



---

---

# ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL SUBMODELO EFECTOS AMBIENTALES DEL HDM-4

Sandra Torras Ortiz  
Rodolfo Téllez Gutiérrez  
Juan Fernando Mendoza Sánchez

Publicación Técnica No 266  
Sanfandila. Qro. 2005



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Análisis paramétrico del submodelo Efectos  
Ambientales del HDM-4**

**Publicación Técnica No. 266**  
**Sanfandila, Qro, 2005**



Este trabajo fue elaborado por la M en I Sandra Torras Ortiz; el M en C Rodolfo Téllez Gutiérrez y el M en C Juan Fernando Mendoza Sánchez, de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

Se agradecen las valiosas observaciones y la información proporcionada por el Ing Mauricio Salgado, del Instituto Panamericano de Carreteras, así como las sugerencias del M en I Ricardo Solorio Murillo y el M en I Roberto Israel Hernández Domínguez, investigadores del Instituto Mexicano del Transporte.

Se hace un especial reconocimiento a los funcionarios de la Dirección General de Conservación de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes por sus comentarios a esta investigación considerándolo de importante utilidad para el sector.



# Índice

---

Resumen		v
Abstract		vii
Resumen ejecutivo		ix
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Problemática ambiental mundial y nacional del Sector Transporte	3
Capítulo 3.	Aspectos básicos del HDM-4	15
Capítulo 4.	Descripción del submodelo Efectos Ambientales	25
Capítulo 5.	Estimación de emisiones con el HDM-4	39
Capítulo 6.	Conclusiones	53
Bibliografía		55
Anexo 1	Emisiones anuales por vehículo en el tramo Amealco – Coroneo para alternativa de conservación 1	59
Anexo 2	Emisiones anuales por vehículo en el tramo Amealco – Coroneo para alternativa de conservación 4	63



## Resumen

---

En el presente estudio se analizan los parámetros que conforman el submodelo de efectos ambientales del Sistema para el Desarrollo y Gestión de Carreteras (*Highway Development and Management System*), conocido por las siglas HDM-4, específicamente el módulo para el cálculo de la cantidad de emisiones.

En el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se han realizado análisis de sensibilidad de diversos submodelos o módulos del HDM-4, sobre todo en la relación de costos de operación, que a diferencia de los realizados por el Banco Mundial y otros organismos, utilizan valores apropiados para la realidad nacional. Sin embargo, el submodelo “Efectos Ambientales” aún no ha sido analizado para su posible aplicación en el país.

Partiendo de resultados de los estudios mencionados y atendiendo a la necesidad de considerar los efectos ambientales dentro de las políticas del Sector Transportes en el país, la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se avoca en este documento a analizar el potencial uso del submodelo para el cálculo de emisiones generadas por la operación del transporte carretero.

Se incluyen aspectos generales del modelo HDM-4 en su versión 1.3 y de sus posibilidades de aplicación, además de una descripción del submodelo Efectos Ambientales y los parámetros que requiere para la cuantificación de emisiones.

Con el uso del modelo de efectos ambientales incluido en el HDM-4, se tiene la posibilidad de conocer la cantidad de emisiones generadas en la red o segmento de la misma, por la operación del transporte carretero sobre la misma.

Además de las emisiones anuales totales y por vehículo, se puede también analizar la variación anual neta de las emisiones, como consecuencia de las distintas obras y alternativas de construcción con un caso base (sin proyecto o mínimo), que normalmente representa el estándar mínimo de conservación rutinario.

El potencial de esta información es evidente al considerar que hoy en día es ampliamente reconocido que la eficiencia energética, y los efectos ambientales deben ser considerados en los análisis de políticas y proyectos, por lo que los tomadores de decisiones debieran ser capaces de entender las implicaciones energéticas e impactos negativos ambientales de dichas actividades.

Se concluye que la implementación del cálculo de emisiones con el submodelo Efectos Ambientales como parte integral del HDM-4, permitiría incluir la variable ambiental en el proceso de toma de decisiones, pudiendo incluso convertirse en un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire.



## Abstract

---

This paper aims to analyze the structure of the sub model Social and Environmental Effects (SEE), included in the version 1.3 of the Highway Development and Management System (HDM-4).

Several studies have been carried out describing other sub models within the HDM-4 and regional experiences using this tool to manage road networks as well. Recently the Mexican Institute for Transportation (IMT) published a study concerning sensibility analysis of asphalt pavement deterioration model for Mexican conditions. However, this is the first attempt to analyse the potential use of the SEE in Mexico.

Even though the SEE includes the analysis of the energy balance and the vehicle emissions, only the latter will be considered in this paper due to the lack of information concerning energy expenditures for relevant activities in Mexico.

In spite of the fact that the model doesn't provide accurate results because of the use of aggregated data and several simplifications in the model when representing the emission formation processes, it is concluded that the potential in the use of the SEE as an integral part of the HDM-4 is large, even more when the mechanisms and tools to calculate emissions from road transport are either too expensive or too complex to implement.

It is also desirable to conduct other studies in order to calibrate the model, activity which requires a concerting effort from society, government and researchers due to the costs involved.

Nevertheless, the benefits obtained could match or even surpass the costs, especially if externalities are taken into account.



