

Inventario de Emisiones Atmosféricas Contaminantes de la Ciudad de Cochabamba, Bolivia, año 2008

Atmospheric Pollutant Release Inventory for the City of Cochabamba, Bolivia, 2008

Alejandro Pareja, Marcia Hinojosa y Marcos Luján

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica
Boliviana San Pablo, calle M. Márquez s/n esq. Parque J. Trigo, Tupuraya,
Cochabamba

e-mail: lujan@ucbcbba.edu.bo

Resumen: Se elaboró un inventario de emisiones para la ciudad de Cochabamba tomando como año de estudio el 2008. Para las fuentes fijas y fuentes de área se utilizaron estimaciones en base a factores de emisión e indicadores de actividad de las fuentes, para las fuentes móviles se utilizó el software IVEM (*International Vehicle Emissions Model*). Se pudo establecer que el parque vehicular es la principal fuentes de emisiones contaminantes, sobre todo en cuanto a PM₁₀ y NO_x, ya que causan un 92% de las emisiones de estos dos contaminantes. Los vehículos que más contaminan y que más ocupan las calles de la ciudad son los automóviles y minibuses de transporte público. Las fuentes de área generan poca contaminación pero se destacan las ladrilleras por sus emisiones de PM₁₀ y CO y el botadero de K'ara K'ara por sus emisiones de CH₄. En cuanto a GEI, se generan 1,67 millones de teq. de CO₂ por año, con una tasa per cápita de 2,72 teq. de CO₂ año⁻¹ hab⁻¹.

Palabras clave: Inventario de emisiones, contaminación atmosférica, GEI, IVEM, Cochabamba.

Abstract: An inventory of emissions for Cochabamba was elaborated taking as study year 2008. For stationary sources and area sources we used estimates based on emission factors and activity indicators of sources, for mobile sources IVEM software was used (*International Vehicle Emissions Model*). It was established that the vehicle fleet is the main source of emissions, especially in terms of PM₁₀ and NO_x, as they cause 92% of the emissions of these two pollutants. The most polluting vehicles and that more occupy the streets of the city are taxis and public transport minibuses. Area sources generate little pollution but the brick industry stands by their emissions of PM₁₀ and CO and K'ara K'ara

dump for CH₄ emissions. As for GHGs, the city of Cochabamba generated 1.67 millions of teq. of CO₂ per year, with a rate of 2.72 per capita of teq. CO₂ yr⁻¹.

Key words: Inventory of emissions, air pollution, GHG IVEM, Cochabamba.

1 Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales que más afecta a los centros urbanos de los países en desarrollo. Según estimaciones de la OMS, se producen unos 2 millones de muertes prematuras al año por efecto de aire contaminado en interiores y 1,3 millones por contaminación del aire urbano; en ambos casos los más afectados son los niños menores de cinco años y otros sectores sensibles de la población [13]. El nivel de contaminación del aire al que estamos expuestos está, en general, fuera del control del individuo por lo que es necesario que autoridades competentes sean las que se encarguen de garantizar en un mínimo la calidad del aire que respiramos.

El crecimiento acelerado de la población y el parque vehicular, en las ciudades de estos países, asociado con un incipiente control de las emisiones contaminantes, genera una situación en la que la calidad del aire que se respira en los centros urbanos de los países en desarrollo empeora de manera sostenida y sin un límite previsible. En países como Bolivia, las autoridades pertinentes empezaron a trabajar en la problemática de la contaminación del aire a inicios de siglo XXI, aunque de manera incipiente, pero, poco a poco, se tiene una mayor conciencia, tanto entre las autoridades como entre la población, de la importancia de implementar sistemas de gestión de la calidad del aire en todos los centros urbanos importantes del país.

Cochabamba es una de las ciudades de Bolivia que presenta elevados niveles de contaminación del aire, por encima de los valores guía sugeridos por la OMS [9][11][14] y también, en gran parte del año, de los límites establecidos por la Ley del Medio Ambiente N° 1333 [10]. Esta situación implica un serio riesgo para la salud de la población

La ciudad de Cochabamba se encuentra ubicada en un valle cerrado por cadenas montañosas a una altura de 2.560 m s.n.m. Tiene una población de 633.280 habitantes (proyección al año 2012, según datos del INE [7]). La ciudad ocupa toda la provincia y municipio de Cercado del Departamento de Cochabamba con una extensión de 391 km². Es la tercera ciudad en importancia de Bolivia, siendo al mismo tiempo la capital del departamento.

Por las características topográficas del valle en que se encuentra la ciudad de Cochabamba, la ventilación y dispersión de la contaminación es muy pobre. Sobre todo en los meses de invierno, se establecen inversiones térmicas que se rompen sólo hacia el medio día. La altura de mezcla se estima en unos 400 m durante los

meses de verano y en unos 250 m durante los meses de invierno [11]. Este comportamiento de las corrientes de aire, asociadas a una fuerte radiación solar, provoca que se produzcan elevadas inmisiones de contaminantes sobre todo de material particulado (PM_{10}), ozono y dióxido de nitrógeno [9], [11]. Durante el invierno se registran las mayores inmisiones de contaminantes, siendo los meses de junio, julio y agosto, los que presentan los peores índices de calidad del aire. De manera general, las inmisiones se duplican en estos meses en relación a los valores registrados en los meses del verano.

De acuerdo a la evaluación realizada por uno de los autores del presente artículo [11][9], se puede atribuir a la contaminación del aire en la ciudad de Cochabamba alrededor de 230 muertes al año y unos 8.800 casos de infecciones respiratorias agudas (IRAs). Este nivel de afectación a la salud de la población se ha producido desde que el año 2006 hasta el año 2010 [12] y la situación tiende a empeorar debido al aumento de la población y de las fuentes emisoras de contaminantes, en especial del parque automotor. Por ello, es de vital importancia, tanto para las autoridades del Gobierno Municipal del Cercado y otras autoridades competentes, desarrollar un sistema de gestión de la calidad del aire que permita reducir sustancialmente los niveles de contaminación del aire en esta ciudad.

Uno de los elementos esenciales de un sistema de gestión de la calidad del aire es contar con un inventario de las emisiones contaminantes que se generan en la ciudad. El inventario de emisiones permite identificar y cuantificar las principales fuentes de emisiones de contaminantes primarios para luego desarrollar un plan de acción que permita reducir las emisiones de estas fuentes y mejorar la calidad del aire que se respira en la ciudad. Es con este objetivo que los autores del presente trabajo desarrollaron un inventario de emisiones para el Municipio del Cercado de Cochabamba, tomando como año base de estudio el año 2008.

2 Los inventarios de las emisiones contaminantes

El inventario de emisiones contaminantes a la atmósfera (IECA) es uno de los elementos estratégicos esenciales para la gestión de la calidad del aire urbano. Consiste en la determinación de la cantidad de contaminantes primarios más relevantes emitidos por diferentes tipos de fuentes existentes en una determinada zona y en un determinado periodo de tiempo. Los contaminantes emitidos se dispersan y transforman en la atmósfera para luego generar diferentes niveles de inmisiones de contaminantes que impactan sobre la salud y bienestar de la población, los ecosistemas y los bienes materiales.

El inventario de emisiones contaminantes permite establecer elementos de conocimiento sobre la contaminación del aire que son esenciales para la planificación de acciones que permitirán la reducción de contaminantes en el aire en

un entorno urbano. Independientemente de los objetivos específicos que puede tener un inventario de emisiones, la utilidad genérica de un inventario de emisiones se puede sintetizar en los siguientes propósitos:

- Identificar las principales fuentes emisoras de contaminantes y cuantificar las emisiones de cada una de las fuentes por tipo de contaminante.
- Servir de insumo para la elaboración de modelos de dispersión de contaminantes para establecer el impacto sobre la calidad del aire de las emisiones.
- Establecer el impacto de planes de acción de reducción de emisiones sobre la calidad del aire.
- Priorizar las acciones de reducción y control de emisiones contaminantes en función de los objetivos de calidad del aire.
- Mejorar la planificación, programación y eficiencia de los sistemas de reducción y control de las emisiones contaminantes

Las técnicas empleadas para la estimación de emisiones de contaminantes son muy variadas y se desarrollan según el tipo de fuente a estudiar. En general se utilizan técnicas diferentes cuando se estudian fuentes de área, fuentes fijas y fuentes móviles. Para cada tipo de fuente se selecciona la técnica o metodología que mejor responda a los requerimientos en cuanto a confiabilidad de los resultados y con un costo aceptable para el estudio.

