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Vehículos Automotores (vol. VI). Sacramento, CA 95827.
- Tian, H. Z., Hao, J. M., Hu, M. Y. y Nie, Y. F. (2007). Recent trends of energy consumption and air pollution in China. *Journal Energy Engineering* 133, 4-12.
- TNRCC. (1999). Processing Air Pollution Emissions Data. Texas Natural Resources Conservation Commission, Austin, Texas. Disponible en <http://www.tnrcc.state.tx.us/air/aqp/emissproc.html>.
- US EPA. (1995). Compilación de factores de emisión de la contaminación atmosférica. Fuentes estacionarias puntuales y de área (vol. I, quinta edición). Oficina de Planeación y Normatividad sobre Calidad del Aire, Research Triangle Park, Carolina del Norte. Disponible en <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42>
- US EPA. (2002). Guía del usuario del modelo de factores de emisión de fuentes móviles MOBILE6.1 y MOBILE6.2. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Disponible en <http://www.epa.gov/otaq/models/mobile6/r02028.pdf>