

3. METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES

Para la integración de este inventario de emisiones, se aplicaron las metodologías de estimación de emisiones propuestas en los manuales del Programa de Inventario de Emisiones para México, publicados por el Instituto Nacional de Ecología¹.

En todos los casos se utilizaron los manuales de Fundamentos del Programa de Inventario de Emisiones para México y Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones, en conjunto con los manuales de Fuentes Puntuales, Fuentes de Área y Vehículos Automotores.

Las técnicas de estimación utilizadas para estimar las emisiones de este inventario fueron:

Muestreo en la Fuente: Son mediciones directas de la concentración de contaminantes en un volumen conocido de gas y de la tasa de flujo del gas en la chimenea. Son utilizadas con mayor frecuencia para fuentes de emisiones de combustión.

Modelos de Emisión (mecanísticos): Son ecuaciones desarrolladas cuando las emisiones no se relacionan directamente con un solo parámetro. Se pueden usar computadoras en el caso de que se tenga un gran número de cálculos complejos. En este inventario se utilizaron: el programa TANKS 3.1, modelo utilizado para estimar las emisiones de HC en tanques de almacenamiento; PCBEIS 2.2, para estimar las emisiones de HC y NOx provenientes de la vegetación y del suelo; el modelo MOBILE5a.3MCMA, para estimar las emisiones de HC, NOx y CO en los vehículos. Todos estos modelos fueron desarrollados por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (USEPA) y adaptados para utilizarse en México.

Encuestas: Son cuestionarios diseñados para recopilar datos de actividad. En algunos casos se utilizó la encuesta para recopilar datos de fuentes de área con el fin de ponderar algunos factores de emisión de la EPA.

Factores de Emisión: Son relaciones entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y un dato de actividad. Los datos de actividad incluyen: niveles de producción, consumo de materia prima, consumo de combustibles, población, kilómetros recorridos, etc. La fuente de factores de emisión utilizada en este inventario fue el AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors (U.S. EPA, 1995a); y los factores de emisión obtenidos experimentalmente por el Instituto Mexicano de Petróleos (IMP) para vehículos automotores en circulación en la ZMVM.

Balance de Materiales: Parte del principio de que el material que entra, debe ser igual al que se utiliza en el proceso, más el que se emite. El método de balance de materiales, es adecuado para estimar emisiones asociadas con la evaporación de solventes y emisiones de compuestos que contienen azufre.

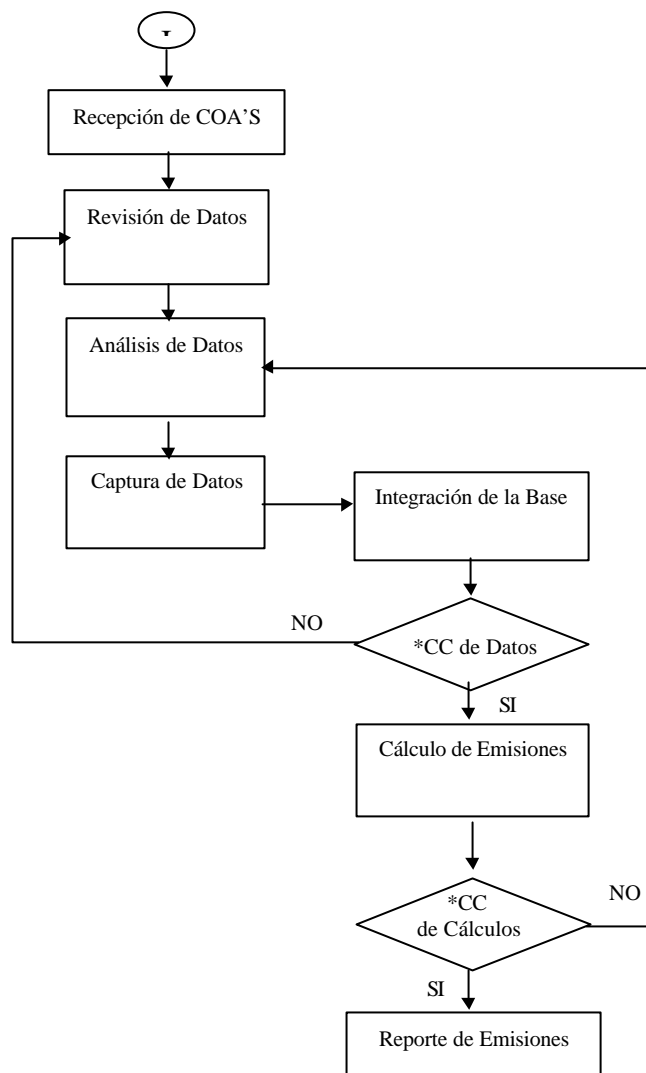
El inventario de emisiones de la ZMVM 1998, se desarrolló con la misma metodología para cada una de las entidades que intervienen, se emplearon los datos confiables que se tenían disponibles en ese momento y se aplicaron en la medida de lo posible las recomendaciones hechas en el estudio "Análisis y Diagnóstico del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México", donde los investigadores principales fueron los Doctores Mario J. Molina y Luisa T. Molina.

