

MODELO DE EMISIONES VEHICULARES, MODEM

Mauricio Osses Alvarado
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Chile
Casilla 2777, Santiago, Chile
Fax : (56-2) 698 8453, e-mail : maosses@ing.uchile.cl

Álvaro Henríquez Aguirre
Unidad de Medio Ambiente y Energía
SECTRA, Santiago, Chile

RESUMEN

El creciente deterioro medioambiental producido por la actividad humana en ciudades exige la consideración y cuantificación de las externalidades asociadas a la contaminación en las metodologías de planificación urbana. Dado el alto grado de responsabilidad del sector transporte en el nivel de emisiones contaminantes atmosféricas en dichas zonas, se hace imperativo contar con herramientas metodológicas que estimen el aporte asociado a la actividad vehicular.

El **MODE**lo de **EM**isiones Vehiculares **MODEM** corresponde a una metodología y a un software especializado que permite calcular las emisiones de contaminantes atmosféricos producidas por la actividad vehicular terrestre en zonas urbanas. **MODEM** utiliza información derivada de los modelos estratégicos de transporte y factores básicos de emisión, obteniéndose emisiones para varios tipos de contaminantes, todo ello diferenciado para 61 categorías vehiculares, con elevados niveles de desagregación espacial y temporal.

En este trabajo se presentan los resultados de **MODEM** en el Gran Santiago, para el año 2000, de los siguientes contaminantes criterio: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado respirable (MP₁₀). Se indican las emisiones según el tipo de vehículo, distinguiendo emisiones en caliente, partidas en frío y evaporativas. Los resultados de emisión en caliente para todas las categorías vehiculares consideradas al año 2000 se estiman en 1,5 kT/año para MP₁₀, 128 kT/año para CO, 13 kT/año para HC y 34 kT/año en el caso de NOx. Las partidas en frío aportan un 23% adicional al total de CO, 13% en HC y 2% en NOx, mientras que las emisiones evaporativas incorporan un 22% más a los HC. El análisis de resultados, en conjunto con los flujos vehiculares y las velocidades medias, puede hacerse a partir de visualizaciones gráficas derivadas de un sistema específicamente generado por **MODEM**. Este modelo de visualización, permite una fluida relación con los modelos de dispersión y concentración de contaminantes, paso previo a la estimación del impacto en salud y el impacto económico de la contaminación y, por lo tanto, de la incorporación de esta variable a la evaluación económica de los proyectos de transporte.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire puede impactar negativamente sobre la salud pública cuando su concentración en la atmósfera alcanza niveles significativos (Elsom 1992, Colls 1996). En la mayoría de las áreas urbanas del mundo existen grandes problemas de calidad del aire dado que con frecuencia se registran elevadas concentraciones de contaminantes, tanto de aquellos que presentan efectos globales como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, los cuales permanecen en la atmósfera por mucho tiempo, y aquellos contaminantes que presentan efectos locales y que permanecen por horas o meses como máximo en la atmósfera. Entre estos últimos, es posible mencionar monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, etc. (Lenz 1999, Pearson 2001).

El aporte de las distintas actividades económicas a las emisiones de contaminantes atmosféricos revelan sistemáticamente una gran importancia relativa del sector transporte (CENMA 2000), específicamente en material particulado respirable (MP_{10}), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV). En este sentido, el cálculo correcto de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de las distintas fuentes móviles terrestres en circulación en zonas urbanas es la base para una adecuada definición de políticas y medidas de control de la contaminación y por lo tanto requiere de un continuo desarrollo.

Este artículo es parte de este desarrollo y tiene como objetivo plantear una metodología y mostrar la generación de una herramienta computacional de apoyo a la toma de decisiones en la planificación del transporte, incorporando a dicho proceso la variable ambiental y su impacto asociado a la actividad vehicular (MIDEPLAN 2002).

2. METODOLOGÍA BASE DE CÁLCULO

2.1 Principales Tipos de Emisión en Vehículos Terrestres

Las emisiones de vehículos terrestres se componen de un gran número de contaminantes provenientes de diferentes procesos.

2.1.1 Emisiones por el Tubo de Escape: comúnmente son consideradas las emisiones que resultan del proceso de combustión interna y que son liberadas por el tubo de escape del vehículo. Entre los contaminantes de interés en este tipo de emisiones destacan COV, CO, NO_x , SO_x , PM, gases tóxicos del aire (benceno, formaldehído, etc) y las especies reductoras de visibilidad (amoníaco, sulfatos, $PM_{2.5}$, etc) (Pearson 2001, Programa de Inventario México 2001)

Las emisiones por el tubo de escape se clasifican en aquellas emitidas mientras el motor aún está frío denominadas como “emisiones por partidas en frío” y aquellas emanadas cuando el motor ya ha alcanzado su temperatura normal de operación, denominadas “emisiones en caliente”.