## Resumen ejecutivo

---

Los efectos del cambio climático son cada vez más observables al alterar ecosistemas de tal manera, que es ya cuestionable su capacidad de adaptarse a las nuevas condiciones.

Hoy en día es común escuchar en los medios de toda índole conceptos relacionados con problemas ambientales, como calentamiento global; inusitado aumento de temperaturas en diversas partes del planeta; adelgazamiento de la capa de ozono; y cambio climático, entre otros.

Es así evidente el crecimiento de la preocupación en el ámbito mundial por la cada vez más visible degradación ambiental, y la amenaza que esto representa para el bienestar de la población actual y las generaciones futuras; la mayoría de las naciones industrializadas y en vías de desarrollo han fortalecido sus políticas ambientales en aras de reducir esta tendencia.

El transporte presenta amenazas importantes para la salud humana, el medio ambiente e incluso para la economía si se toman en cuenta los problemas de salud y de congestión vial.

Dentro del Sistema de Gestión de Pavimentos HDM-4, se desarrolló el submodelo Efectos Ambientales, que incluye la predicción de emisiones vehiculares a través de un análisis del balance energético, la relación entre las emisiones de los vehículos, el impacto a la salud y al medio ambiente, además del consumo de energía y ruido del tráfico, aunque estos no se considerarán para el presente trabajo.

El modelo de emisiones de vehículos determina los efectos en términos de cantidades del agente contaminador, cambios en las características de las carreteras, congestión del tráfico, y tecnología del vehículo.

Para cada tipo de sección y para cada año analizado, las cantidades de cada componente de emisiones emitidas se capturan por separado para cada tipo de vehículo y para cada tipo de flujo de período. La cantidad total anual de emisiones se obtiene sumando todos los tipos de vehículos.

El modelo considera únicamente las siguientes emisiones primarias: monóxido de carbono (CO); dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>); dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); hidrocarburos (HC); plomo (Pb), y las partículas suspendidas (también llamadas en la literatura especializada PM, por sus siglas en inglés *Particulate Matter*).

El modelo para el cálculo de emisiones del HDM-4 está diseñado para hacer estimaciones comparativas de las cantidades de emisiones generadas por diferentes opciones de mejora y mantenimiento. Considerando el grado de sofisticación y de incorporación de datos, el modelo contenido en el HDM-4 para predecir la cantidad de emisiones generadas por la operación del transporte, puede considerarse como un modelo a escala meso – macroscópica.

A diferencia de otros modelos, el HDM-4 realiza una comparación en cuanto a nivel de emisiones entre dos proyectos de mejora de una carretera y no entre dos vehículos, motivo por el cual se construyó el modelo con base en la predicción de niveles de emisión promedio.

El modelo se basa en el propuesto por Hammerstrom (1995) y predice las emisiones del escape de los vehículos en función del consumo de combustible y de la velocidad. El consumo de combustible está en función de la velocidad del vehículo, que a su vez depende de las características del camino. De esa manera es posible analizar el cambio en la cantidad de emisiones como resultado de la implementación de diferentes estrategias de mantenimiento y mejora de un camino, o cuando hay cambio mayores en la flota vehicular usando la red carretera.

Otro ejemplo de uso es el que se presenta en México al reducirse los contenidos de azufre de las gasolinas que se venden en el país.

Con el fin de ejemplificar la forma en que se obtiene la cantidad de emisiones generadas por la operación del transporte carretero con ayuda del HDM-4, a continuación se presenta la aplicación del modelo para un tramo real de una carretera mexicana.

La flota vehicular utilizada en este estudio se integró con los siete tipos de vehículos aforados anualmente por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT en la red federal de carreteras del país.

En el estudio se analizan dos escenarios. El primero considera la implementación de diferentes variables de conservación en el tramo de estudio. Con lo anterior se pretende visualizar los cambios que hay en la cantidad de emisiones generadas por los vehículos cuando se implementan medidas para mejorar las condiciones de operación de la carretera.

Para el segundo escenario se aprovecha la oportunidad que presenta la introducción de nuevos combustibles con menores contenidos de azufre, de acuerdo con las nuevas disposiciones en materia regulativa que entrarán en vigor en los próximos años en México. Se observan gráficamente los ahorros en emisiones que se tendrán específicamente en el tramo en estudio.



Se definen tres diferentes variables de conservación; bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8; bacheo, reconstrucción para IRI = 8 y sobrecarpeta para IRI=5; bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8 y sobrecarpeta para IRI=5.

Con estos datos se realizó el cálculo de emisiones con el HDM-4. Se hace notar que al configurar la ejecución del análisis de proyectos, el modelo de emisiones debe ser incluido para así obtener las emisiones generadas.