¹ http://www.ine.gob.mx/dggia/cal_aire/espanol/invtemi.html

3.1 FUENTES PUNTUALES

Para la actualización del inventario de emisiones del sector industrial de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se utilizó la información que proporcionaron los establecimientos industriales en la Cédula de Operación Anual (COA)² a la autoridad correspondiente (Secretaría de Ecología del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal e Instituto Nacional de Ecología de la Federación) entre los años 1996 y 1999. Las COAs entregadas en el año 1999, nos proporcionaron información de las actividades realizadas en el año 1998 por las industrias. La información de la COA es analizada y procesada individualmente, para integrarse en una base de datos de acuerdo al esquema que se presenta en la figura 3.1.1, mismo que se describe posteriormente.

Figura 3.1.1. Proceso de elaboración del inventario de emisiones



*CC: Es el control de calidad de la información.

² Los propietarios de establecimientos industriales, mercantiles y de servicios que emitan contaminantes a la atmósfera deberán de reportar cada año el comportamiento de su actividad del año inmediato anterior, mediante el formato de Cédula de Operación Anual o Inventario de Emisiones.

Descripción del proceso de elaboración del inventario de emisiones

Las COAs, se recibieron en las áreas de recepción correspondientes de cada una de las dependencias. Un primer control de calidad de la información entregada por el industrial se da en la recepción, donde se revisa que la COA contenga los datos y que sean acordes con lo que se solicita en el formato.

En esta etapa se realiza un análisis detallado de la información proporcionada en la Cédula de Operación para su validación, de modo que esté completa para su codificación y captura en el sistema para proceder a la estimación de las emisiones, o en su defecto, se solicita al establecimiento industrial la complementación con los anexos correspondientes. Enseguida, la información de las COAs se introduce en un sistema de captura con el fin de sistematizar la información y poder disponer de ella para realizar diferentes tipos de análisis. En el caso del Instituto Nacional de Ecología antes de este paso la información es codificada y después ingresada a un sistema de captura. Una vez validada la información y realizado el cálculo de emisiones, se procede a la codificación en los formatos correspondientes; para realizar dicha codificación se cuenta con catálogos que contienen las claves o códigos de materias primas, productos, combustibles, procesos, equipos de proceso, tecnología de control, etc.

Una vez realizadas las actividades anteriores, se integra la información en una base de datos que permite realizar el análisis de los mismos.

Para el control de calidad de la información recibida, se realizan revisiones a todos los registros de la base de datos, así como la congruencia entre las cifras de consumos reportados de materiales y sus unidades, se ordenan campos de información representativos como son los giros industriales, ubicación geográfica, materias primas, combustibles, claves de procesos, métodos de control, emisiones con control, emisiones sin control, emisiones totales, etc.

El control de calidad de los cálculos, consiste en revisar los resultados contra las cédulas de operación para determinar la congruencia de datos, emisiones contra consumo y tipos de combustibles, equipos de control, emisiones de procesos, capacidad de equipos de combustión. Una vez validada la información se realizó el análisis de la misma y el reporte correspondiente para el usuario.

Técnicas de estimación de emisiones

La metodología empleada en la estimación de emisiones para este sector se realizó con base en las técnicas recomendadas para fuentes puntuales del *Programa de Inventario de Emisiones para México*, de las cuales se emplearon: el muestreo en fuente, factores de emisión y balance de materiales, ver tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1. Técnicas de estimación de emisiones por giro industrial

Giro	Contaminantes				
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	HC
Generación de energía eléctrica	ME, FE	ME	ME	ME	ME, FE
Petroquímica	FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE
Industria química	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE, BM
Mineral metálica	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	FE
Mineral no metálica	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	FE
Productos vegetales y animales	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	FE
Madera y derivados	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	FE
Industria del vestido	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE
Industria de consumo alimenticio	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	FE
Productos de consumo varios	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	FE
Productos de impresión	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE, BM
Productos metálicos	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE, BM
Productos de vida media	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE, BM
Productos de vida larga	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE, BM
Otros	ME, FE	ME, FE	ME, FE	ME, FE	MO, FE

Nota: FE.- Factor de Emisión, ME.- Medición, BM.- Balance de Materiales, MO.- Modelos

3.2 FUENTES MÓVILES

Para la elaboración del inventario de emisiones de fuentes móviles se identificaron las variables que influyen en el cálculo y la interacción entre las fuentes de información, como se muestra en el diagrama 3.2.1. Cada una de las dependencias involucradas colaboraron para proporcionar la información necesaria de acuerdo a la tabla 3.2.1.