2.1.2 Emisiones Evaporativas: además de las emisiones del tubo de escape, los vehículos terrestres registran una gran variedad de procesos de emisiones evaporativas de COV y que incluyen:

- Emisiones evaporativas del motor caliente: aquellas producto de la volatilización del combustible en el sistema de alimentación después de apagado el motor. El calor residual del motor volatiliza el combustible.
- Emisiones evaporativas de operación: ocasionadas por las fugas de combustible, como líquido o vapor, mientras el motor está en funcionamiento.
- Emisiones evaporativas durante recarga de combustible: son aquellas provenientes del tanque de combustible y que pueden ocurrir mientras el vehículo está en reposo o llenando el tanque.
- Emisiones diurnas: provenientes del tanque de combustible debido a un aumento de temperatura del combustible y su presión de vapor.
- Emisiones evaporativas en reposo: se presentan cuando el motor no está en funcionamiento, debidas principalmente a fugas de combustibles y a la fuga del vapor a través de las líneas de alimentación del combustible.

2.1.3 Otras emisiones: existen fuentes adicionales de emisiones de partículas (MP) para los vehículos terrestres. La de mayor magnitud es la de levantamiento de polvo del camino, polvo recogido por las llantas del vehículo y suspendido en el aire por la turbulencia ocasionada por el movimiento. Otras fuentes de PM no originadas en el tubo de escape incluyen el desgaste de llantas y frenos.

2.2 Estimación de Emisiones Vehiculares

El total de emisiones de un vehículo terrestre es determinado por la suma de emisiones de tres diferentes fuentes (ECE 1999). Estas son:

- Emisión en caliente (por tubo de escape con motor caliente): cuando hay estabilidad térmica en la operación del motor
- Emisión de partida en frío (en proceso de calentamiento): fase durante la cual el motor está alcanzando la temperatura para su funcionamiento óptimo.
- Emisión Evaporativa del combustible (hidrocarburos evaporados).

Lo anterior revela la importancia de las condiciones de operación del motor (Ntziachristos 2000, Vlieger 1997).

La distinción de emisión en caliente y en frío es necesaria debido a que hay una diferencia de emisiones muy significativa entre estas dos condiciones de operación. Así, las concentraciones de la mayor parte de los contaminantes es más alta durante la fase en frío, ya que el uso del combustible es ineficiente.

En definitiva, la relación básica usada para el cálculo de emisiones totales generadas por una flota vehicular es:

$$E_{total} = E_{caliente} + E_{partida} + E_{evaporativa} \quad (1)$$

E_{total} [gr] = Total de emisiones de un contaminante, dada la variable temporal y espacial.
 E_{caliente} [gr] = Emisiones durante la estabilidad térmica de funcionamiento del motor.
 E_{partida} [gr] = Emisiones durante la fase de transición en la cual el motor está alcanzando la temperatura óptima de funcionamiento.
 $E_{\text{evaporativas}}$ = Emisiones generadas por la evaporación del combustible.

Las emisiones evaporativas se hacen significativas al tratarse de vehículos a gasolina, por lo que el cálculo se refiere a este segmento del grupo de fuentes móviles.

La estimación de emisiones vehiculares se realiza a través de cálculos teóricos utilizando balance de masa de combustible (CO_2 , SO_2 y plomo) o bien, a través de los factores de emisión obtenidos a partir de ensayos experimentales (para la mayoría de los contaminantes gaseosos y partículas).

El factor de emisión es normalmente expresado como unidades de masa dividido por unidades de actividad y se asume que es independiente del tamaño de la fuente y del nivel de actividad de ésta (Baldasano 1998). Su determinación obedece a modelos que reflejan las características locales de la zona analizada, considerando los efectos de varios parámetros tales como las diferentes modalidades de conducción, el tipo de motor, características del combustible (Tong 2000), las velocidades de operación del vehículo (André 1999, Samaras 1999), niveles variables de mantenimiento (Vanke 1992, Cadle 1994), alteraciones de los sistemas de control de emisiones (Pearson 2001, Calvert 1993), la tecnología para el control de emisiones (Sams 1999), la temperatura ambiente, altitud, kilometraje (Lenz 1999, ACEA 1998) y la pendiente del terreno (Fresard 2001).

Por lo tanto, los cálculos de emisión que tengan como base la actividad vehicular, en particular las en caliente, se pueden estimar por medio de un factor de emisión adecuado y algunos parámetros relativos a la operación del vehículo, además de los factores de corrección correspondientes.

$$ET_p = FE_p \cdot NA_p \cdot FC_p \quad (2)$$

ET_p [gr] = Emisiones totales del contaminante p
 FE_p [gr/km] = Factor de emisión del contaminante p
 NA_p [km] = Nivel de actividad vehicular relevante para emisiones tipo p
 FC_p = Factores de corrección

3. DESCRIPCION DEL MODELO DE EMISIONES VEHICULARES, MODEM

MODEM utiliza para la estimación de emisiones vehiculares la siguiente ecuación:

$$E_{ijk} = FE_{ik} \cdot FT_j \cdot C_{jk} \cdot L_j \quad (3)$$

E_{ijk} = Emisión total del contaminante i, en el arco j, para la categoría vehicular k
 FE_{ik} = Factor de Emisión del contaminante i, para la categoría vehicular k [gr/km]
 FT_j = Flujo Vehicular Total en arco j, a la hora analizada [veh/hr]

C_{jk} = Composición o fracción del flujo total de la categoría k, en el arco j [%]

L_j = Longitud del arco j [km]

MODEM maneja seis niveles de desagregación, los que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de resultados generados por MODEM