Entre las metodologías que se utilizan para estimar las emisiones se tienen [15]:

Muestreo en la fuente: se refiere a la medición directa de las emisiones de contaminantes en la chimenea de la fuente emisora. Esta metodología permite obtener valores confiables, a condición que las mediciones se hagan correctamente. Sin embargo, es una opción de elevado costo.

Modelos de emisión: se basan en modelos matemáticos desarrollados para aquellas fuentes en que las emisiones dependen de varios parámetros o factores y no se pueden asociar a un único parámetro de actividad. Se puede utilizar en fuentes complejas como rellenos sanitarios.

Factores de emisión: en muchos casos se puede asociar las emisiones a un indicador que refleja la actividad que desarrolla alguna fuente específica de emisión. En este modelo se asume que las emisiones (E_i) son directamente proporcionales a un indicador específico de la actividad de la fuente (A_j), a través de un factor de emisión (F_{ij}). Partiendo de esta suposición se puede estimar las emisiones de un contaminante (i) a partir de diferentes fuentes (j) mediante la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_{j=1}^n F_{i,j} A_j \left(1 - \frac{EC_j}{100} \right) \quad (\text{ec. 1})$$

En la ecuación 1 el término EC_j se refiere a la efectividad del sistema de control de emisiones, si éste existiera en la fuente analizada; si la fuente en estudio no tiene un sistema de control de emisiones este término es nulo.

La principal dificultad que se tiene en la aplicación de esta metodología es el contar con valores confiables del factor de emisión ($F_{i,j}$) para la fuente o fuentes en estudio. Estos valores se establecen en estudios previos y existen algunas bases de datos que están disponibles en Internet como la AP-42 publicado por la EPA [3]. Los factores de emisión se obtienen en general en base al análisis de procesos específicos en los que se relaciona las emisiones con algún indicador de actividad, o, en base a encuestas o censos en las que se estiman las emisiones a partir de fuentes de área.

La principal desventaja de esta metodología es que no existe ningún medio para verificar que los factores de medición se aplican a las fuentes estudiadas son los adecuados. Si se utiliza un factor de emisión no apropiado para la fuente estudiada, los resultados obtenidos pueden tener serios sesgos; por ello es recomendable un análisis crítico de los factores de emisión utilizados y de los resultados obtenidos. Otra dificultad que se tiene en la aplicación de esta metodología es el obtener información a detalle y precisa del nivel de actividad de las fuentes de emisión.

A pesar de estas debilidades, la estimación de emisiones mediante factores de emisión es muy utilizada por su versatilidad y flexibilidad. Incluso se puede aplicar a fuentes generadoras relativamente complejas como las fuentes móviles, si se hace un análisis más detallado de la actividad de estas fuentes, descomponiendo la misma en varios indicadores de actividad y factores de emisión asociados a los mismos.

Balance de materiales: con algunos contaminantes específicos, es posible aplicar un simple balance de materiales para obtener las emisiones de determinada fuente. Esta opción se puede aplicar por ejemplo a las emisiones de CO_2 por la quema de combustibles fósiles. También se puede emplear esta metodología para estimar factores de emisión de algunos procesos, sobre todo industriales.

Extrapolación: consiste en estimar las emisiones de fuentes puntuales a partir de las emisiones de otras fuentes similares cuya emisión es conocida. También se puede aplicar a la estimación de emisiones de contaminantes que están asociados con actividades domésticas y son proporcionales a la población de una región. En este caso se asume que las emisiones de las fuentes desconocidas es proporcional al de las fuentes conocidas mediante algún indicador de actividad que las relacione.

3 Metodología

En el caso del presente estudio, se utilizaron diferentes metodologías para estimar las emisiones de diferentes tipos de fuente. En concreto se dividieron las fuentes en tres tipos: fuentes fijas, fuentes de área y fuentes móviles. Cada una de estas fuentes fue estudiada por la metodología que mejor se adaptaba a sus características, la disponibilidad de información y los recursos con los que se podía contar. Por otra parte, con el propósito de tener resultados comparables con el inventario de emisiones realizado en la ciudad de La Paz, Bolivia para el año 2007 [17], se utilizó como guía general metodológica el manual elaborado en el marco del Proyecto Aire Limpio para la elaboración de inventarios de emisiones [18].

Los contaminantes primarios considerados para el inventario de emisiones fueron: Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), Material Particulado (PM₁₀), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido de Nitrógeno (N₂O), Metano (CH₄) y Amoníaco (NH₃).

3.1 Emisiones de Fuentes Fijas

Se consideró como fuente fija toda aquella fuente de emisión de contaminantes en la que se puede identificar el punto en el cual vierten contaminantes hacia la atmósfera. En concreto se consideraron como fuentes fijas a todas las industrias y actividades industriales que se encuentran ubicadas en el Municipio del Cercado del Departamento de Cochabamba.

Las emisiones de este tipo de fuentes se las evaluó separándolas en dos tipos de emisiones: aquellas relacionadas con sistemas de combustión estacionario y aquellas relacionadas con procesos de transformación de materiales. En ambos casos se estimaron las emisiones mediante factores de emisión. Se utilizaron los factores de emisión publicados en la AP-42 de la EPA [3]. Para una mejor identificación de los factores de emisión se clasificaron las industrias según el Sistema de Clasificación de Actividades Económicas de Bolivia (CAEB-2005) [7]. Este sistema de clasificación divide este sector económico en siete categorías:

1. Elaboración de productos alimenticios y bebidas
2. Fabricación de productos textiles y prendas de vestir
3. Producción de madera incluyendo muebles
4. Industrias de papel, imprentas, editoriales y productos de papel
5. Industria química, de caucho y de plástico
6. Fabricación de productos minerales no metálicos
7. Fabricación de productos elaborados de metal

La parte más difícil de inventariar las emisiones de fuentes fijas es conseguir la información necesaria de las mismas fuentes. Se empezó haciendo un inventario de las industrias ubicadas en el Municipio del Cercado, para ello se tomó en cuenta a todas las industrias registradas en la Cámara Departamental de Industria. A todas estas industrias se les envió un cuestionario en archivo electrónico vía e-mail para que nos devolvieran con la información necesaria. A pesar de que el formulario contenía requerimientos de información muy sintetizados, pocas empresas respondieron al requerimiento. Esta misma dificultad se tuvo en el caso del inventario realizado en La Paz [17]. Al no contar con toda la información requerida, sólo se pudo hacer una estimación de las emisiones de las industrias por extrapolación, según cada sector. Se utilizó información recabada en el inventario realizado en La Paz para estimar las emisiones de cada sector y hacer las extrapolaciones.

3.2 Fuentes de Área

Las fuentes de área que son relevantes en un inventario de emisiones son variadas y numerosas, por ello se las clasificó según sus características para poder aplicar una metodología adaptada a cada una de ellas en función de: la accesibilidad a la información requerida, el tiempo requerido para su aplicación, los recursos necesarios y la simplicidad del método.

De un análisis previo de los resultados obtenidos en el inventario de La Paz se pudo identificar las principales fuentes de área por la importancia de sus emisiones. En general se consideraron todas las fuentes que se tomaron en cuenta en el inventario elaborado en la ciudad de La Paz [17],[18], utilizando la misma metodología de cálculo y las mismas fuentes de información para los datos de entrada o similares. La principal diferencia con el inventario de La Paz radica en que, en nuestro caso, se incluyeron las emisiones generadas por el Aeropuerto Jorge Wilsterman, utilizando la metodología descrita en el documento de la FAA [5]. Además, las emisiones de material particulado por la suspensión de partículas debido a la rodadura del parque vehicular no fue considerada como fuente de área, sino como asociada a las emisiones vehiculares (fuentes móviles). Para recopilar algunos de los datos requeridos por los diferentes modelos se realizaron encuestas a los generadores de las diferentes fuentes. La metodología de cálculo empleada en todas las fuentes fue por factores de emisión y en algunos casos por extrapolación. El detalle de las fuentes de área consideradas, los datos de entrada del modelo y las fuentes de información utilizadas se tiene en la Tabla 1:

Las emisiones del botadero de residuos sólidos de K'ara K'ara se estimaron utilizando el software especializado LandGEM v 3.02, elaborado por la EPA [4].