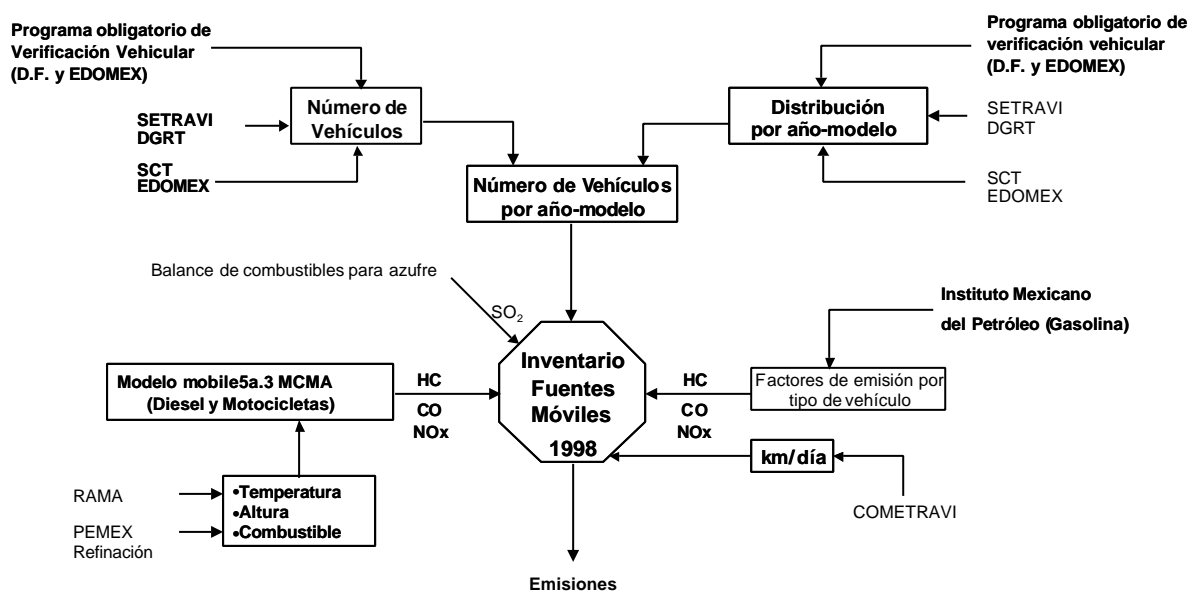
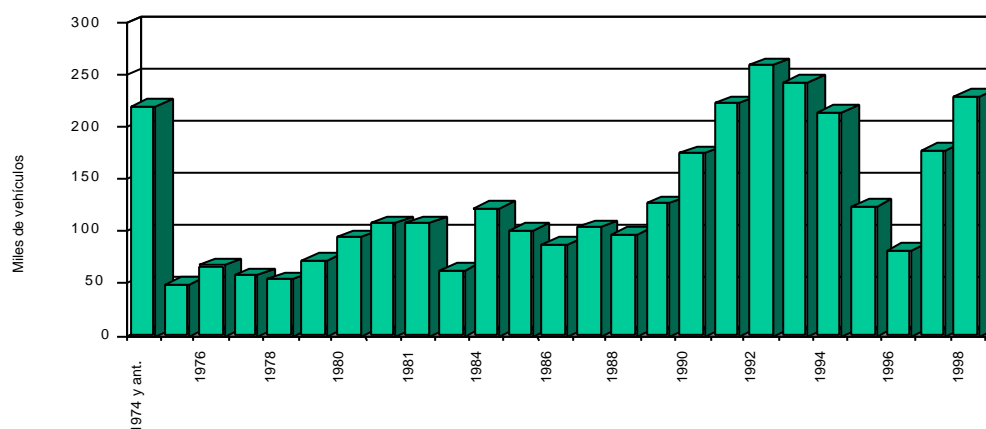
Diagrama 3.2.1. Interacción de las fuentes de información de las variables que intervienen en el cálculo de las emisiones de fuentes móviles