Nivel de desagregación	Descripción
Geográfico	Resultados por Arco de la Red Vial Resultados por Comuna y Región
Temporal	Resultados por Hora para día hábil Resultados Anuales
Contaminante	4 Gases Regulados (CO, HC, NOx, SO ₂) 4 Gases no Regulados (N ₂ O, NH ₃ , CH ₄ , CO ₂) Material Particulado Respirable (MP ₁₀)
Categoría vehicular	Buses (18 tipos) Camiones (17 tipos) Veh. Pasajeros (15 tipos) Veh. Comerciales (7 tipos) Motocicletas (4 tipos) Total (61 tipos o categorías)
Variables de actividad	Consumo de combustible (CC) Densidad de Flujo Flujos Vehiculares Velocidades Promedio
Tipos de emisión	Emisiones en Caliente Emisiones por Partidas en Frío Emisiones Evaporativas (hot soak, running losses, diurnal)

La visualización gráfica de los resultados obtenidos mediante MODEM es posible realizarla directamente con software comercial (e.g. TransCad), o bien a través de un sistema específicamente generado para MODEM denominado Herramienta de Visualización Gráfica (HVG). Este sistema permite transformar la información por arco de la red a una malla o grilla con celdas cuadradas de longitud variable, con el objetivo de facilitar la visualización de los resultados y facilitar la comunicación con modelos de dispersión.

3.1 Nivel de actividad Vehicular

La representación de la operación de un sistema de transporte urbano se base en el uso de modelos de redes de transporte. Por un lado se utiliza el concepto de arco y nodo para representar las calles e intersecciones del sistema respectivamente (oferta) y por otro, la información de flujos como descriptor de los viajes en la red (demanda).

La necesidad de estimar inventarios de emisión ha impulsado los cálculos por arco, mediante modelos estratégicos de transporte. En el caso de Santiago de Chile, el modelo utilizado es ESTRAUS-2000, con una red urbana de 7567 arcos divididos en 264 zonas distribuidas sobre el Gran Santiago. Las cuatro etapas de modelación (generación-atracción de viajes, distribución, partición modal y asignación) son resueltas mediante equilibrio simultáneo (Fernández 1990, De Cea 1993). Este modelo cubre dos períodos de tiempo: punta mañana (07:30-08:30 hrs) y fuera de punta (10:30-11:30 hrs), ambos periodos correspondientes a día hábil. El flujo se divide en flujo fijo y variable, donde el primero está asociado a transporte público y el segundo a modos privados de transporte.

MODEM recoge la información vial generada por el modelo estratégico ESTRAS, adaptándola y complementándola para lograr el nivel de desagregación espacial y temporal requerida por la metodología de estimación de emisiones. Las variables de ESTRAS utilizadas son básicamente la definición de red vial con la descripción de arcos y nodos de origen y destino, los flujos vehiculares asignados a cada arco (desagregados en fijos y variables) y los tiempos totales de recorrido por arco.

La información de actividad vehicular entregada por el modelo de transporte se encuentra restringida a uno o dos períodos de modelación, haciéndose necesario expandir esta actividad temporalmente hasta llegar a modelaciones anuales. La expansión de flujos vehiculares se realiza aplicando **“perfiles normalizados de flujo”**, que representan las variaciones del número total de vehículos pertenecientes a una categoría específica durante un día y durante los días de la semana. Estos perfiles dependen de la ubicación geográfica del arco vial analizado y su categoría. Actualmente existen perfiles normalizados de flujo diferenciados para transporte privado, buses licitados, y camiones. Además de lo anterior, se consideran las variaciones mensuales de flujo, considerando un mes de referencia (e.g. Abril). Las curvas de perfiles normalizados se encuentran clasificadas según el sentido de viaje (N-S, S-N, O-P, P-O).

La clasificación de los distintos tipos de vehículo en categorías responde a las diferencias existentes asociadas a su nivel de emisión y el uso. Debido a que la información vial obtenida en un modelo de transporte no alcanza a ofrecer diferencias como las requeridas, se aplican **matrices de composición vehicular** obtenidas mediante conteos y análisis estadístico de información histórica. Estas matrices pueden ser proyectadas de acuerdo a criterios de crecimiento y obsolescencia para generar modelaciones de escenarios futuros. Las matrices de composición vehicular se asumen dependientes de la ubicación geográfica de cada arco vial, sin variaciones durante el día.

Lo anterior se representa en la Figura 1, como la estructura de la metodología de cálculo de emisiones implementada en MODEM (tipo *bottom-up*).