Tabla 1: Datos y fuentes de obtención de datos de las diferentes fuentes de área consideradas en el inventario.

Fuente	Datos Requeridos por el Modelo	Fuentes de Información
Fuente Comercial	Cantidad de cada tipo de establecimiento considerado Cantidad de combustible utilizado por tipo Factores de emisión por tipo de combustible y equipo	RUAT Comercial Encuestas AP-42
Fuente Domiciliaria	Cantidad de habitantes en el área y año de estudio Cantidad de combustible utilizado por tipo y habitante Factores de emisión por tipo de combustible y equipo	INE INE AP-42
Terminal de buses	Cantidad de salidas en un año Tiempo en reposo antes de salir Distribución de las clasificaciones vehiculares por año Factores de emisión por tipo de combustible y equipo	Aseguradoras Medición directa RUAT Vehicular AP-42
Aeropuerto	Datos de AD por tipo de avión Datos de los motores del avión: Número de motores Modelo de motor y fabricante Participación de mercado Flujo de combustible Índice de emisión Altura de mezcla Datos de Tiempo en Modo Time In Mode	SABSA FAA, 1991 Air World, 1990 FAA Air World, 1990 FAA FAA SABSA
Uso de Solventes	Población Factores de emisión per cápita	INE DDF 1995
Almacenamiento y distribución de gasolina	Consumo de combustible distribuido Combustible transferido dentro y a través del área del inventario Factores de Emisión	Agencia Nacional de Hidrocarburos Agencia Nacional de Hidrocarburos AP-42, 1995
Distribución de GLP	Uso total de gas LP Datos de Población o de Vivienda Factor de emisión de fugas de gas LP Composición química del gas LP, densidad	Agencia Nacional de Hidrocarburos INE EPA YPFB
Proceso de fermentación de panaderías	Población Factores de emisión per cápita	INE AP-42
Ladrilleras	Tipo de combustible usado en la región Número de hornos de ladrillos en la región Cantidad de ladrillos producidos por día Características del combustible	Entrevista Entrevista Entrevista Agencia Nacional de

	Factores de emisión por tipo de combustible	Hidrocarburos AP-42, 1995
Asaderas de carne asada	Número de asadores Cantidad promedio de carne asada Tipo y cantidad de combustible	RUAT Comercial Encuestas Encuestas
Esterilización de hospitales	Cantidad de Camas por hospital en cada rango Factores de emisión por rango de camas	CEDES, comunicación personal SwissContact
Amoniaco en fuentes domésticas	Población Global Población (menor de 3 años) Proporción de mascotas Número de cigarrillos vendidos Factores de emisión	INE INE EPA Datos Locales Radian
Botadero de K'araK'ara	Cantidad anual de residuos depositados Año de inicio Capacidad del sitio	Estimación Comunicación personal Estimación

3.3 Fuentes Móviles

El método de estimación de emisiones que se utilizó en el presente inventario para las fuentes móviles se basó en la metodología empleada en el inventario de La Paz [18], con algunas variaciones en cuanto a cómo se consiguió la información requerida por el modelo. El modelo se basa en el cálculo de las emisiones por factores de emisión. Para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados se utilizó el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVEM) [8] que es un software de cálculo que se puede adaptar a la información disponible sobre la flota vehicular. Este modelo también considera aspectos topográficos, climáticos y el régimen de conducción específicos de la zona de estudio. La información que se requiere se puede obtener en base a ensayos relativamente sencillos sobre el terreno.

Los datos requeridos por el modelo IVEM para la estimación de emisiones de las fuentes móviles constan de dos partes: una, las características topográficas y climatológicas de la zona de estudio y, la otra, la tecnología y comportamiento de la flota vehicular. La información para cada parte es la siguiente:

- Datos necesarios de características locales: Temperatura, humedad, altura, flujo vehicular, características de los combustibles, pendientes de las calles, etc.
- Datos necesarios de características de la tecnología y actividad del parque vehicular: Tecnología del motor, distancia promedio recorrida por día, velocidad promedio, cantidad de arranques y tiempo de paradas, distribución de evaporación, comportamiento de manejo.

Para establecer las características locales del tráfico vehicular se procedió según lo recomendado por el manual del IVEM [8]. Se identificaron tres zonas características de la ciudad clasificadas según el nivel de actividad económica o nivel de ingreso: zona A, de actividad comercial, zona B, residencial y zona C, periférica. En cada zona se identificaron tres tipos de calles según el tráfico vehicular: autovía, residencial y arterial. Para cada zona y tipo de calle se estableció un circuito sobre el cual se realizaron recorridos en los cuales se registró, mediante un sistema GPS, aceleraciones, velocidades y distancias recorridas; partiendo de esta información se pudo establecer las características de la conducción en la ciudad de Cochabamba.

Las características de la flota vehicular se las estableció a partir de los registros que se tienen en el RUAT [16] para el año 2008 y en el INE [7]. A partir de esta información se agrupó la flota vehicular en 8 tipos de vehículos según sus características de aplicación y tamaño. En la Tabla 2: se muestra el detalle de los tipos de vehículos considerados en el estudio y la cantidad de cada tipo en la ciudad de Cochabamba. Para cada tipo de vehículo se establecieron las características de recorrido (km/día) y ocupación de las calles mediante conteos vehiculares, en varios puntos de la ciudad, durante siete días, en horas pico de circulación y considerando los diferentes tipos de calles identificadas. Las características tecnológicas de cada tipo de vehículo se establecieron mediante inspecciones vehiculares, por personal técnico calificado, en diferentes parqueos y surtidores de combustible de la ciudad; se inspeccionaron un total de 635 vehículos. La distribución de arranques y partidas y el patrón *soak* (tiempo de apagado entre dos arranques del motor) se lo estableció mediante encuestas a los conductores de cada tipo de vehículo; esta información es muy importante para el modelo de cálculo pues las emisiones de un motor que arranca en frío son mucho más elevadas que las emisiones de un motor caliente.

Tabla 2: Cantidad de vehículos por tipo vehicular en el Municipio de Cochabamba, año 2008. Fuente INE [7].

Tipo de vehículo	Total	Porcentaje
Automóvil	46.343	23,6%
Camión	22.890	11,7%
Camioneta	17.780	9,1%
Jeep	7.764	4,0%
Microbús	4.699	2,4%
Minibús	6.074	3,1%
Moto	13.894	7,1%
Vagoneta	76.790	39,1%
Total	196.234	100,0%

Las características meteorológicas de la ciudad de Cochabamba se obtuvieron a partir de datos de la Red MoniCA [11] y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) a requerimiento específico de esta información. Las características de los combustibles utilizados se obtuvieron de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) [1]. Las características topográficas, en concreto las pendientes de las calles se obtuvieron en base a la información de alturas y recorridos obtenidos mediante un GPS.

Con toda la información sobre las características de la flota vehicular y las características de la zona de estudio, el modelo IVEM permite hacer una selección de los factores de emisión más adecuados, introduciendo algunos factores de corrección que sean necesarios. Mediante este modelo se estimó las emisiones de: Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos volátiles (COV), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), Material Particulado (PM₁₀), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido de Nitrógeno (N₂O), Metano (CH₄) y Amoníaco (NH₃).