Tabla 3.2.1. Fuentes de información de las variables que influyen en la emisión

Variable	Fuente/Dependencia
Parque vehicular.	SETRAVI-DGRT, SCT-DGTT y base de datos del programa de verificación vehicular del Estado de México y Distrito Federal
Consumo de combustibles y propiedades fisicoquímicas.	Petróleos Mexicanos (PEMEX)
Factores de emisión para HC, NOx y CO de vehículos a gasolina.	Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
Factores de emisión para HC, NOx y CO de vehículos a diesel y motocicletas.	MOBILE 5a. 3MCMA
Factores de emisión para PM ₁₀ .	Estudio Measurement of Exhaust Particulate Matter Emissions from In-use Light Duty Motor Vehicle in Denver Colorado Area
Factores de emisión a gas LP ³ .	Greenhouse Gas Inventory Reference Manual Volumen 3
Kilómetros recorridos.	Estudio Integral de Transporte y Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 1997
Temperatura	Red Automática de Monitoreo Atmosférico

El primer paso para calcular el inventario de emisiones de fuentes móviles fue el análisis de la información disponible referente al número de vehículos existentes en la ZMVM, mismos que se distribuyeron tomando en cuenta el tipo de combustible, el peso del vehículo y la actividad o uso del mismo, de acuerdo a la siguiente clasificación: autos particulares, taxis, combis, microbuses, pick up's, camiones de carga a gasolina, vehículos a diesel con un peso bruto menor a 3 toneladas, tractocamiones a diesel, autobuses a diesel, vehículos a diesel con un peso bruto mayor o igual a 3 toneladas, camiones de carga a gas licuado de petróleo (LP) y motocicletas. Además de esta clasificación, fue necesario distribuir el total de vehículos existentes por año modelo (ver gráfica 3.2.1).

Gráfica 3.2.1. Distribución vehicular por año-modelo



³ Nota: Para los camiones a gas LP se utilizaron los factores de emisión para los US Light and Heavy Duty LPG vehicles del volumen 3 del manual de referencia para inventario de gases de efecto invernadero de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, 1995.

La estimación de las emisiones de fuentes móviles, parte de la ecuación básica para la estimación de las emisiones de los vehículos automotores y requiere de datos de actividad vehicular y un factor de emisión asociado a dicha actividad.

$$E_i = (FE_i) (KRV) \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

E_i = Emisiones totales del contaminante i, [g/año]

KRV = Kilómetros recorridos por vehículo, [km/año]

FE_i = Factor de emisión del contaminante i, [g/km]

Para los vehículos automotores, los datos de actividad se refieren a los kilómetros recorridos por vehículo (KRV), mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramo de contaminante por KRV. Los KRV representan la distancia total recorrida por un vehículo en un periodo de tiempo determinado.

La ecuación básica de estimación de emisiones presentada anteriormente se aplicó en la valoración de NO_x, HC, CO y PM₁₀. El cálculo de las emisiones de SO₂ se desarrolló mediante la aplicación de un balance de combustible, suponiendo que se emite la totalidad del azufre contenido en el combustible como bióxido de azufre.

La ecuación 2 describe el balance de combustible para SO₂:

$$ESO_{2,j} = (CC_j) (\rho C_j) (S_j) 2 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

$ESO_{2,j}$ = Emisiones de SO₂ del combustible j (j= gasolina, diesel y gas LP)

CC_j = Consumo total del combustible j

ρC_j = Densidad del combustible j

S_j = Contenido de azufre (porcentaje fracción de masa) del combustible j

2 = Factor de conversión de masa de azufre a masa de SO_x (como SO₂).

Para el caso del cálculo de las emisiones de partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀), se utilizaron los factores de emisión reportados en el estudio Measurement of Exhaust Particulate

Matter Emissions from in-use Light Duty Motor Vehicle in Denver Colorado Área⁴, realizados por la Universidad del Estado de Colorado en 1998; ya que en México no se han realizado estudios para la obtención de factores de emisión para PM₁₀.

Se utilizaron factores de emisión obtenidos de mediciones realizadas por el Instituto Mexicano del Petróleo en la ZMVM para estimar las emisiones de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono en vehículos a gasolina y para el cálculo de estos mismos contaminantes en motocicletas y vehículos a diesel se utilizaron factores de emisión obtenidos de la aplicación del modelo MOBILE5a.3MCMA.

Para desarrollar el inventario de emisiones de vehículos automotores fue necesario recopilar una gran variedad de datos que incluyen KRV's; estadísticas de consumo y calidad de combustible, velocidades de manejo, datos del registro vehicular y clases de vehículos. En algunos casos fue necesario procesar datos de diferentes dependencias, con la finalidad de definir clasificaciones preliminares del parque vehicular y en otros casos, se utilizaron datos de forma directa de algunos estudios.