Una vez realizado el análisis, el programa permite generar tres tipos de reportes:

1. Emisiones anuales por vehículo
2. Resumen de emisiones anuales
3. Cambio neto anual en emisiones

De los resultados analizados se pudo observar que:

a) La mayoría de las emisiones de HC y CO provienen de los vehículos tipo A. Esto se debe en esencia a que los factores de emisión para los vehículos que utilizan gasolina como combustible tienen valores relativamente más elevados.

b) De igual manera los vehículos pesados con uso de diesel, son la categoría de fuente más significativa en cuanto a emisiones de NOx, PM, CO y CO<sub>2</sub>. Ello se debe a que los factores de emisión de estos contaminantes para dichos vehículos son considerablemente mayores que los correspondientes a vehículos ligeros y pesados a gasolina.

c) En las alternativas de conservación 2 y 3 se sobreponen, debido a que la implementación de la alternativa 3 de conservación no representa ahorros adicionales en cuanto a emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono, ambas ligadas al consumo de combustible.

d) Se pone en evidencia que los vehículos T2-S3, T3-S3 y T3-S2-R4 contribuyen con el 60% del total de las emisiones de SO<sub>2</sub>.

Es evidente que el modelo no representa de manera detallada la cantidad y naturaleza exacta de las emisiones generadas, y el grado de incorporación de la información es considerable.

Sin embargo, es de resaltar que el modelo muestra una idea aproximada de las implicaciones ambientales del deterioro de las condiciones de la red carretera, lo que genera un aumento en el consumo de combustible, costos para el usuario y por ende, de las emisiones emitidas a la atmósfera.

Además de lo anterior, el HDM-4 ofrece la oportunidad de utilizar información para otro módulos, como el de efectos para los usuarios (ver párrafo 4.2.4), cuya relevancia es vital para la definición de estrategias de conservación de una red carretera, e integrarla en el módulo de efectos ambientales.

Lo anterior permite obtener información del comportamiento ambiental en cuanto a la generación de emisiones contaminantes, con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada adicionales a los que se requieren para un análisis de proyecto dentro del mismo programa.

La comparación relativa de emisiones es también una característica a resaltar, ya que permite comparar entre las consecuencias de las distintas obras y alternativas de construcción con un caso base.

Por lo anterior, sería recomendable implementar en lo posible su uso e integración dentro de las políticas de conservación en las redes que usan el HDM-4 como herramienta de gestión.

# 1 Introducción

---

El propósito del presente documento es analizar la estructura del submodelo Efectos Ambientales, incluido en el Sistema para el Desarrollo y Gestión de Carreteras (*Highway Development and Management System*), conocido por las siglas HDM-4, en su versión 1.3.

Se decidió estudiar el submodelo como un complemento a los trabajos que ha desarrollado el IMT sobre los análisis de sensibilidad de otros submodelos que conforman el *software*, con el objetivo de utilizarlo como una herramienta para el cálculo de emisiones generadas por la operación del transporte en carreteras, según las características físicas de la infraestructura.

En el capítulo 2 se presenta un análisis de la problemática ambiental en el ámbito nacional e internacional, y del relevante papel que juega el Sector Transporte ya que es el origen de un alto porcentaje de los contaminantes que se liberan a la atmósfera, contribuyendo así en gran medida al deterioro de la calidad ambiental del aire.

Se incluyen algunas de las medidas que ha emprendido el Gobierno Mexicano para contrarrestar el aumento de emisiones, siendo estas medidas principalmente de naturaleza normativa y algunos instrumentos de monitoreo que permiten evaluar de manera cuantitativa el desempeño de la política ambiental en el país.

En el capítulo 3 se mencionan aspectos fundamentales del Sistema de Gestión de Pavimentos, haciendo hincapié en que no es el objeto de este documento el analizar el funcionamiento y aplicación integral del modelo HDM-4; sin embargo, se proveen diversas fuentes de información para profundizar en el tema en la sección de bibliografía.

En el capítulo 4 se describe el submodelo Efectos Ambientales, sus principales variables e interacción con el resto de los módulos del HDM-4. Se describen las emisiones contaminantes consideradas dentro del modelo, así como sus principales características y daños potenciales al medio ambiente.

También se presentan las ecuaciones para el cálculo de emisiones, y comentarios acerca de las limitaciones y ventajas del modelo.

El capítulo 5 trata acerca de los resultados del cálculo de emisiones para un tramo real de una carretera mexicana, así como del comportamiento de las emisiones cuando se implantan diferentes alternativas de mejora.

Finalmente, en las conclusiones se discuten los resultados, y se analizan posibles propuestas para proyectos de investigación futuros en este rubro.

## **2 Problemática ambiental mundial y nacional del Sector Transporte**

---

Hoy en día es común escuchar en los medios de toda índole, conceptos relacionados con problemas ambientales, como calentamiento global; inusitado aumento de temperaturas en diversas partes del planeta; adelgazamiento de la capa de ozono; cambio climático, entre otros.

Es así evidente el crecimiento de la preocupación en el ámbito mundial por la cada vez más visible degradación ambiental, y la amenaza que esto representa para el bienestar de la población actual y las generaciones futuras. La mayoría de las naciones industrializadas y en vías de desarrollo, han fortalecido sus políticas ambientales en aras de reducir esta tendencia.

### **2.1 Panorama mundial**

La contaminación atmosférica ha sido uno de los principales temas en las agendas políticas mundiales desde fines de los 70's, ya que si bien antes de este periodo se pensaba que las actividades antropogénicas eran responsables en gran medida de modificaciones negativas en el medio ambiente, fue hasta ese momento en que se contó con la evidencia científica para sustentar dicha aseveración, y de su impacto en una escala global.