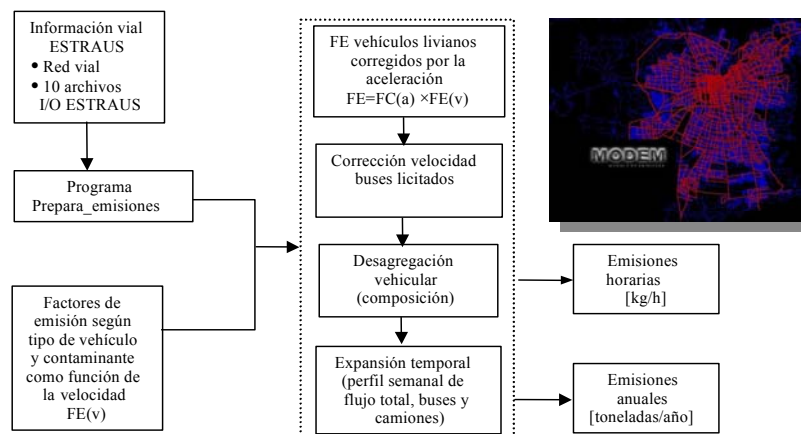


Figura 1. Metodología de cálculo de MODEM

3.2 Clasificación de las Fuentes Móviles

De acuerdo al tipo de infraestructura vial utilizada, las fuentes móviles se clasifican en aquellas de ruta, que corresponden a los vehículos diseñados para circular por los caminos o rutas tradicionales (por ejemplo buses, camiones, vehículos particulares); y aquellas fuentes móviles fuera de ruta o vehículos diseñados para ser utilizados fuera de los caminos tradicionales (por ejemplo aeronaves, maquinaria agrícola, embarcaciones, entre otros).

Dentro de las fuentes móviles en ruta, considerando las características de las flotas locales y la información disponible, se han definido 61 categorías. Estas categorías han sido estimadas para cinco periodos durante un día hábil característico, de acuerdo a mediciones manuales y bases estadísticas.

3.3 Contaminantes Cubiertos

Existe una larga lista de especies contaminantes vinculadas a las actividades del transporte. Los niveles de emisión unitarios por contaminante, llamados factores de emisión, han sido bien estudiados para algunos de ellos y pueden considerarse conocidos y debidamente caracterizados. Sin embargo, para otros contaminantes esta realidad es diferente, existiendo una limitada base de datos que generalmente es insuficiente para representar en buena forma el nivel real de emisión.

Considerando que es necesario tener una primera aproximación del nivel de emisiones para muchos compuestos y siquiera un orden de magnitud para otros, la metodología propuesta cubre los siguientes contaminantes: CO (monóxido de carbono), COV (compuestos orgánicos volátiles y su especiación), NO_x (óxidos de nitrógeno), CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), SO_x (óxidos de azufre), NH₃ (amoníaco), PM₁₀ (material particulado respirable), HAPs (hidrocarburos aromáticos policíclicos), POPs (compuestos orgánicos persistentes), Dioxinas, Furanos y por último metales pesados que forman parte del combustible como Plomo, Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Selenio y Zinc.

3.4 Factores de Emisión

El estado actual de factores de emisión consiste en 278 curvas que se aplican a la casi totalidad de las 61 categorías vehiculares, para 8 contaminantes (CO, HC, NO_x, MP₁₀, CH₄, NH₃, N₂O y CO₂). Estas 278 ecuaciones son funciones de la velocidad media de recorrido del vehículo en kilómetros por hora y permiten obtener la emisión en gramos de contaminante por kilómetro recorrido.

Para la totalidad de curvas de emisión, se han agrupado las categorías vehiculares en 8 grupos (vehículos livianos de pasajeros, vehículos livianos comerciales, camiones livianos, camiones medianos, camiones pesados, buses licitados urbanos, buses interurbanos y rurales, motocicletas). Las curvas de emisión han sido revisadas y actualizadas, especialmente en los valores correspondientes a categorías vehiculares nuevas, algunas correcciones en los parámetros de NO_x para vehículos livianos de pasajeros, así como mejoras en las curvas de consumo de combustible de vehículos livianos y vehículos pesados.

4. EMISIONES EN CALIENTE POR EL TUBO DE ESCAPE

La figura 2 muestra un esquema que resume el cálculo de emisiones a partir de los modelos estratégicos de transporte y la aplicación de factores de emisión. De la figura es posible notar que de los modelos de transporte obtenemos la información de la red vial (arcos modelados), sus características, velocidades y flujos, es decir el nivel de actividad relacionado al transporte. Sin embargo, es importante aclarar que estos modelos, por el hecho de que son diseñados con fines de planificación estratégica del sistema de transporte (e.g. ESTRAUS) y no con fines de cálculo de emisiones, deben ser complementados con información adicional. Con el objeto de complementar los modelos y utilizar de manera acertada las metodologías de cálculo de emisiones se acompañan estos resultados con campañas de caracterización de flujos vehiculares extras al modelo que permiten generar información adicional sobre el nivel de actividad de las fuentes móviles en ruta.

Las razones que hacen necesarias estas campañas complementarias en terreno se resumen en dos. Primero se hace necesaria una caracterización del flujo vehicular en cuanto a su composición obteniendo la mejor “fotografía” posible acerca de las diferentes clases de vehículos que circulan diariamente y conocer sus proporciones relativas, vale decir, que porcentaje del flujo total corresponde a vehículos livianos, cuanto a camiones, a buses, etc. Esto se hace necesario debido a que la estimación de emisiones debe necesariamente diferenciar distintas categorías vehiculares debido a las apreciables diferencias de emisiones entre un tipo de vehículo y otro. En general, los modelos de transporte sólo distinguen los flujos asignados como aquellos que caracterizan el transporte de ruta fija, como buses y taxis colectivos, y aquellos de ruta variable, donde se encuentran agrupadas el grueso de las categorías vehiculares, como vehículos particulares y comerciales de todos los tipos. De esta manera, un trabajo de caracterización de flujos en terreno más una caracterización del parque local basada en estadísticas centralizadas del Instituto Nacional de Estadísticas “INE”, revisión de bases generadas por las Plantas de Revisión Técnica del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y por último de bases generadas por las diferentes municipalidades respecto a los permisos de circulación otorgados en cada comuna, hacen posible desagregar los flujos vehiculares en todas aquellas categorías que el modelo de estimación de emisiones requiere.