Los datos esenciales para el desarrollo del inventario de emisiones de fuentes móviles son:

- Datos de actividad vehicular de la ZMVM (típicamente KRV o consumo de combustible), agrupados de manera tal que sean congruentes con los factores de emisión disponibles;
- Velocidades vehiculares promedio;
- Factores de emisión por tipo de vehículo, tipo de combustible, y año-modelo;
- Datos de los parámetros que definen la calidad de los combustibles vehiculares que se distribuye en la ZMVM, (contenido de azufre y presión de vapor Reid);
- Distribución del parque vehicular por año-modelo;
- Condiciones locales de altitud y temperatura ambiente.

⁴ U.S. Environmental Protection Agency, 1998. Measurement of Exhaust Particulate Matter Emissions from In-Use Light-Duty Motor Vehicles in the Denver, Colorado Area. General Motors R&D Center, Colorado Department of Public Health and Environment, Air Pollution Control Division, Colorado State.

3.3 FUENTES DE ÁREA

Las emisiones contaminantes del aire provenientes de fuentes de área se calcularon a través de diferentes métodos de estimación, dado que esto depende de la disponibilidad de información existente para cada categoría evaluada. La información fue proporcionada por dependencias gubernamentales y privadas, encargadas de generar bienes de consumo y servicios para satisfacer las necesidades de la población.

Las fuentes de área se pueden agrupar en las siguientes cinco categorías:

1. Pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustibles: Almacenamiento masivo de gasolina, distribución y ventas de gasolina; almacenamiento de gas LP, distribución de gas LP, fugas de gas LP en usos doméstico; recarga de aeronaves.
2. Evaporación de solventes: Artes gráficas, consumo de solventes, lavado en seco, limpieza de superficies (desengrase), recubrimiento de superficies industriales, recubrimiento de superficies arquitectónicas, pintura automotriz, pintura de tránsito y esterilización en hospitales.
3. Fuentes evaporativas de hidrocarburos: Aplicación de asfalto, panaderías, tratamiento de aguas residuales y rellenos sanitarios.
4. Fuentes móviles no carreteras: Locomotoras foráneas, locomotoras de patio y aeropuerto (operaciones de aeronaves).
5. Fuentes de combustión: Combustión residencial, combustión comercial e institucional, combustión en hospitales, incendios en estructuras e incendios forestales.

Para el cálculo de las emisiones se utilizaron factores de emisión por actividad para algunos casos y percápita para otros, también se aplicaron modelos de emisión computacionales desarrollados por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norte América (USEPA) y adaptados para su aplicación en México. Ver tabla 3.3.1.

En la mayor parte de categorías de fuentes de área se estimaron las emisiones de hidrocarburos totales, solo en aquellos rubros donde se realizan procesos de combustión se estiman otros contaminantes criterio como partículas, bióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

Tabla 3.3.1. Contaminante estimado y método utilizado por categoría

Categoría	Método	Fuente de información	Contaminante evaluado				
Consumo de solventes	FE	GDF-SMA					HC
Limpieza y desengrase	FE	EPA/AP-42, 1995					HC
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	FE	GDF-SMA					HC
Recubrimiento de superficies industriales	FE	GDF-SMA					HC
Lavado en seco	FE	EPA/AP-42, 1991					HC
Artes gráficas	FE	EPA/AP-42, 1995					HC
Panaderías	FE	EPA/AP-42, 1992					HC
Pintura automotriz	FE	EPA/AP-42, 1995					HC
Pintura de tránsito	FE	GDF-SMA					HC
Distribución de gas LP	FE	IMP					HC
Almacenamiento de gas LP	FE	IMP					HC
HCNQ ⁵ en la combustión	FE	IMP/TÜV Rheinland					HC
Fugas por uso doméstico de gas LP	FE	IMP					HC
Distribución y venta de gasolina	FE	EPA/AP-42, 1995					HC
Almacenamiento masivo de gasolina		ME EPA/TANKS 4.1,1995					HC
Operación de aeronaves		ME EPA/FAEED 2.1, 1995	NO _x	CO			HC
Recarga de aeronaves	FE	EPA/AP-42, 1995					HC
Locomotoras foráneas y de patio	FE	EPA/AP42, 1995	NO _x	CO	SO ₂	PM ₁₀	HC
Rellenos sanitarios		ME EPA/LANDFILL 1.0, 1994					HC
Aplicación de asfalto	FE	EPA/AP42, 1995					HC
Tratamiento de aguas residuales		ME EPA/SIMS 2.0, 1995					HC
Esterilización en hospitales	FE	EPA/AP-42, 1995					HC
Combustión en hospitales	FE	EPA/AP-42, 1995	NO _x	CO	SO ₂	PM ₁₀	HC
Combustión residencial	FE	EPA/AP-42, 1995	NO _x	CO	SO ₂	PM ₁₀	HC
Combustión comercial-institucional	FE	EPA/AP-42, 1995	NO _x	CO	SO ₂	PM ₁₀	HC
Incendios forestales	FE	EPA/AP-42, 1995	NO _x	CO		PM ₁₀	HC
Incendios en estructuras	FE	EPA/AP-42, 1995	NO _x	CO		PM ₁₀	HC