Ahora generalmente se acepta que hay una urgente necesidad de reducir las emisiones a la atmósfera, debido a los considerables daños causados por la contaminación atmosférica.

Como resultado de la Cumbre de Johannesburgo para el Desarrollo Sustentable en el 2002, se definió una visión amplia y a largo plazo de lo que es el futuro de la conservación del medio ambiente en el planeta, pero se reconoce también que los objetivos a largo plazo no deben significar posponer actuar ahora, por lo que se requiere implementar políticas ambientales con una perspectiva más allá de la fecha planeada para la próxima revisión de tratados internacionales y de las fronteras de cada país.

La reticencia de algunos países a ratificar el Protocolo de Kyoto argumentando sus opositores, que la reducción de emisiones podría imponer una carga económica inaceptable en consumidores y productores. Estudios recientes (Gatto, M. 2002) muestran que si los costos en términos del daño a la salud humana, a los bienes materiales, a la agricultura y al medio ambiente ocasionados por la liberación de gases de efecto invernadero, se incluyen en el balance, los argumentos económicos en contra del Protocolo de Kyoto no tendrían fundamento, incluso si se considerasen únicamente los daños locales (lluvia ácida, enfermedades respiratorias ligadas a la contaminación atmosférica), dejando fuera del análisis las

afectaciones a nivel mundial, debido al calentamiento global del planeta y la controversia que este tema plantea por el alto grado de incertidumbre que aún presenta, a pesar de los recientes avances en la materia.

En el último reporte Estado y Perspectivas del Medio Ambiente Europeo, producido por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, por sus siglas en inglés *European Environment Agency*) se concluye que se han logrado avances importantes en la materia, destacando el entendimiento intuitivo de la población europea de que la protección ambiental y el crecimiento económico no son mutuamente excluyentes, se ve confirmada con estudios de muestreo que señalan que la gran mayoría de los europeos (más del 70%) quieren que los tomadores de decisiones den el mismo valor a políticas ambientales, sociales y económicas (Eurobarometer, 2005).

De igual manera, con la introducción del catalizador se han podido reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno provenientes del transporte terrestre hasta en un 90%, comparado a los niveles que se tendría si esta medida no hubiese sido tomada.

Sin embargo, a pesar de los importantes avances alcanzados en la mejora del medio ambiente, se concluye que el desarrollo no sustentable de algunos sectores económicos clave sigue siendo la mayor barrera a vencer para alcanzar más logros en esta área.

Tal es el caso del Sector Transporte, en donde el rápido incremento en la demanda de transporte de pasajeros y carga que se espera en los próximos 30 años, aunado a la dificultad de disminuir la dependencia del petróleo como combustible, sugieren que sea uno de los sectores en el que se debe trabajar intensivamente a fin de mejorar su desempeño ambiental.

Si bien se reconoce la necesidad de transportación como una parte ya inherente a nuestra civilización, la evidencia señala a este sector como el responsable en gran medida del deterioro ambiental, siendo las zonas urbanas en donde los daños derivados de la contaminación atmosférica son más severos, ya que es aquí donde la densidad del tránsito es mayor que en zonas rurales (Berkowicz, 1997).

No obstante, es importante señalar que los efectos de la contaminación ambiental deben considerarse ya no solamente a una escala local o regional, sino más allá de las fronteras del país que origina las emisiones. Lo anterior ha obligado a la comunidad mundial a conjuntar esfuerzos para implantar políticas ambientales que permitan revertir el proceso de degradación que experimenta la calidad del aire en la mayoría de las regiones habitables del planeta.

El Sector Transporte se reconoce como el mayor contribuyente de emisiones antropogénicas del gas de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Cifras de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD, por sus siglas en inglés) señalan que éste sector contribuye con aproximadamente

27% de las emisiones en los países miembros. De esta cifra corresponde del 55 al 99% de las emisiones al subsector del transporte por carretera, dos tercios de las cuales son asignadas a los automóviles (Homero et al, 2004).

Si bien en otros sectores de la economía se observan resultados importantes en el aumento de la eficiencia con disminución de emisiones, en el Sector Transporte esto aún no ha sido posible. Los adelantos se ven abatidos por el incremento continuo del parque vehicular y su edad, por lo que se espera que las emisiones aumentaran acorde, con el continuo crecimiento de la actividad del transporte carretero.

Entre las estrategias para disminuir los efectos negativos del transporte, se pretende impulsar mejoras tecnológicas en vehículos y combustibles (por ejemplo, reducción de contenido de azufre a 10 ppm para el 2009 en la UE), a través de impuestos ligados a la producción de CO<sub>2</sub>.

Es indudable la necesidad de hacer conciencia en los usuarios acerca de cómo influyen algunos parámetros de los vehículos en la cantidad de emisiones, como lo es el tamaño, peso, potencia del motor y uso del aire acondicionado, entre otros.

Asimismo, estas políticas de control de emisiones son complementadas con otras de naturaleza urbana, con especial atención a la modificación de patrones de conducta del usuario, mejorando aspectos de planeación vial que permitirían reducir distancias y tiempos de recorrido, así como la progreso continuo de los sistemas públicos de transporte.