Las emisiones debido a la rodadura de los vehículos por caminos pavimentados y no pavimentados se estimaron en base a factores de emisión propuestos por la EPA que utiliza, como indicador de actividad las distancias recorridas en km. Para el caso de caminos pavimentados el factor de emisión empleado fue de 0,00013 kg/(VKT)¹ [3]. En el caso de los caminos no pavimentados el modelo de cálculo es más complejo pues las emisiones dependen también de otros factores como la velocidad del viento, la velocidad y peso del vehículo, el número de llantas del vehículo, días de lluvia, etc. La ecuación empleada para estimar el factor de emisión en este caso es la siguiente:

$$FE = K \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{s}{2}\right) \cdot \left(\frac{v}{48}\right) \cdot \left(\frac{P}{2,7}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{r}{4}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{365-p}{365}\right) \cdot 6,1 \quad (\text{ec. 2})$$

Donde: K es una constante relacionada con el tamaño de las partículas (0,36 para PM₁₀), s es la proporción de sedimento en el suelo en %, P es el peso del vehículo en ton, r es el número de ruedas y p es el número días al año con una precipitación mayor a 0,25 mm. El factor emisión calculado según esta fórmula está dado en kg/(VKT). Con estas dos ecuaciones y analizando el tráfico vehicular en vías asfaltadas y no asfaltadas, se pudo estimar las emisiones vehiculares de PM₁₀ por la suspensión de material particulado por la rodadura de vehículos.

¹ Los VKT se refieren a los km recorridos por los vehículos, se mide en unidades de km.

4 Resultados

Para facilitar el análisis de los resultados obtenidos en el inventario de emisiones, se presentarán por separado las emisiones de las fuentes fijas, de fuentes de área, y las emisiones de las fuentes móviles. Como se verá más adelante, las emisiones de las fuentes móviles son mucho más importantes que las emisiones de las fuentes de área y fijas, por ello conviene analizar por separado estas fuentes.

4.1 Emisiones de fuentes fijas y fuentes de área.

De acuerdo a la metodología establecida, se hizo un análisis de la fuentes fijas y fuentes de área por separado. Las fuentes fijas corresponden esencialmente a actividades industriales que se desarrollan en el municipio del cercado. Se contabilizaron un total de 50 industrias dentro del municipio, número relativamente pequeño para la población del municipio, esto se explica porque la mayor parte de las industrias se encuentran instaladas en los municipio vecinos que ofrecen mejores condiciones para la instalación de actividades industriales. En el inventario de fuentes fijas se consideraron por separado las emisiones debidas al proceso de producción y las emisiones debidas a procesos de combustión estacionaria. Lamentablemente no se pudo obtener información detallada de cada industria sobre sus actividades; cantidades producidas y consumos de combustible, por lo que se tuvo que realizar una simple extrapolación en base a la información sobre el tipo de industria y una estimación de la capacidad de producción efectiva. Tal vez sea necesario reforzar la aplicación de la legislación ambiental para que en el futuro se pueda contar con esta información pormenorizada.

Tabla 3: Estimación de las emisiones de fuentes fijas por subsector industrial en la ciudad de Cochabamba, Municipio de Cercado para el año 2008.

Subsector*	Emisiones anuales en Mg/año									
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	NH ₃	COV	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Alimentos	63,067	0,093	0,298	0,522	1,366	0,007	1,948	0,030	0,031	1.546,0
Textiles	0,183	0,181	0,047	1,683	2,384	0,012	63,439	0,057	0,054	2.905,3
Papel	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,013	<0,01	23,420	<0,01	<0,01	12,86
Química	0,019	<0,01	0,046	0,011	0,040	<0,01	25,640	<0,01	<0,01	41,36
No Metálico	1,980	<0,01	0,029	14,40	0,712	<0,01	13,063	<0,01	0,048	754,0
Metálico	<0,01	<0,01	<0,01	0,014	0,034	<0,01	1,380	<0,01	0,011	42,87
Total	65,252	0,286	0,422	16,63	4,548	0,021	128,89	0,099	0,146	5.302,4

*El Subsector de Madera no se incluye en la tabla porque no se registró ninguna empresa en este subsector.

En la Tabla 3: podemos observar que, en cuanto a fuentes fijas se refiere, los subsectores que más emiten contaminantes atmosféricos son el de alimentos y el de

textiles, sobre todo en cuanto a emisiones de material particulado suspendido (PM_{10} y $PM_{2,5}$), SO_2 , NO_x , y NH_3 ; las emisiones de COV se distribuyen esencialmente entre los sectores de textiles, papel y química. Las demás industrias, emiten cantidades relativamente menores de contaminantes. Las emisiones de CO_2 en las industrias se deben esencialmente a la combustión estacionaria en las empresas y las emisiones de COV se deben esencialmente a los procesos de fabricación. El combustible que más se utiliza en las fuentes fijas es el Gas Natural.

Para la estimación de las emisiones de fuentes de área, se identificaron las actividades que generan este tipo de emisiones y se estimaron sus emisiones en función del tipo y la cantidad de combustibles consumidos y las actividades asociadas con la emisión de contaminantes. Los combustibles que se utilizan en este tipo de fuentes son esencialmente gas licuado de petróleo (GLP), gas natural (GN) y biomasa (esencialmente leña y aserrín). En la Tabla 4: se tiene el detalle de los tipos de fuentes de área que se identificaron y las emisiones que generan. Sólo se consideraron las emisiones más relevantes para cada tipo de fuente de área, cuando no se tomó en cuenta algún contaminante porque sus emisiones no son significativas se tiene el símbolo (ND) en la tabla.

De acuerdo a los datos obtenidos para las fuentes de área, las ladrilleras artesanales, ubicadas en la zona sur de la ciudad, es una de las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos. Considerando contaminantes específicos, las ladrilleras son la principal fuente de emisiones de PM_{10} , $PM_{2,5}$, SO_x , NO_x , CO y CO_2 , esto evidencia que es una de las fuentes de emisión de contaminantes sobre la que se tiene que tomar acciones inmediatas para reducir sus emisiones. Otras fuentes que se destacan son el uso de solventes orgánicos en general, que se constituyen en la principal fuente de emisiones de COV y el relleno sanitario de K'ara K'ara que es la principal fuente de emisión de metano (CH_4)

Tabla 4: Emisiones anuales de fuentes de área en el Municipio del Cercado de Cochabamba para el año 2008.

Fuente de Area	Emisiones anuales en Mg/año										
	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO _x	CO	NO _x	NH ₃	COT	COV	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Combustión comercial	1,31	0,63	0,07	7,17	30,53	0,04	0,91	3,64	0,42	1,21	25.126,40
Emisiones Domiciliarias	2,73	0,71	0,15	12,76	74,32	556,23	2.762,52	1.918,48	1,12	4,29	71.569,07
Aeropuerto	ND	ND	1,82	120,31	22,16	ND	25,15	ND	ND	ND	ND
Terminal de Buses	<0,10	<0,10	ND	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	ND	0,32
Esterilización de hospitales	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,58	ND	ND	ND	ND
Distribución de gasolina	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	232,97	ND	ND	ND
Uso de Solventes	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.391,20	2.683,60	ND	ND	ND
Ladrilleras	300,88	6,15	3,90	2.219,65	103,12	0,39	8,91	1.955,7	1,86	4,34	126.129,96
Botadero	ND	ND	ND	5,65	ND	ND	ND	52,38	11.565,41	ND	31.732,78
Fermentación de Levadura	ND	ND	ND	ND	ND	ND	84,47	ND	ND	ND	ND
Distribución de GLP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	767,03	ND	ND	ND
Carga de GNV	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	150,74	ND	ND
Asaderas en restaurantes	194,10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	28,51	ND	ND	ND
Total	499,02	7,49	5,94	2.365,54	230,13	556,66	6.273,74	7.642,31	11.719,55	9,84	254.558,53

4.2 Emisiones de fuentes móviles

Para generar el inventario de emisiones de vehículos automotores utilizando el modelo del IVEM, se necesitaron recopilar una gran variedad de datos indispensables (primarios) que incluyen características de la flota y tráfico vehicular: volúmenes vehiculares horarios, velocidades promedio de conducción, distancias de las vías analizadas, tecnología del parque vehicular; condiciones locales de temperatura, humedad y altitud; características del combustible. Por otro lado se analizaron los datos que se utilizan para afinar el modelo, generalmente reemplazando los datos que el modelo trae por defecto con información local (secundarios) los cuales incluyen patrones de actividad vehicular, distribución entre los tiempos de encendidos del motor (*soak time*), número de arrancadas del motor, factores de emisión, el porcentaje de la flota vehicular que posee aire acondicionado.