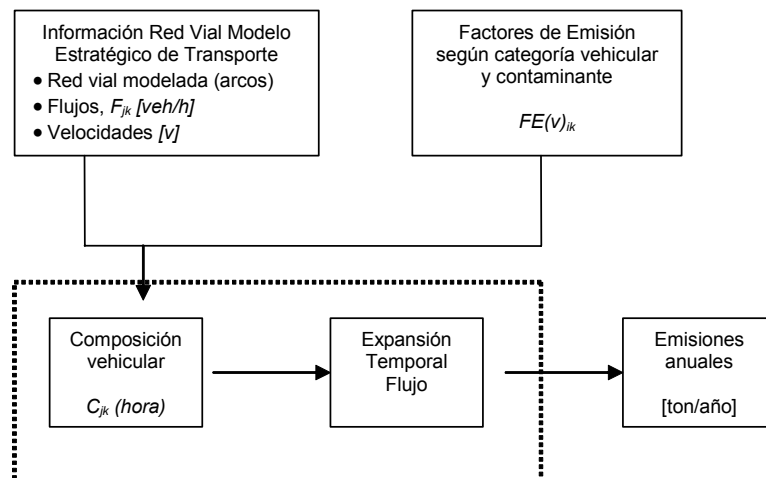


Figura 2 Diagrama general estimación de emisiones

Por otro lado, para poder calcular emisiones a lo largo de todo el día y todo el año, es decir, llegar a estimar las emisiones anuales, se hace necesario una expansión temporal del flujo vehicular entregado por los modelos de transporte. Los modelos de transporte entregan solamente evaluaciones o asignaciones de flujos para ciertas horas específicas de modelación, generalmente un horario de punta y otro fuera de punta, entonces, como el modelo de emisiones requiere calcular emisiones en un periodo continuo de tiempo, es necesario extrapolar estas asignaciones a todo el día y a todo el año, para lo cual se hace necesario contar con perfiles de flujos diarios que caractericen el comportamiento a lo largo del día completo. En este sentido, los conteos continuos de flujos realizados en la campaña experimental son útiles. En la ecuación 3, el flujo está representado por la expresión “ FT_{jk} ”, este flujo corresponde al flujo modelado en un solo periodo horario, generalmente en la mañana en hora punta, de manera que para expandir este flujo a cualquier otra hora del día se hace necesario incorporar un factor adicional en la ecuación 3. Este factor de expansión temporal denominado “perfil de flujo” o “ $PF_{jk} [hora]$ ” está representado también en la figura 2 en el segundo cuadro dentro del marco de línea segmentada. De esta manera la ecuación 3 se completa con estos factores quedando como muestra la siguiente ecuación (Corvalán 2002).

$$E_{hora-ijk} = FT_{jk} [veh / h] \cdot L_j [km] \cdot FE(v)_{ik} [gr / km] \cdot PF_{jk} [hora] \cdot C_{jk} [hora] \quad (4)$$

- $E_{hora\ ijk}$: Emisiones [gr] del contaminante considerado i en un arco j para la categoría vehicular k en una hora determinada.
- FT_{jk} : Flujo vehicular [veh/h] total en el arco j a la hora en que se establecieron los parámetros por arco bajo el modelo de transportes utilizado como base (ej. punta mañana)
- L_j : Largo del arco evaluado [km].
- $FE(v)_{ik}$: Factor de emisión en función de la velocidad [gr/km] del contaminante i para la categoría k evaluada.
- PF_{jk} : Perfil de flujo o fracción del flujo total (Flujo jk) correspondiente a la hora evaluada.
- C_{jk} : Composición o fracción del flujo total en el arco j perteneciente a la categoría k para la hora evaluada.

La ecuación (4) es una combinación de factores que deben ser incorporados a la metodología general de cálculo de emisiones, separados conceptualmente entre niveles de actividad (NA) y factores de emisión (FE).

El nivel de actividad asociado a las fuentes móviles en ruta entrega las variables geográficas y temporales de movilidad, es decir, predice el comportamiento de las diferentes categorías vehiculares en una red vial determinada. Se incluye la modelación de tráfico o modelos de transporte, características del flujo total y la desagregación o composición de la flota vehicular bajo análisis.

El comportamiento de los flujos vehiculares y la distribución de tecnologías o tipos de vehículo que componen estos flujos ha sido calculado para nueve sectores comunales que agrupan las 34 comunas del Gran Santiago.

5. RESULTADOS FINALES MODEM AÑO 2000

La integración de todos los métodos de cálculo descritos anteriormente permite obtener la totalidad de las emisiones vehiculares para un escenario específico. A continuación se presenta la responsabilidad de cada uno de los factores considerados en el Inventario de Emisiones 2000 de la Región Metropolitana, considerando las fuentes móviles (emisiones en caliente, partidas en frío, evaporativas) y fuentes estacionarias.