Sin embargo, queda como reto para los tomadores de decisiones asegurar que los costos reales de la contaminación se integren a los precios de los productos y servicios, y no como ocurre hasta ahora en que sólo al final de toda actividad productiva se tiene un costo ambiental en forma de daños a la salud, o ecosistemas afectados.

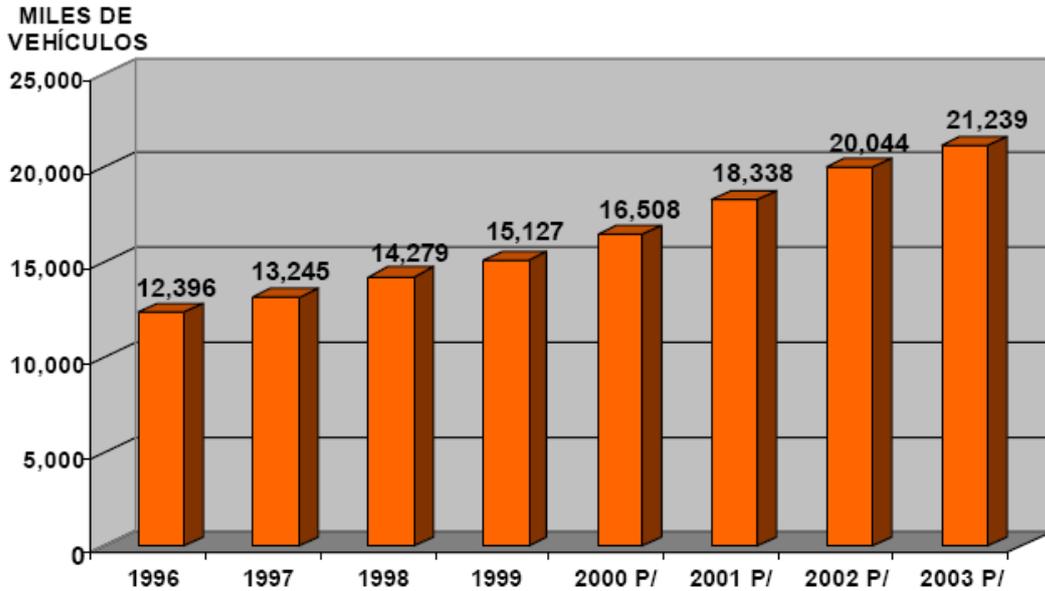
## 2.2 Panorama nacional

Nuestro país no ha sido la excepción del fenómeno mencionado en párrafos anteriores; durante las últimas décadas México ha sufrido profundos cambios económicos y sociales que han venido acompañados de un creciente deterioro de su medio ambiente, y una reducción de sus recursos naturales.

Considerando que el transporte carretero constituye el modo más importante en nuestro país, moviendo la gran mayoría de los pasajeros y carga doméstica a lo largo y ancho del territorio, es evidente la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar cualitativamente los efectos ambientales que ocasiona.

El número de vehículos en el Sector Transporte a crecido de manera continua, duplicándose en un lapso de diez años (ver figura 2.1). Del total del parque

vehicular, corresponde el 67% a automóviles; el 31% a camiones para pasajeros; y el resto a camiones para carga <sup>1</sup>(Figura 2.2).



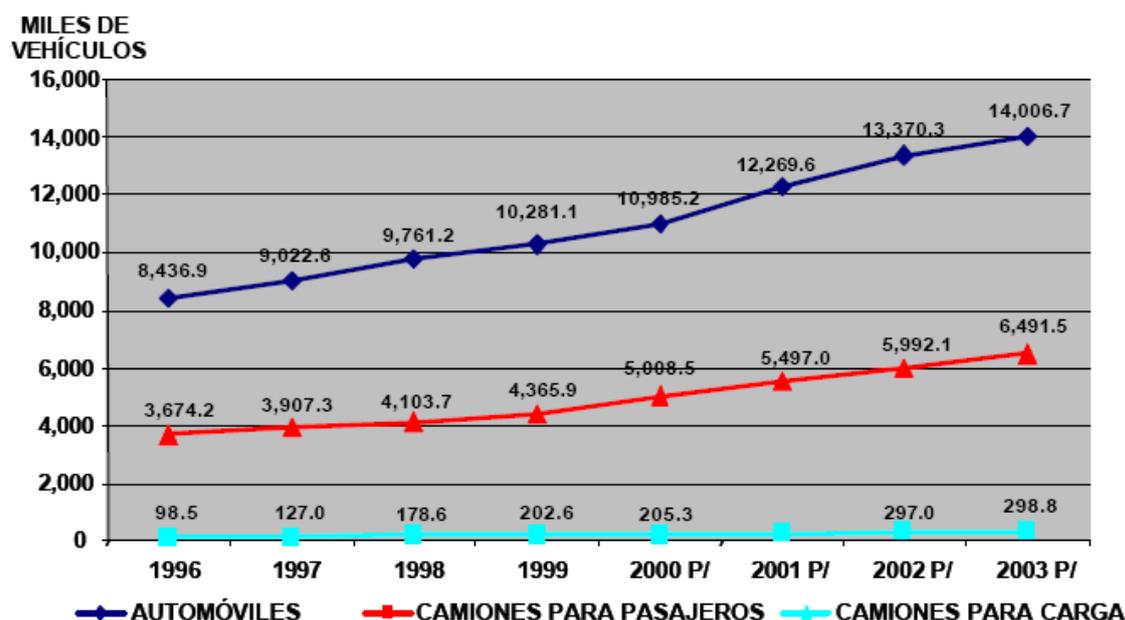
Fuente: INEGI. Con base en cifras proporcionadas por los Gobiernos Estatales. 2005

**Figura 2.1**

**Evolución del crecimiento del parque vehicular en México**

---

<sup>1</sup> Se consideran únicamente los vehículos de motor registrados; según estimaciones conservadoras, el número de vehículos que circulan en el país sin registro asciende a 2,5 millones de unidades.