*FE., Factor de emisión, **ME.- Modelo de emisión

3.4 FUENTES NATURALES

3.4.1 Vegetación

En el desarrollo de este inventario se utilizó información de los años 1997 y 1998 proporcionada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR), el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Servicio Meteorológico de los Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM), así como por dependencias estatales como la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de México (SEDAGRO), la Comisión de Recursos Naturales (CORENA) y las 16 delegaciones del Distrito Federal. Dicha información permitió el desarrollo de bases de datos de mayor precisión, además de incorporar la cobertura del cielo por nubes, estimando la radiación que incide en la vegetación.

⁵ Hidrocarburos no quemados

Factores de emisión

En el cálculo de las emisiones para este sector se emplearon los factores de emisión estimados con el modelo PC-BEIS 2.2 (Personal Computing Biogenic Emissions Inventory System).

Meteorología

Para la aplicación del modelo se requirió definir diez días de máxima concentración de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México, se obtuvo la temperatura de dichos días y se tomaron los datos meteorológicos del cuarto día con más alta temperatura para las corridas. El archivo meteorológico del modelo PC-BEIS requiere como mínimo para estimar las emisiones datos de temperatura [°C] y nubosidad [fracción] horarios para un día (24 horas).

Se procesó la base de datos horaria de noviembre 1997 a octubre 1998, con la finalidad de obtener un escenario horario representativo para cada una de las temporadas climatológicas presentes en la ZMVM. Según el estudio "Cálculos y mediciones de hidrocarburos naturales en el Valle de México"⁶, el área de estudio presenta tres temporadas climatológicas, aplicables para las corridas de PC-BEIS 2.2:

- Seca-fría. Noviembre 1997-Febrero 1998
- Seca-cálida. Marzo 1998-Mayo 1998
- Lluviosa. Junio 1998-Octubre 1998

Uso de suelo y vegetación.

En lo que se refiere al uso del suelo de la ZMVM, esta se clasificó en cuatro grandes grupos: forestal, forestal urbano, agrícola y otros. Ver la tabla 3.4.1.1.

Tabla 3.4.1.1. Uso de suelo del área de estudio

Porcentaje de uso de suelo [%]				
Forestal	Forestal urbano	Agrícola	Otros*	Total
18	2	56	24	100

*Baldíos, agua, lotes desprovistos de vegetación, obras en construcción y cualquier uso de suelo no considerado en la tabla de factores de emisión del PCBEIS.

3.4.2 Suelos

La definición de la superficie considerada para la estimación de fuentes erosivas, está basada en el estudio realizado por Orea C. M. (1999), en el cual se definen 10 polígonos irregulares denominados *frentes* en función de la dirección de los vientos dominantes. El área total se estimó en 115,018 hectáreas como se indica en la tabla 3.4.2.1.

⁶ Ruiz Suárez, L.G., Imaz Gispert M., Montero M.O., Hernández Galicia F., Conde C. y Castro T., 1994. "Cálculos y mediciones de hidrocarburos naturales en el Valle de México". Reporte Técnico para CONSERVA. Gobierno del Distrito Federal y Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México.

Tabla 3.4.2.1. Área de estudio para la estimación de partículas

Frente	Área considerada
Noreste	La delegación Venustiano Carranza y los municipios de Atenco, Tezoyuca, Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Texcoco, Chimalhuacán y Nezahualcóyotl.
Sureste	La delegación Tláhuac y los municipios de Texcoco, Chimalhuacán, La Paz, Valle de Chalco, Chalco e Ixtapaluca.
Sur	Las delegaciones de Tlalpan, Milpa Alta, Xochimilco y Tláhuac y los municipios de Chalco y Valle de Chalco.
Suroeste	Las delegaciones Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Miguel Hidalgo
Noroeste	La delegación Gustavo A. Madero y los municipios de Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza y Tlalnepantla.
Norte I	Los municipios de Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, Tlalnepantla, Naucalpan y Tultitlán.
Norte II	Los municipios de Tepotzotlán, Teoloyucan, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán y Cuautitlán.
Norte III	Los municipios de Nextlalpan, Melchor Ocampo, Tultepec, Cuautitlán, Tultitlán, Coacalco, Ecatepec y Jaltenco.
Norte IV	Los municipios de Tecámac, Zumpango, Ecatepec, Acolman y Tehotihuacán.