Tabla 2. Resumen de emisiones Inventario 2000 Región Metropolitana

Fuente de emisión	Categoría	CO [ton/año]	HC [ton/año]	NOx [ton/año]
VLP ¹ , VLC ² y taxis (gasolina)	Caliente catalíticos	32360	2047	4994
	Caliente no-catalíticos	85819	6196	7472
	Part_frio catalíticos	14042	1445	770
	Part_frio no-catalíticos	24240	1173	82
	Evaporativas catalíticos	--	923	--
	Evaporativas no-catalíticos	--	3445	--
	Total VLP, VLC y taxis	156461	15229	13318
Fuentes móviles	Gasolina y diesel	166912	19944	35244
Fuentes estacionarias	Puntuales y areales	11715	55363	9877

¹: VLP: vehículos livianos de pasajeros

²: VLC: vehículos livianos comerciales

Un análisis general de los datos indicados en la Tabla anterior permite establecer que las partidas en frío aportan un 24% en CO, 17% en HC y 6% en NOx, dentro de su propia categoría (VLP, VLC y taxis a gasolina). Lo anterior corresponde a 23% en CO, 13% en HC y 2% en NOx para el total de emisiones de fuentes móviles. Finalmente, las partidas en frío representan un 21% en CO, 3% en HC y 2% en NOx, considerando como referencia el total de emisiones (fuentes móviles + fuentes estacionarias).

Por otro lado, los tres tipos de emisiones evaporativas (hot soak, running losses y diurnal) aportan hidrocarburos totales (HC), correspondiendo estos a un 29% dentro de su propia categoría, un 22% en el total de fuentes móviles y 6% en la totalidad móviles más estacionarias. Los distintos tipos de emisión evaporativa corresponden a un 78% (hot soak), 12% (running losses) y 10% (diurnal) del total en este tipo de emisión de HC.

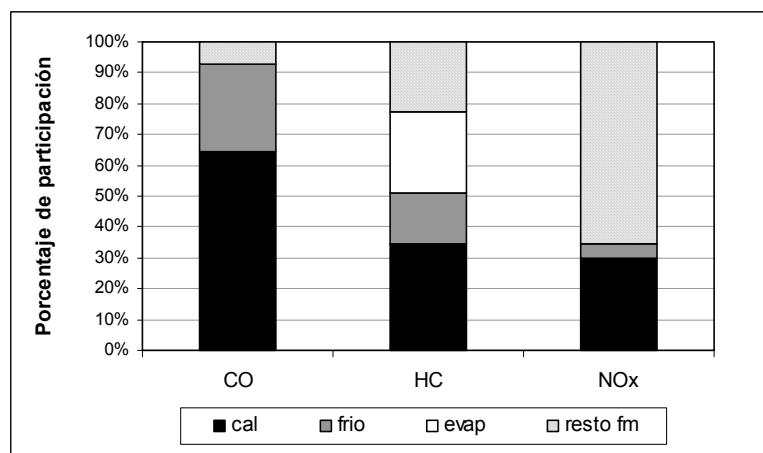


Figura 4. Porcentaje de participación de los distintos tipos de fuente emisora Inventario de Emisiones 2000, fuentes móviles

Un ejemplo de resultados generados por MODEM para la estimación de emisiones del año 2000, en el total de 34 comunas del Gran Santiago, para los contaminantes criterio (MP₁₀, CO, HC, NO_x), consumo de combustible (CC) y nivel de actividad (NA), se expone en la Tabla 3. Las categorías que no participan en esta modelación no se incluyen, pero aparecen en la salida MODEM. Los valores indicados corresponden a emisiones en caliente solamente. MODEM entrega columnas adicionales para los valores de partida en frío y evaporativas.

El tipo de resultado de la Tabla 3 se encuentra a nivel anual, diario y horario (hora punta mañana), para cada una de las 34 comunas del Gran Santiago y la suma total de ellas. Además, se entregan resultados anuales, diarios y horarios por arco de la red, en 7 grupos de vehículos según su tipo (buses licitados, buses otros, camiones, particulares catalíticos, particulares no catalíticos, taxis catalíticos y taxis no catalíticos). Lo anterior se traduce en un total por corrida MODEM de 30 archivos de salida, correspondientes a un total aproximado de 25 Megabites (esta cantidad depende del número de arcos de la red vial utilizada en el cálculo de emisiones).