P/ Cifras preliminares

Fuente: INEGI. Con base en cifras proporcionadas por los Gobiernos Estatales. 2005

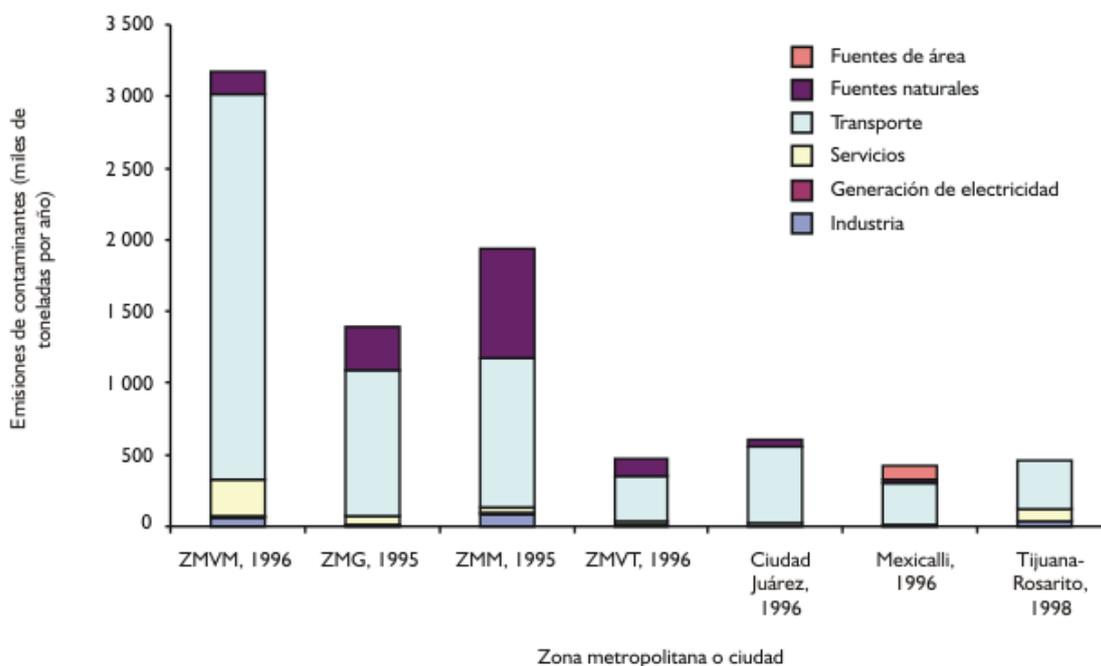
**Figura 2.2**

**Número de Vehículos Registrados según su clase**

En México, como en la gran mayoría del mundo, el Sector Transporte presenta una casi total dependencia de los combustibles derivados del petróleo, siendo aún incipiente el uso de fuentes alternas de energía.

El consumo final de energía en el 2004 fue de 4424 Peta Joules, de los cuales 1911 fueron utilizados por el Sector Transporte (43,2%); y de esta cifra, el 91% corresponde al autotransporte (SENER, 2004).

El transporte contribuye así en gran medida a la contaminación ambiental en el país, siendo el causante de hasta el 87% de las emisiones de contaminantes en algunas ciudades del país, como se muestra en la fig 2.3, donde se presentan resultados de la medición de emisiones por sectores. Estos inventarios, como instrumento de gestión de calidad ambiental, permiten identificar las fuentes más importantes de contaminación, y sería deseable que se evaluaran con una periodicidad de dos años.



Fuente: SEMARNAT Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Manejo Integral de contaminantes. México 2002. México 2003

**Figura 2.3**

**Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuente, en algunas de las principales urbes de México, 1995, 1996 y 1998.**

Sin embargo, las dificultades asociadas a la falta de recursos para este rubro, y la falta de coordinación entre autoridades locales y federales impiden su realización periódicamente.

En el marco del Programa de Estrategias Ambientales Integradas auspiciado el Instituto Nacional de Ecología (INE), McKinley et. al. (2003) estiman el Costo – Beneficio de una serie de medidas para reducir la contaminación ambiental en la Ciudad de México, y concluyen que medidas relacionadas con el Sector Transporte son las más promisorias para un control conjunto de la contaminación local y su contribución a la afectación global.

## 2.2.1 Marco normativo nacional

Existen en México diez Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que tienen por objeto la regulación del sector Transporte como fuente móvil de contaminantes. Las NOM's son el instrumento de regulación de mayor aplicación y cobertura en el país, siendo función de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) su generación, actualización y vigilar su cumplimiento.