Fuente: Orea., C. M. (1999). "Caracterización Ambiental de las Áreas de Emisión Edafológica de PM_{10} en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México". Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México. 129 p. p.

Metodología

El cálculo de las emisiones de partículas debido a la erosión del suelo, está basado en la ecuación de erosión desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, modificada por la USEPA, ecuación 3.

$$E = (FS) I C K L' V' \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

- E = Factor de emisión de partículas suspendidas [ton/acre/año].
- FS = Fracción de las pérdidas totales por erosión del viento medidas como partículas suspendidas, adimensional.
- I = Erosionabilidad del suelo [ton/acre/año].
- C = Factor climático, adimensional.
- K = Factor de rugosidad del suelo, adimensional.
- L' = Factor de amplitud del campo sin protección, adimensional.
- V' = Factor de cobertura vegetal, adimensional.

El factor FS representa la fracción de pérdidas por erosión del viento que serían tomadas en cuenta como partículas suspendidas. Se considera el factor de 2.5% para regiones agrícolas, mientras que para caminos sin pavimentar se utiliza un valor de 3.8%. En el presente caso se consideró el valor de 2.5%; así mismo, se asumió que de la cantidad suspendida, la mitad corresponden a partículas menores a $10 \mu m$ (PM_{10}).

El término I, erosionabilidad del suelo, es función de la textura o tipo de suelo. Debido a que en el Valle de México existen diferentes tipos de suelo, para la obtención de este factor se consideró el tipo predominante, que es una textura arcillo arenosa de acuerdo al INEGI (1999) y al Atlas General

del Estado de México (Gobierno del Estado de México, 1993). Con base en los factores de erosionabilidad del suelo (México Emissions Inventory Program, INE, 1997, volumen V) para este tipo de textura el valor total aproximado es de 38 toneladas/acre/año.

El factor climático, C, está relacionado con la velocidad del viento y la denominada precipitación efectiva, esta última asociada a la humedad de la superficie del suelo. La ecuación para su cálculo es:

$$C = \frac{(0.345) V^3}{[115 \sum (Pm_i / Tm_i - 10)^{10/9}]^2} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

V = Velocidad promedio del viento, corregido a 10 metros, [millas por hora]

Pm_i = Precipitación mensual, [pulgadas]

Tm_i = Temperatura promedio mensual, [grados Fahrenheit]

Para el cálculo del factor climático (C) se consideró el dato máximo promedio de velocidad del viento registrado durante 1998 para las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, el cual fue de 3.14 m/s y se registró en la estación Hangares. Asimismo, se tomaron los datos promedio de lluvia y temperatura mensuales, registrados en la estación Tacubaya (Servicio Meteorológico Nacional), con esta información se calculó el factor climático de acuerdo a la ecuación antes mencionada, resultando un valor de 0.058.

El factor de rugosidad del suelo (K) refleja la reducción en la erosión eólica debida a la presencia sobre el suelo en cuestión de cerros, lomas, canales, surcos, etc. Cuando la presencia de estos factores es mínima, se estima un valor de rugosidad de 1 (México Emissions Inventory Program. INE, 1997, volumen V), valor que fue utilizado en el presente estudio.

El factor de amplitud de campo sin protección (L') se obtiene por el producto de los factores de erosionabilidad (I) y rugosidad (K), posteriormente se determina la amplitud de campo (L) y por último se calcula el factor (L'), tomando como referencia las curvas de efecto de la longitud de campo sobre la tasa de emisión relativa. Debido a que la distancia a lo largo del viento prevaleciente se consideró amplia, se obtuvo un valor de 0.99.

Para el factor de cobertura vegetal (V'), primeramente se estima el valor de cubierta vegetal (V), de acuerdo a la tabla correspondiente (USEPA, 1997) y con base en el tiempo de cultivo; posteriormente se calcula el producto de los factores IKCL', con base en las curvas de efecto de la cubierta vegetativa sobre el cultivo en la tabla correspondiente (USEPA, 1997). Para este caso se hicieron dos consideraciones: V'=1 cuando el suelo no tiene cobertura vegetal y V'=0.5 si existe cobertura vegetal.