Para el estudio realizado en el Municipio de Cochabamba se recopilaron los datos tanto primarios como secundarios. Como factores de emisión, se utilizaron los de la EPA y no se tomó en cuenta la presencia de aire acondicionado, ya que, a pesar de que existen vehículos que cuentan con aire acondicionado, por las condiciones de temperatura en Cochabamba la proporción de vehículos que lo utilizan es mínima.

Se consideraron como fuentes móviles todos los medios de transporte motorizados que circulan por vías terrestres ubicadas dentro del área de estudio. En la Tabla 2: ya se mostró el detalle del número de vehículos que existen en la ciudad de Cochabamba y la distribución de los mismos en función del tipo de vehículo. Además de esta información es importante conocer las características de la flota vehicular en cuanto al combustible que utilizan, la edad de la flota (por sus características tecnológicas) y la intensidad de tráfico vehicular que desarrollan, esta información se detalla en las siguientes tablas y figura.

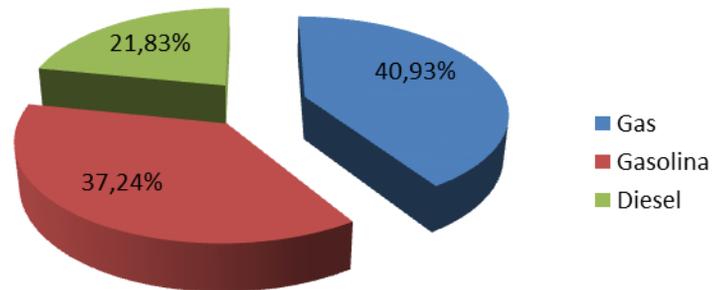


Figura 1: Distribución de la flota vehicular por tipo de combustible que utiliza, datos para el año 2008.

Como podemos observar en la Figura 1; la mayor parte de los vehículos utiliza Gas Natural como combustible con casi un 41%, le siguen los vehículos que utilizan gasolina y los vehículos que utilizan Diesel. El uso de Gas Natural está más difundido entre los vehículos de transporte público debido al ahorro que implica utilizar este combustible. Esto tiene una importante incidencia en las emisiones del parque automotor pues los factores de emisión del gas natural son menores que los factores de emisión de la gasolina y diesel, sobre todo en cuanto a material particulado y óxidos de nitrógeno [3].

Otra característica importante del parque vehicular es la antigüedad de los vehículos, esto debido a que los vehículos más antiguos son en general más contaminantes por la tecnología que utilizan y no cuentan con catalizador. Por ello, se hizo un análisis de la antigüedad de parque vehicular, esta información es utilizada por el IVEM para establecer los factores de emisión de los vehículos.

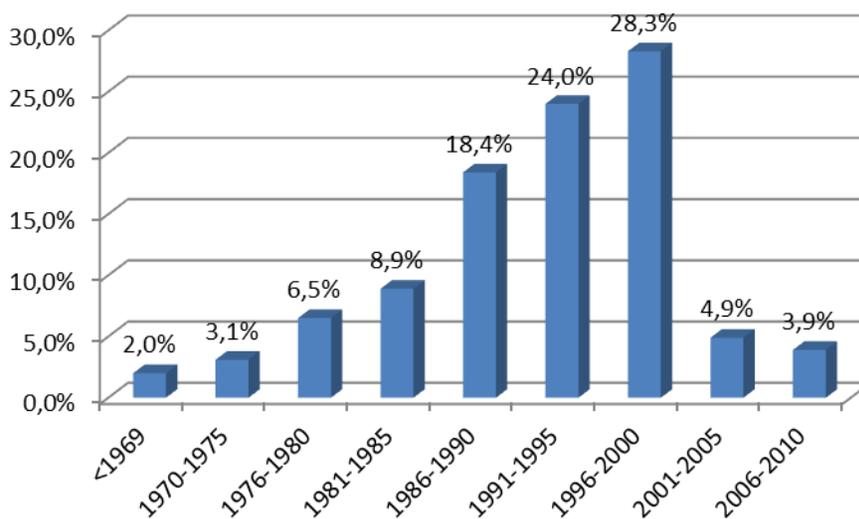


Figura 2: Distribución por edad del parque vehicular de la ciudad de Cochabamba, datos al año 2008.

Al año 2008, la antigüedad promedio de los vehículos que circulan en la ciudad de Cochabamba es de 17,1 años, los vehículos más viejos se encuentran entre los vehículos que emplea el transporte público. Debido a la antigüedad del parque vehicular, la mayor parte de los vehículos no cuenta con un catalizador y tienen motores con carburador.

Otro dato importante para la estimación de las emisiones del parque vehicular son las distancias recorridas por los diferentes tipos de vehículos en diferentes zonas de la ciudad. De acuerdo a la metodología propuesta por el IVEM, es necesario caracterizar diferentes zonas de la ciudad en función del tipo de tráfico y las características de nivel económicos de la zona. En el caso de este estudio, se establecieron tres zonas: la zona A, que comprende la zona norte, de ingresos medio altos, la zona B que es la zona central, esencialmente comercial y, la zona C, que es la zona sur, de ingresos medio bajos. En cada zona se realizaron conteos de vehículos para establecer la presencia e cada tipo de vehículo en cada zona y, este valor, se asocia luego con la distancia promedio que recorre cada tipo de vehículo al día para establecer la intensidad de tráfico vehicular, en términos de km/día, que recorre cada tipo de vehículo en cada zona.

Tabla 5: Distribución de la intensidad del tráfico vehicular por tipo de vehículo en la ciudad de Cochabamba, datos para el año 2008.

Tipo de vehículo	Área A	Área B	Área C	Total	Distribución
km día ⁻¹					
A. Particular	92.998,80	416.207,52	312.051,81	821.258,13	12,6%
A. Público	309.543,12	1.090.396,80	1.247.992,26	2.647.932,18	40,6%
Jeep	19.362,96	90.615,60	106.571,55	216.550,11	3,3%
Vagoneta	54.878,40	254.620,80	210.192,75	519.691,95	8,0%
Camioneta	24.274,80	121.275,36	87.065,73	232.615,89	3,6%
Minibus	72.483,84	352.132,56	546.838,68	971.455,08	14,9%
Micro	22.057,92	102.502,08	131.148,63	255.708,63	3,9%
Motocicletas	82.972,08	393.804,00	189.802,29	666.578,37	10,2%
Camiones	3.767,04	93.204,00	89.526,54	186.497,58	2,9%
Totales	682.338,96	2.914.758,72	2.921.190,24	6.518.287,92	100,0%

Es interesante analizar la intensidad de tráfico que se muestra en la Tabla 5; los vehículos que más km recorren en la calles son los automóviles públicos (taxis y taxi-trufis) con un 40,6%, incluyendo los automóviles particulares se tiene que representan un 53,2% del tráfico vehicular. Le siguen los microbuses y las motocicletas. Es interesante notar que los micros representan sólo un 3,9% del tráfico vehicular, aunque existe la idea de que son los vehículos que más contaminan en la ciudad.

La velocidad promedio de circulación de un vehículo tiene también una gran influencia sobre las emisiones, a menor velocidad promedio, más tiempo reside el vehículo en la vía y mayores son sus emisiones. Este dato fue recabado midiendo la velocidad promedio de varios vehículos en diferentes vía de la ciudad. En la Tabla 6: se da un detalle se estos valores para diferentes tipos de vía. En esta tabla podemos observar grandes diferencias en cuanto a velocidades promedio para vías del mismos tipo, por ejemplo, la Av. Ayacucho tiene una velocidad promedio de 10,0 km h⁻¹ y la Av. Circunvalación, de características similares, tiene una velocidad promedio de 35,2 km h⁻¹, muy superior. Estas diferencias se deben a la saturación del tráfico en la Av. Ayacucho que tiene el efecto negativo de ralentizar todavía más el tráfico y el reducir el rendimiento de esta vía.

Otros factores que influyen sensiblemente sobre las emisiones son las características topográficas de la ciudad, las características de conducción y la calidad del combustible. La topografía de la ciudad se la caracteriza a través de las pendientes que tienen las calles; para ello se hizo un estudio sobre las pendientes de las calles y su distribución a través de mapas topográficos. Las características de conducción son difíciles de cuantificar, en este caso se hizo un estudio de los tiempos de apagado del motor entre dos periodos de operación. Con esta información se puede estimar las emisiones evaporativas. La calidad del combustible se la caracteriza en función al contenido de Azufre, Plomo, Benceno y compuestos oxigenados. Estas características de la gasolina y Diesel utilizado en Cochabamba se detallan en la Tabla 7:.