Las normas a que hace referencia el párrafo anterior abarcan las emisiones generadas por vehículos, siendo éstos caracterizados por su peso bruto y tipo de combustible empleado; en circulación o nuevos en planta, así como los equipos y procedimientos de medición para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes.

Cabe resaltar que en los últimos años estas normas han sido objeto de análisis por parte no sólo de las entidades reguladoras, sino también por la comunidad científica y la iniciativa privada, lo que ha propiciado su adaptación a las condiciones actuales del país.

Un caso concreto lo constituye la Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003, que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano (HCNM); monóxido de carbono (CO); óxidos de nitrógeno (NOx); y partículas provenientes del escape de vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3.856 kg, que usan gasolina, diesel, gas licuado de petróleo y gas natural; así como las emisiones de hidrocarburos evaporativas procedentes del sistema de combustión de dichos vehículos.

Esta norma entró en vigor a fines del 2005, y refleja la tendencia mundial y la preocupación del Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos por implementar medidas regulativas para reducir los valores límites de emisiones, y así contribuir a la reducción global de contaminantes provenientes del transporte carretero. Para referencia, el valor permisible de CO para vehículos ligeros de la clase 4, fue reducido a casi un tercio del valor vigente para modelos anteriores al 2001.

Este instrumento de regulación contempla también la incorporación gradual de tres estándares con valores aún más estrictos, los cuales consideran un incremento significativo a mediano plazo de vehículos en la flota nacional que satisfagan los límites de emisión definidos por la Norma, y que se muestran en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1**

**Valores límite para vehículos de pasajeros y camiones ligeros<sup>1</sup>**

Vehículo	CO	HCNM	NOX		Partículas suspendidas <sup>2</sup>
			Gasolina	Diesel	
Vehículo de pasajeros	2,11	0,156	0,25	0,62	0,050
CL1 y VU	2,11	0,156	0,25	0,62	0,050
CL2 y VU	2,74	0,20	0,44	0,62	0,062
CL3 y VU	2,74	0,20	0,44	0,62	0,062
CL4 y VU	3,11	0,24	0,68	0,95	0,075

1. Valores en gramos por kilómetro

2. Sólo para vehículos diesel

Nomenclatura:

CL1= Camiones Ligeros con peso bruto vehicular menor a 2.722 kg y peso de prueba menor a 1.701 kg

CL2= Camiones Ligeros con peso bruto vehicular menor a 2.722 kg y peso de prueba entre 1.701 y 2.608 kg

CL3= Camiones Ligeros con peso bruto vehicular entre 2.722 y 3.856 kg y peso de prueba menor a 2.608 kg

CL4= Camiones Ligeros con peso bruto vehicular entre 2.722 y 3.856 kg y peso de prueba entre 2.608 y 3.856 kg

VU = Vehículo de uso múltiple o utilitario

Fuente: NOM-042-SEMARNAT-2003

Cabe señalar que los estándares mencionados entrarán en vigor siempre y cuando el instrumento normativo correspondiente garantice la disponibilidad en el territorio nacional de combustibles, con menor contenido de azufre.

Acorde con lo anterior, a principios del 2006 entrará en vigor la nueva Norma *NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 Especificaciones de combustibles fósiles para la protección ambiental*, la cual contempla los avances de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la mejora de la calidad de sus combustibles desde el punto de vista ambiental.

En particular, es de resaltar la nueva disposición en cuanto al contenido de azufre donde la NOM establece un máximo hasta de 250 ppm y 500 ppm para gasolina y diesel, respectivamente (dependiendo de la región del país y el tipo de gasolina). Además, se tiene considerado que para enero del 2009 se podrá contar con gasolinas con un contenido promedio de 30 ppm y de 15 ppm en el diesel.

En lo que respecta a las gasolinas con plomo, aditivo que se adiciona para incrementar el octanaje, PEMEX inició desde 1996 la introducción de gasolinas sin plomo, dejando de comercializar en enero de 1998 la gasolina tipo Nova, la cual aún contenía plomo.

Continuando con el análisis del marco normativo en México, aún cuando la NOM vigente establece los valores permisibles de emisiones para vehículos nuevos con peso bruto mayor a 3.856 kg está en revisión, desde febrero del año 2003 los vehículos importados a México deben cumplir con las especificaciones contenidas en las Normas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, denominadas EPA 1998; EPA 2004; o en las Normas Europeas, denominadas EURO III; EURO IV (DOF, 2003).

Finalmente, se está trabajando en la actualización de límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación, así como en la mejora o adaptación de métodos de medición y verificación.

## 2.3 Externalidades ambientales

Se le llama externalidad de una actividad al efecto indirecto de la realización de la misma sobre otras entidades, a la cual puede asociársele un costo o beneficio económico y donde no existe ningún tipo de compensación o pago entre las partes.

Las externalidades del transporte más relevantes son los congestionamientos, los accidentes (excluyendo los costos ocasionados únicamente por el usuario), y las de naturaleza ambiental, que abarcan una amplia gama incluyendo el impacto en la salud humana, edificios, ecosistemas, flora y fauna, ocasionado por emisiones de contaminantes, ruido y el calentamiento global del planeta (Nash et al. 2001).