3.5 GASES DE EFECTO INVERNADERO

En el desarrollo del inventario de emisiones para Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el año de 1998, se consideró el Estudio sobre el Inventario de Gases de Efecto Invernadero Asociados a la

Producción y Uso de la Energía en la ZMVM⁷, que fue desarrollado considerando como fuente de información el Programa Universitario de Energía, la Comisión Ambiental Metropolitana, la Comisión Federal de Electricidad, PEMEX, la Secretaría de Energía, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

Del mencionado estudio, se obtuvo la metodología para el cálculo de las emisiones de CO₂ y CH₄, generados durante el proceso de combustión de combustibles fósiles en el sector industrial, transporte, residencial y de servicios. Teniendo así, que la estimación de GEI se obtiene por el producto del consumo energético y el coeficiente de emisión, ambos casos asociados a la actividad, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$ET_i = \sum_j \sum_k A_{kjm} * C_{jikm} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

ET_i = Emisión total del GEI (i), [kg/año]

A_{kjm} = Actividad energética del sector (j) utilizando la tecnología (m) para el combustible (k) [TJ/año], tabla 3.5.1.

C_{jikm} = Coeficiente de emisión del gas (i) asociada a la actividad (j) utilizando la tecnología [m] y el combustible (k), [kg/TJ], tabla 3.5.2

Aunque la metodología de cálculo es sencilla, la dificultad estriba en tener la información disponible. En el caso de la ZMVM se dispone de diversas fuentes de información como son PEMEX Gas y Petroquímica Básica, PEMEX Refinación, Asociación de distribuidores de Gas LP y Gas Natural; por medio de los cuales se determinó la distribución energética por sector, (tabla 8).

La base de información del inventario de contaminantes locales de la Comisión Ambiental Metropolitana, considera los factores de emisión (tabla 9) propuestos por el AP-42 y el IPCC, asumiendo que los quemadores se encuentran sin equipo de control. Las emisiones procedentes de la degradación de residuos sólidos municipales, aun cuando dicha emisión no esta asociada al consumo energético, se considera dentro de los GEI y se determinaron con el modelo LANDFILL, desarrollado por la EPA. La información de actividad fue proporcionada por la Dirección General de Servicios Urbanos del Distrito Federal.

⁷ Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Asociados a la Producción y Uso de la Energía en la Zona Metropolitana del Valle de México. Reporte del Grupo de Energía y Ambiente del Instituto de Ingeniería, UNAM para la Comisión Ambiental Metropolitana; Septiembre, 2000.

Tabla 3.5.1. Distribución del consumo energético por sector y tipo de combustible

Combustible	Consumo energético [TJ]		
	Transporte	Industria	Residencial Comercial
Gasolina	214,173		
PEMEX diesel	57,939		
Gas LP	9,607	4,102	78,877
Gas natural		188,555	2,037
Gasóleo doméstico		111	
Combustible industrial		15,132	
Diesel industrial bajo azufre		8,923	
Total	281,719	216,823	80,915

Elaborada con datos de PEMEX Gas y Petroquímica Básica, 2000; PEMEX Refinación, 2001; y Secretaría de Energía, 1998.

Tabla3.5.2. Factores de emisión [kg/TJ]

	Tipo de combustible	IPCC ⁸		EPA (AP-42) ⁹	
		CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
Industrial	Gas natural	56,100	1.4	49,716	1.0
	Gas LP	63,067	0.9	59,979	0.9
	Combustóleo ligero	77,367	0.2	66,539	0.2
	Combustóleo pesado	77,367	3.0	74,595	3.0
	Diesel	74,067	0.2	71,673	0.2
	Gasóleo	74,067	0.2	71,673	0.2
	Petróleo diáfano	69,300	0.2	77,953	0.2
	Tipo de combustible	IPCC ⁸		EPA (AP-42) ⁹	
		CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
Comercial					
	Gas natural	56,100	1.2	49,716	1.0
	Gas LP	63,067	0.9	59,979	0.9
Residencial					
	Gas natural	56,100	1.0	49,716	1.0
	Gas LP	63,067	1.1	59,979	0.9
Transporte					
	Diesel	74,070			
	Gas LP	63,070			
	Gasolina	69,300			

De acuerdo con las predicciones climáticas del IPCC, de continuar el crecimiento en las emisiones y concentraciones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero, la temperatura de la atmósfera terrestre podría elevarse entre 1.5 y 3.5 grados centígrados a lo largo del próximo siglo. Como causa de este aumento en la temperatura, el nivel medio del mar podría elevarse entre 50 y 150 centímetros y se generarían cambios en los patrones climáticos, con posibles efectos catastróficos en diversas zonas del planeta. Algunos científicos afirman que los recientes acontecimientos de aumento de precipitación pluvial y mayor intensidad y número de huracanes, son parte de los efectos del cambio climático.

Por lo anterior, es de suma importancia dar seguimiento a la generación de gases de efecto invernadero y continuar con el desarrollo de inventarios de emisiones de estos contaminantes.

⁸ Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook, volume 2. (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5a.htm>), Reference Manual, volume 3(<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6a.htm>).

⁹ Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, 5th edition, volume I, Stationary Point and Area Sources (<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42.html#chapter>).