Con toda esta información se hizo la estimación de las emisiones contaminantes del parque vehicular utilizando el modelo del IVEM. Sin embargo, este modelo no toma en cuenta las emisiones de material particulado debido a la rodadura de los vehículos en calles asfaltadas y no asfaltadas, sólo considera las emisiones de material particulado debido a la quema del combustible. Para estimar las emisiones por la rodadura de los vehículos se utilizó la ecuación 2 mencionada más arriba, luego estas emisiones de PM_{10} se sumaron a las emisiones de PM_{10} estimadas a partir del IVEM. En la Tabla 8: se tienen las emisiones de PM_{10} por la rodadura de vehículos.

Tabla 6: Velocidad promedio para diferentes tipos de vías en la ciudad de Cochabamba

Calle	Tipo de vía	Velocidad Promedio
		km h ⁻¹
Av. Circunvalación	Arterial	35,18
Av. 23 de Marzo	Autovía	47,67
Av. Pando	Residencial	29,77
Av. Costanera	Residencial	54,94
Av. B. Galindo	Autovía	21,80
6 de Agosto	Arterial	24,34
Ayacucho	Autovía	10,04
Oquendo	Arterial	14,20
Baptista	Residencial	6,85

Tabla 7: Características de la gasolina y el Diesel utilizados en Cochabamba. Fuente [1][20].

	Calidad general	Nivel de Azufre	Contenido de Plomo	Contenido de Benceno	Contenido de Oxigenados
Gasolina	Moderada/Premezcla (Valor por defecto)	Súper Bajo (15 ppm)	Ninguno (por defecto)	Ultra Bajo (0,2%)	0% (por defecto)
	Moderada/Sin Premezcla	Bajo (50 ppm)	Bajo (0,07 gramos de plomo/litro combustible)	Bajo (0,5%)	1%
	Limpia/ Premezcla	Moderado (300 ppm) (po defecto)	Alto (0,2 gramos de plomo/litro combustible)	Moderado (1,5%) (por defecto)	2%
	Limpia/ Sin Premezcla	Alto (600 ppm)		Alto (3,0%)	2,50%
Diesel	Limpio	Súper Bajo (15 ppm)			
	Moderado (por defecto)	Bajo (50 ppm)			
	Biodiesel	Moderado (500 ppm) (por defecto)			
	Emulsión de agua	Alto (5000 ppm)			

Tabla 8: Emisiones de PM₁₀ debido a la rodadura de los vehículos.

Tipo de vehículo	Emisión de PM ₁₀
	Mg año ⁻¹
A. Público	2.443,68
A. Particular	750,94
Jeep	194,44
Vagoneta	473,93
Minibus	840,49
Micro	225,07
Camioneta	216,06
Motocicleta	581,77

364 · Pareja A., Hinojosa M., Luján M.: Inventario de Emisiones Atmosféricas...

Camión	145,86
Total	5.872,25

Tabla 9: Emisiones de fuentes móviles para el año 2008 en la ciudad de Cochabamba.

Tipo de vehículo	Emisiones									
	CO	COT	COV	NO _x	SO _x	PM ₁₀	NH ₃	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
	Mg año ⁻¹									
A. Público	35.536,06	509,56	441,31	1.042,23	0,67	2.610,54	47,60	228.187,17	7,80	10.897,13
A. Particular	4.592,57	350,04	71,94	192,60	0,31	801,86	12,01	49.856,39	0,56	834,49
Jeep	1.882,38	193,56	19,80	66,80	0,07	207,55	2,89	14.819,51	0,33	226,29
Vagoneta	2.059,45	155,41	29,89	160,67	0,16	505,74	7,60	38.019,89	1,60	248,26
Minibus	23.036,72	202,51	232,87	461,12	0,29	901,25	13,20	95.961,26	1,53	7.688,23
Micro	7.326,59	80,75	75,56	211,41	0,11	248,68	3,37	38.240,90	0,29	2.982,21
Camioneta	2.319,82	234,53	25,47	85,21	0,08	230,71	3,00	16.908,69	0,49	305,31
Motocicleta	201,49	74,39	76,18	14,86	0,04	623,51	1,51	9.314,46	0,00	24,14
Camión	781,98	195,06	5,25	412,01	0,10	166,58	0,69	32.440,85	0,24	77,42
Total	77.737,06	1.995,80	978,28	2.646,90	1,82	6.296,40	91,87	523.749,11	12,84	23.283,50

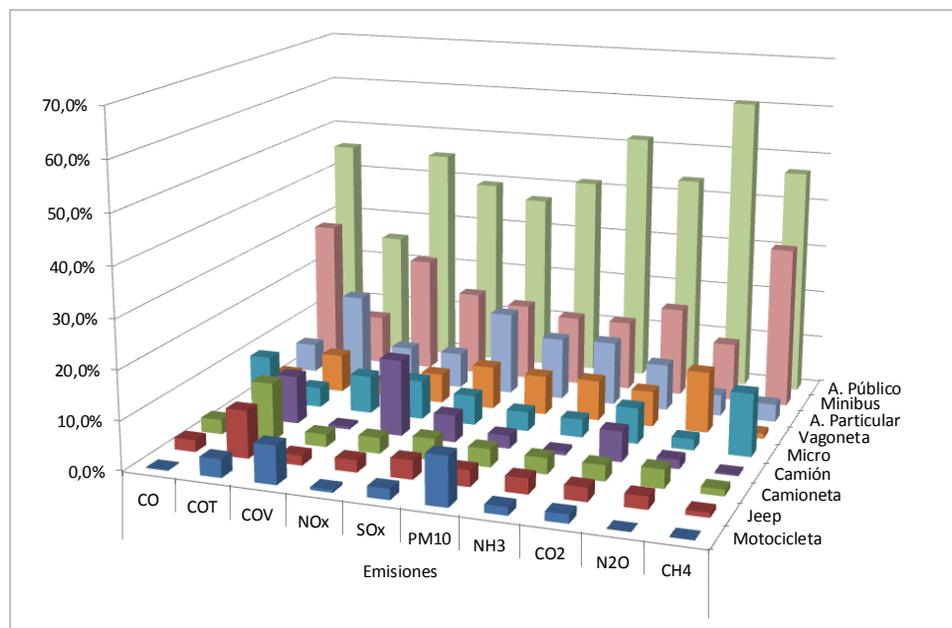


Figura 3: Distribución de las emisiones vehiculares por tipo contaminante y por clase vehicular.

De acuerdo a las estimaciones realizadas, las emisiones de PM_{10} a partir de la rodadura de vehículos en las calles no asfaltadas representan un 94,7% del total de emisiones de esta fuente de PM_{10} . Como era de esperarse, los automóviles públicos representan la mayor proporción de emisiones de PM_{10} por esta causa. Comparando con el total de emisiones de PM_{10} que se muestra en la Tabla 10; observamos que las emisiones por la rodadura de vehículos representa un 93,3% del total de emisiones. Esto muestra claramente la importancia de ampliar el asfaltado de calles para reducir las emisiones de PM_{10} .

En la Figura 3: podemos apreciar claramente que las clases de vehículo que más contaminación emiten son, por orden de importancia, los automóviles públicos y los minibuses; en términos de proporción de emisiones, considerando todos los contaminantes, representan un 62,6% de las emisiones vehiculares. Les siguen en importancia los automóviles particulares, los micros y vagonetas, con 22,9% de las emisiones, y el restante 15% se debe a las demás clases vehiculares. Estos datos muestran que sería muy importante tomar acciones concretas para reducir las emisiones de los automóviles públicos y los minibuses, una buena medida sería reemplazar estos vehículos de transporte público por vehículos de mayor capacidad. Esto reduciría la ocupación de las calles, facilitaría el tráfico vehicular y, por ende, reduciría las emisiones.