Tabla 3. Resultados programa MODEM año base 2000, Gran Santiago

Categoría	MP	CO	HC	NO _x	CC	NA x 1000
	Ton/año	Ton/año	Ton/año	Ton/año	Ton/año	Veh-km/año
Buses licitados Diesel convencional	463.4	2208.6	782.4	6220.9	77104	323154
Buses licitados Diesel tipo 1	176.9	997.6	530.1	3933.9	80714	291931
Buses licitados Diesel tipo 2	134.5	986.2	611.4	3472	163937	360718
Buses Interurbanos Diesel convencional	2.9	15.2	9.3	48.9	919	2714
Buses Interurbanos Diesel tipo 1	0.4	1.7	0.9	5.4	183	543
Buses Interurbanos Diesel tipo 2	0.1	0.9	0.6	2.6	122	362
Buses Rurales Diesel convencional	8.3	39.6	14.2	111.9	1392	5986
Buses Rurales Diesel tipo 1	1.1	6.2	3.3	24.6	507	1881
Buses Rurales Diesel tipo 2	0.2	1.8	1.1	6.4	303	684
Camiones livianos Diesel convencional	105.7	900.1	544.6	969.7	29952	253101
Camiones livianos Diesel tipo 1	103.1	675.4	612.9	1018.7	44950	379814
Camiones livianos Diesel tipo 2	11.1	94.3	69.9	160.3	7846	66302
Camiones medianos Diesel convencional	136.9	588.3	353.9	1271	33746	167987
Camiones medianos Diesel tipo 1	133.7	441.7	398.6	1336.1	50676	252240
Camiones medianos Diesel tipo 2	14.3	61.4	64.6	165.7	8802	43834
Camiones pesados Diesel convencional	69.6	246.8	140.1	1133.9	26680	86652
Camiones pesados Diesel tipo 1	60.3	181	93.4	831.5	35573	115535
Camiones pesados Diesel tipo 2	17.4	111.1	63	453.5	26680	86652
Particulares Cat. tipo 1	0	14082.5	1147.2	3115.2	661893	7444517
Particulares No-Cat	0	63391.1	3976.3	4801.1	222017	2259792
Alquiler Cat. tipo 1	0	2741.9	225.2	622.1	130227	1484561
Alquiler No-Cat	0	4343.5	274.3	336	15327	157552
Taxis Col. Cat. tipo 1	0	481.6	39.5	109.4	22810	256372
Taxis Col. No-Cat	0	1815.3	115.6	137.5	6446	64093
Comerciales Cat. tipo 1	0	15053.6	635.5	1147.1	275312	2507153
Comerciales No-Cat	0	16268.9	1829.4	2197.4	90336	835212
Comerciales Diesel tipo 1	51.6	285.7	82.1	732.6	45586	589741
Motocicletas 2 tpos. convencional	0	352	163.7	0.6	498	15470
Motocicletas 4 tpos convencional	0	2234.9	164.8	12.4	3575	88839
TOTAL	1491.5	128608.8	12947.8	34378.6	2064128	18143391

El efecto combinado de emisiones evaporativas y por partidas en frío representa un 43% de las emisiones totales de HC generadas por fuentes móviles. Este importante impacto en el Inventario de Emisiones depende de varios factores que participan en el procedimiento de cálculo, tales como el largo medio de viaje para las categorías vehiculares involucradas, su velocidad promedio de desplazamiento, la presión de vapor del combustible (PVR), la temperatura ambiente, la relación entre las tasas de emisión frío/caliente, etc., según se ilustra en la Tabla 4.

Tabla 4. Modificaciones de los parámetros controladores en el cálculo de emisiones por partida en frío y evaporativas, Inventario de Emisiones 2000, VLP-VLC-taxis a gasolina

Parámetro de control	Categoría	CO [ton/año]	HC [ton/año]	NOx [ton/año]
Largo medio de viaje +10%	Part_ frío catalíticos	12686	1861	1755
	Part_ frío no-catalíticos	33467	1764	123
Largo medio de viaje +30%	Part_ frío catalíticos	10595	1567	1480
	Part_ frío no-catalíticos	28701	1475	106
Velocidad media +10%	Part_ frío catalíticos	14629	2029	2047
	Part_ frío no-catalíticos	31529	1774	128
Velocidad media -10%	Part_ frío catalíticos	12794	1992	1735
	Part_ frío no-catalíticos	40885	2057	134
Efrío/Ecal -20%	Part_ frío catalíticos	10350	1552	1292
	Part_ frío no-catalíticos	23627	1123	132
PVR -10%	Evaporativas catalíticos	--	729	--
	Evaporativas no-catalíticos	--	4874	--
Situación Base	Part_ frío catalíticos	13730	2009	1893
	Part_ frío no-catalíticos	35850	1908	132
	Evaporativas catalíticos	--	858	--
	Evaporativas no-catalíticos	--	5642	--

Los resultados indicados en la Tabla anterior permiten identificar aquellas variables de mayor relevancia en la calibración del modelo. Los parámetros relacionados con partidas en frío no deberían afectar las emisiones de fuentes móviles más de un 3% (CO, HC y NOx), si se modifican dentro de los rangos indicados en la Tabla 4. El parámetro más relevante hasta el momento resulta ser la presión de vapor del combustible, la cual podría afectar en un 5% las emisiones de HC de fuentes móviles si el PVR de la gasolina disminuye en un 10%.