4.3 Emisiones totales por tipo de fuente

Es importante analizar de manera global las emisiones de los tres tipos de fuente considerados en este inventario de emisiones, en la Tabla 10: se muestran los datos integrados de todas las fuentes por tipo de contaminante emitido. En la Figura 4: podemos apreciar la distribución de las emisiones por tipo de fuente y tipo de contaminante.

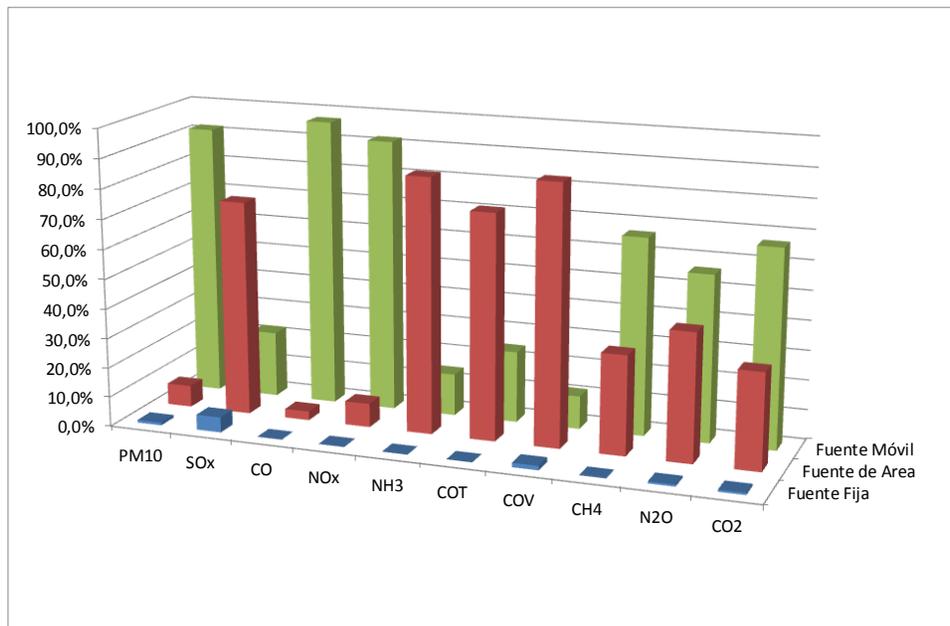


Figura 4: Distribución de las emisiones por tipo de contaminante y tipo de fuente en la ciudad de Cochabamba, año 2008.

Los resultados globales muestran claramente que la principal fuente de contaminantes primarios atmosféricos (PM_{10} , SO_x , CO y NO_x) en la ciudad de Cochabamba son las fuentes móviles que emiten, en promedio, un 76% de estos contaminantes. En el caso específico del PM_{10} , las fuentes móviles son causantes de un 91,8% de estas emisiones y un 85,6% de estas emisiones se debe específicamente a la rodadura de los vehículos sobre calles asfaltadas y no asfaltadas. Por otra parte, las fuentes móviles representan un 91,9% de las emisiones de NO_x , otro de los contaminantes más importantes en esta ciudad. Las fuentes de área son las principales fuente de emisión de NH_3 , COT y COV .

Tabla 10: Emisiones anuales por tipo de fuente y tipo de contaminante en la ciudad de Cochabamba el año 2008.

Tipo de fuente	Emisiones anuales en Mg año ⁻¹										
	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO _x	CO	NO _x	NH ₃	COT	COV	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Fuentes Fijas	65,25	0,29	0,42	16,63	4,55	0,02	ND	128,89	0,10	0,15	5.302,40
Fuentes de Área	499,02	7,49	5,94	2.365,54	230,13	556,66	6.273,74	7.642,31	11.719,55	9,84	254.558,53
Fuentes Móviles	6.296,40	ND	1,82	77.737,06	2.646,90	91,87	1.995,80	978,28	23.283,50	12,84	523.749,11
Totales	6.860,67	7,78	8,18	80.119,23	2.881,58	648,55	8.269,54	8.749,48	35.003,15	22,83	783.610,04

4.4 Emisiones de gases a efecto invernadero (GEI)

Otro aspecto importante a evaluar son las emisiones de gases a efecto invernadero que se emite en nuestra ciudad. A partir de las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄, podemos hacer una estimación de las emisiones equivalente de CO₂ emitidas en la ciudad. Para ello se utilizan los valores de potencial de calentamiento global (GWP, *Global Warming Potential*) de estos gases en relación al CO₂. Estos valores son publicados por el IPCC y dependen de las características de absorción del gas en el infrarrojo y de su decaimiento en la atmósfera. Para un horizonte de 100 años, el GWP del CH₄ en relación al CO₂ es de 25 y para el N₂O es de 298 [6], con estos valores se estimaron las emisiones de GEI en Mg eq. de CO₂, el detalle se tiene en la Tabla 11:

Tabla 11: Emisiones de gases a efecto invernadero (GEI) en la ciudad de Cochabamba año 2008

Tipo de fuente	Emisiones anuales en Mg eq. de CO ₂ /año				Porcentaje
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	Total	
Fuente Fija	2,5	43,5	5.302,4	5.348,4	0,3%
Fuente de Área	292.988,8	2.932,3	254.558,5	550.479,6	33,1%
Fuente Móvil	582.087,5	3.826,3	523.749,1	1.109.662,9	66,6%
Totales	875.078,7	6.802,1	783.610,0	1.665.490,9	100,0%
Porcentaje	52,5%	0,4%	47,0%	100,0%	

Estos resultados muestran que la ciudad de Cochabamba contribuye con unas 1,67 millones de toneladas equivalentes de CO₂ al año, a partir de las emisiones de GEI de 2004 (91,71 millones de teq. CO₂ año⁻¹) y un crecimiento anual de un 13,2% [19], se puede estimar que para el año 2008 las emisiones de GEI en Bolivia fueron de 155,5 millones de teq. CO₂ año⁻¹; por tanto las emisiones de la ciudad de Cochabamba representaron el 1,1% del total de emisiones de GEI y una emisión per cápita de 2,72 teq. de CO₂ año⁻¹.

Las fuentes móviles representan dos tercios de las emisiones de GEI y las fuentes de área prácticamente un tercio; las fuentes fijas son poco significativas. En cuanto a las emisiones de GEI por tipo de gas, las emisiones de CH₄ representan más de la mitad de las emisiones de GEI con un 52,5%. Cabe resaltar que la principal fuente de emisiones de metano entre las fuentes de área son las emisiones del relleno sanitario de K'ara K'ara, esto implica que se podría reducir significativamente las emisiones de GEI de esta fuente si se captan los gases del relleno y se los utiliza como combustible.

5 Análisis de la consistencia de los resultados

El presente inventario de emisiones atmosféricas es el primero que se realiza en la ciudad de Cochabamba. Si bien se tuvo algunas limitaciones en cuanto a conseguir toda la información que requieren los modelos de emisión y las metodologías utilizadas, sobre todo para las fuentes fijas, los resultados que se han obtenido son coherentes y reflejan en buena medida cuáles son las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Cochabamba.

Una manera de analizar la consistencia de los resultados obtenidos en el inventario es estimar las emisiones por unidad de superficie de los contaminantes considerados, a partir del inventario de emisiones, y compararlos con una estimación de las emisiones por unidad de superficie estimadas a partir de un modelo de caja fija [2]. En el modelo de caja fija es posible estimar las emisiones a partir de los valores medidos por la red de Monitoreo de la Calidad del Aire [11] del nivel de inmisiones de algunos contaminantes primarios. La ecuación para la estimación de las emisiones por unidad de área es la siguiente [2]:

$$q = (c - b) \frac{uH}{L} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde, q es la emisión por unidad de área; c , la concentración promedio anual del contaminante; b , la contaminación de fondo; u , la velocidad promedio anual del viento; H , la altura de mezcla y L , el largo de la zona considerada. Para el caso de Cochabamba se tomó una altura de mezcla de 200 m, la velocidad promedio del viento de 3,2 m y el largo de la ciudad de 9,5 km en la dirección predominante del viento (de sur a norte). En la siguiente tabla se tienen los resultados para algunos contaminantes considerados en el inventario.

Tabla 12: Emisiones por unidad de área calculadas a partir del inventario de emisiones y a partir de un modelo de caja fija para la ciudad de Cochabamba año 2008.

	Estimación de emisiones en $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$			
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO ₂
q (inventario)	3,412	0,0041	39,84	1,433
q (monitoreo)	4,042	0,288	53,88	1,688
Relación	84,4%	1,4%	73,9%	84,9%

Como podemos observar en la Tabla 12;, las emisiones obtenidas en el inventario de emisiones llegan a explicar un 84,4% de las emisiones de PM₁₀, un 84,9% de las emisiones de NO₂ y un 73,9% de las emisiones de CO. Esto es consistente con el hecho de que, en general, en un inventario de emisiones es difícil

considerar e incluir en el inventario todas las fuentes de emisión de contaminantes. En nuestro caso podríamos decir que en este inventario se han considerado hasta un 85% de las fuentes de emisión de contaminantes. En el caso de las emisiones de SO₂, el inventario sólo explica el 1,4% de las emisiones estimadas según el inventario, esta situación puede explicarse debido a que existen algunas fuentes de emisión de SO₂ como las yeseras y otras industrias mineras, que no se consideraron en el inventario por falta de información.

6 Conclusiones

El inventario de emisiones se realizó considerando el año 2008 como año base para el análisis. Esto debido a que la información estadística que se requiere sufre retrasos en su publicación, se buscó tener toda la información necesaria para la elaboración del inventario.

En lo que se refiere a la emisión de contaminantes atmosféricos, los resultados muestran que la principal fuente de emisiones contaminantes es el parque automotor, las fuentes móviles; seguidas por las fuentes de área y las fuentes puntuales. Los dos contaminantes primarios más importantes por su nivel de concentración en la atmósfera de la ciudad de Cochabamba, en la medida en que éstos superan los límites permitidos en la legislación boliviana, son el PM₁₀ y el NO₂; las fuentes móviles son la causa de un 91,8% y un 91,9% de las emisiones de estos contaminantes, respectivamente. De manera general se puede afirmar que un 76% de contaminantes primarios son emitidos por las fuentes móviles. Las fuentes fijas y de área son causantes de un 24% de las emisiones contaminantes. Cabe resaltar que la simple rodadura de los vehículos por calles no asfaltadas y asfaltadas es la causante de un 86% de las emisiones de PM₁₀; esto muestra la urgente necesidad de mejorar el estado y limpieza de las calles de la ciudad para reducir las emisiones de PM₁₀.

Entre los diferentes tipos de vehículos considerados en el inventario es de destacar que los vehículos que más contribuyen a las emisiones vehiculares son los automóviles públicos (taxis y taxi-trufis) y los minibuses. Estas dos clases vehiculares con causantes de un 63% de las emisiones contaminantes, el 37% restante se debe al resto de los vehículos. Además, los automóviles públicos y los minibuses son los vehículos que más ocupan las calles. Estos resultados muestran que es urgente tomar acciones para reducir las emisiones de estas dos clases de vehículos. Una buena opción sería implementar sistemas de transporte público con vehículos de gran capacidad, 80 a 120 pasajeros, que permitan reducir fuertemente la flota de taxis, taxi-trufis y minibuses en la ciudad. Por otra parte las emisiones vehiculares están afectadas por elevados factores de emisión debido a la antigüedad de los vehículos que en promedio tienen más de 17,1 años. Es necesario

implementar una política de modernización del parque vehicular y actualización y/o retiro de los vehículos más viejos y contaminantes. También es necesario implementar un sistema inspección técnica y de control de emisiones vehiculares moderno y eficaz.

Entre las fuentes de área destacan como principales fuentes de emisión de PM₁₀, las ladrilleras y las asaderas; las principales fuentes área de NO_x son también las ladrilleras y las fuentes domiciliarias. El relleno sanitario de K'ara K'ara se distingue por generar el 33% del total de emisiones de CH₄.

Las emisiones de fuentes fijas no pudieron caracterizarse de manera exhaustiva debido a la falta de información y de colaboración de las empresas instaladas en el municipio del Cercado. En una próxima versión del inventario será necesario buscar los mecanismos adecuados para asegurar que la información necesaria sea puesta a disposición de los responsables del estudio. Sin embargo se hizo un esfuerzo por estimar las emisiones de este tipo de fuentes y, en general son poco relevantes en relación a las fuentes móviles y fuentes de área pues representan menos del 1% de las emisiones.

Las emisiones de GEI de todas las fuentes evaluadas se elevan a 1,67 millones de teq. CO₂ año⁻¹. Las emisiones de metano representan el 52,5% de estas emisiones, seguidas por las de CO₂ con un 47,0%. En cuanto a tipo de fuente, las fuentes móviles generan un 66,6% de estas emisiones y las fuentes de área el 33,1%, las fuentes fijas representan apenas un 0,3% de las emisiones de GEI.

El inventario de emisiones elaborado en este estudio contiene información que será de gran utilidad para plantear medidas de gestión de la calidad del aire y medidas de reducción de las emisiones de gases a efecto invernadero. Por otra parte, las metodologías utilizadas para la elaboración del inventario se han revelado ser muy apropiadas para ser aplicadas en las condiciones de la ciudad de Cochabamba y sería recomendable utilizarla en futuros inventarios de emisiones, con las mejoras pertinentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por la Fundación Suiza Cooperación para el Desarrollo Técnico (Swisscontact), en el marco del Proyecto Aire Limpio, Bolivia.

Referencias

- [1] ANH, Agencia Nacional de Hidrocarburos, (en, <http://www.anh.gob.bo>, acceso enero 2011).

-
- [2] De Nevers, Noel. Air pollution control engineering. Singapore : Mc Graw Hill (2000).
- [3] EPA, Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors (<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>, acceso septiembre 2010).
- [4] EPA, LandGEM v 3.02 User's Guide (en <http://www.epa.gov/ttnca1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>, acceso junio 2010).
- [5] FAA, Appendix D: Aircraft Emission Methodology (en, http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/airquality_handbook/media/App_D.pdf, acceso julio 2010).
- [6] Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [7] INE Instituto Nacional de Estadística. Estado Plurinacional de Bolivia. (<http://www.ine.gob.bo/indice/visualizador.aspx?ah=PC20403.HTM>, acceso, junio 2010)
- [8] ISSRC (Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales) Manual de usuario del Modelo IVEM Versión 2.0. Estados Unidos.(2008).
- [9] Gobierno Municipal del Cercado. Informe Municipal de la Calidad del Aire. Cochabamba, Bolivia, (2010).
- [10] Ley N° 1333. Ley del Medio Ambiente. Gaceta Oficial de Bolivia, La Paz, Bolivia, 15 de Junio de 1992.
- [11] LUJAN, Marcos. Informe Anual de la Calidad del Aire 2009, Cochabamba Bolivia. (2010).
- [12] LUJAN, Marcos. Evaluación Preliminar del Impacto de la Contaminación Atmosférica en la Salud de la Población de la Ciudad de Cochabamba ACTA NOVA. 4(1): 105-118, (2008).
- [13] OMS, Calidad del Aire y Salud, Nota descriptiva N° 313, Septiembre de 2011, (en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>, acceso, junio 2010).

- [14] OMS, Guías de Calidad del Aire, Actualización Mundial 2005 (en http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/ , acceso, junio 2010).
- [15] Radian International LLC, Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Fundamentos de Inventarios de Emisiones. Vol 2, (1997).
- [16] RUAT, Registro Único para la Actividad Tributaria Municipal, (en, <http://www.ruat.gob.bo/>, acceso julio 2010).
- [17] SPIESS HERBTS, Nora. Inventario de Emisiones del Municipio de La Paz, Bolivia 2007. Ed. Proyecto Aire Limpio, COSUDE. (2008?).
- [18] SPIESS HERBTS, Nora. Manual para la Elaboración de un Inventario de Emisiones en Bolivia. Ed. Proyecto Aire Limpio, COSUDE. (2008?).
- [19] United Nations. Environmental Indicators (en http://unstats.un.org/unsd/environment/air_greenhouse_emissions.htm, acceso, enero 2012)
- [20] YPFB, Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, (en, <http://www.ypfb.gob.bo/>, acceso agosto 2010).