6. CONCLUSIONES

- La metodología de cálculo presentada en este trabajo permite obtener emisiones másicas de contaminantes atmosféricos, a partir de información vial que represente la actividad vehicular en áreas urbanas. El cálculo se basa en la utilización de factores de emisión de contaminantes mediante un esquema metodológico *bottom-up*.
- Esta metodología está contenida en un programa especializado (MODEM) que permite obtener emisiones de contaminantes específicos asociados a distintas categorías vehiculares, generando resultados en base horaria, diaria o anual; a escala de arco vial, comuna o del Gran Santiago.
- Los contaminantes considerados en MODEM son material particulado respirable (MP₁₀), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), metano (CH₄), amoníaco (NH₃), óxido nitroso (N₂O), así como consumo de combustible (CC) y nivel de actividad vehicular (NA). Las emisiones de CO₂ y SO₂ se estiman directamente a partir de los consumos de combustible.
- Como futuras aplicaciones, MODEM se utilizará para:
 - Evaluación de escenarios de proyectos específicos en la Región Metropolitana

- Análisis del cumplimiento de las metas ambientales requeridas para el sector transporte
- Generar inventarios de emisiones vehiculares en ciudades intermedias del país
- Interactuar con modelos de dispersión primarios y fotoquímicos
- Interactuar con herramientas metodológicas de SECTRA (MUSSA, MODEC, AARTE)
- Aplicación en ciudades de otros países, en combinación con modelos internacionales (IVE)

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada en base a los estudios de la Unidad de Medio Ambiente y Energía para el Transporte de SECTRA. Agradecemos a esta institución por facilitar la realización de este trabajo. También se agradece la colaboración de la Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT) del MOPTT en la ejecución del estudio MODEM.

REFERENCIAS

- ACEA (1998) Directive on Emission from Passenger Cars and Light-Duty Commercial Vehicles. **European Automobile Manufacturers Association N°164**, Brussels
- André M, Hammarstrom U. (1999) Driving Speeds in Europe for Pollutant Emissions Estimation. **Proceedings of the 8th International Symposium Transport and Air Pollution**, pp. 181–192, Graz, Austria
- Baldasano J.M. (1998) Guidelines and formulation of an upgrade source emission model for atmospheric pollutants. **Air Pollution Emissions Inventory, ISBN-1-853125172 Computational Mechanics Publications**, pp. 1–49. Southampton, UK.
- Cadle S.H., Stephens R.D. (1994) Remote Sensing of Vehicle Exhaust Emissions. **Environmental Science**, Vol. 28, N°6
- Calvert J.G. (1993) Achieving Acceptable Air Quality: Some Reflections on Controlling Vehicle Emissions. **Science**, vol. 261
- Colls J. (1996) Air Pollution, an introduction. E&FN Spon; UK
- CENMA (2000) Mejoramiento del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana. **Informe Final, CONAMA-RM**, Santiago, Chile
- Corvalán R., Osses M., Urrutia C. (2002) Hot emission model for mobile sources: application to the Metropolitan Region of the city of Santiago, Chile. **Journal of the Air & Waste Management Association**, ISSN 1047-3289, Vol. 52, N°2, pp. 167-174
- De Cea J., Fernández J.E. (1993) Transit assignment congested public system. An Equilibrium Model. **Transport Sci.**, 27(2) 133-147
- Elsom D.M. (1992) Atmospheric Pollution, a Global Problem (Second Edition). **Blackwell Publishers; ISBN 0-631-18539-9**, UK
- Fernández J.E., De Cea J. (1990) An application of equilibrium modeling to urban transport planning in developing countries. The case of Santiago of Chile. **Operational Research 90**, Pergamon, Elmsford, NY
- Fresard F., Osses M. (2001) Topographical effects on global emissions from mobile sources. Seventh International Conference on Urban Transport and the Environment; **Urban Transport VII**, WIT Press, ISSN 1462-608X, pp. 521-534, Wessex, UK

- Lenz H., Cozzarini C. (1999) Emissions and Air Quality. **Society of Automotive Engineers, Inc.; ISBN 0-7680-0248-6; SAE R-237; USA**
- ECE (1999) Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. **European Commission sponsored project in the framework program in the area of transport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg**
- Ntziachristos L., and Samaras Z. (2000) Copert III Computer Program to calculate emissions from road transport. **Technical Report N°49; Methodology and emission factors version 2.1, Copenhagen**
- Pearson J.K. (2001) Improving Air Quality, Progress and Challenges for the Auto Industry. **Society of Automotive Engineers, Inc.; ISBN 0-7680-0236-2; SAE R-232; USA**
- Programa de Inventario México (2001) Volumen VI: Desarrollo de Inventario de Vehículos Motorizados. URL: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/lea-02sp.html>
- Samaras, Z., Zachiaradis, T. (1999) Speed dependent representative emissions factors of catalyst passenger cars and influencing parameters. **Proceedings of the 8th International Symposium Transport and Air Pollution, pp. 159–168, Graz, Austria**
- Sams T., Cartellieri W., Moser F. (1999) Exhaust Emission Reduction Strategies for Commercial Vehicle Engines. **Proceedings of the 8th International Symposium Transport and Air Pollution, pp. 13–25, Graz, Austria**
- MIDEPLAN (2002) Actualización del Modelo de Cálculo de Emisiones Vehiculares. **Informe Final, preparado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile para SECTRA-MIDEPLAN, Enero 2002**
- Tong H.Y., Hung W.T., Cheung C.S. (2000) On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. **Journal of Air and Waste Management Association; Vol 50 N° 4; pp. 543-554**
- Vanke J. y Bidgood J.F.S. (1992) Remote sense of vehicle emissions - principles and potencial. **Proceedings of the 24th Fisita Congress, The Vehicle Environment, vol 2, London**
- Vlieger (1997) On-board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol – driven passenger cars. Pergamon Press, **Atmospheric Environment; Vol 31 N° 22; pp. 137–145, UK**