Actualmente la evaluación cuantitativa de los daños ambientales está cobrando mayor relevancia en el ámbito mundial, debido principalmente a que proporciona costos aceptablemente aproximados de daños que anteriormente sólo se

evaluaban cualitativamente.

Esta información sirve en gran medida para diseñar estrategias y políticas a fin de reducir los daños al medio ambiente en todas sus formas, permitiendo incluso analizar las diferentes alternativas posibles para su internalización; es decir, considerar el costo de la externalidad en el precio de la actividad o servicio que la está generando.

Para citar un ejemplo de lo anterior, en estudios realizados en la Unión Europea (UE), se estima que el costo de los daños a la salud producto de la contaminación ambiental oscila entre 305 y 825 miles de millones de euros.

Con base en esas cifras, se está implementando una estrategia temática en contaminación ambiental que pretende obtener beneficios en salud pública equivalentes a 42 miles de millones de euros anuales, que representa cinco veces el costo de implementar la estrategia mencionada, que se estima en el 0,05 % del producto interno bruto (PIB) de la UE-25 (incluyen los países integrados recientemente) o en 7,1 miles de millones de euros al año aproximadamente (EEA, 2005).

Tomando en consideración el ejemplo anterior, es innegable que la identificación, análisis y valoración de las externalidades es un prerrequisito para la introducción de la variable ambiental en el proceso de toma de decisiones.

Son aún pocos los estudios que se han hecho en nuestro país para cuantificar el costo de las externalidades ambientales, sobresaliendo el realizado por la SEMARNAT en un proyecto conjunto con la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), cuyo propósito es evaluar las externalidades ambientales de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles en México.

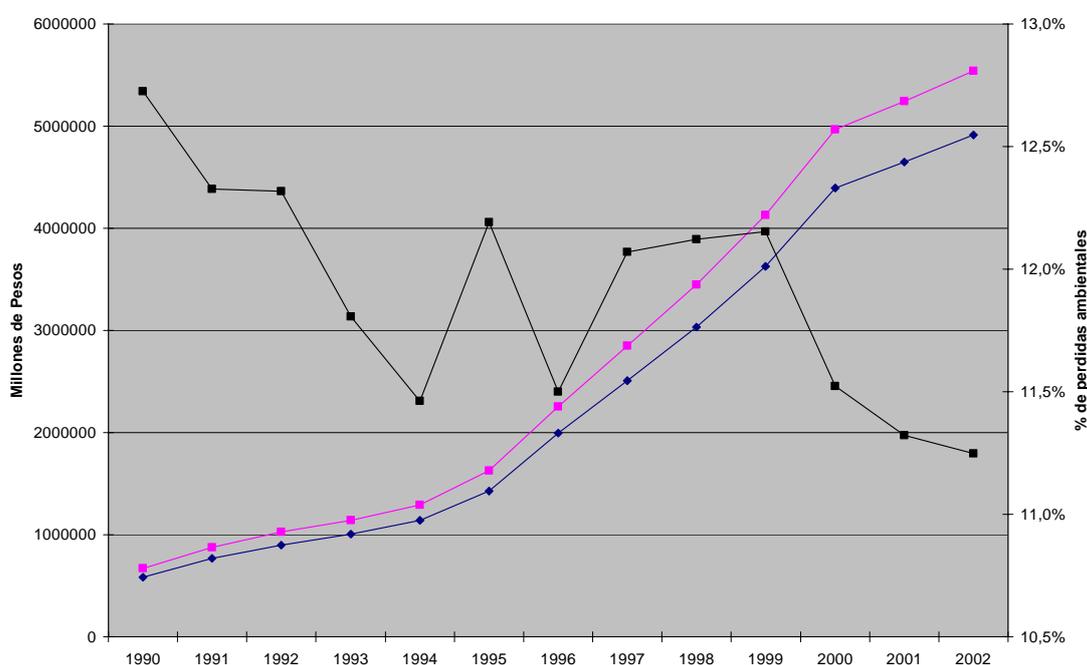
En este estudio se utilizó una versión simplificada de la metodología “vías de impacto” (IPA por sus siglas en inglés, *Impact Pathway Approach*) del proyecto ExternE (por sus siglas en inglés, *Externalities of Energy*).

El estudio estima los costos externos de las plantas seleccionadas en el orden de los 465 millones de pesos con referencia al año 2000, y considerando únicamente el impacto en la salud. El monto equivale al 0,1% del PIB y al 4% del gasto público en salud para el año de referencia, y su internalización implicarían un aumento ponderado de 0,50 USD en el costo de un kilowatt / hora. (SEMARNAT, 2004).

Para el Sector Transporte, Juárez (2003) estima el costo de las externalidades ambientales entre el 5 y 6 % del PIB para un escenario con proyección a 10 y 15 años, siendo los accidentes el aspecto más relevante en ese análisis (entre 3 y 4%).

La política ambiental en México ha tenido avances en áreas importantes tales como el control de la contaminación de la industria, a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y programas como el de las Auditorías Ambientales Voluntarias, o los que se han instrumentado para enfrentar la problemática de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México.

En México el deterioro ambiental tiene también ya una expresión económica, mediante cifras del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), que ofrecen elementos para estimar el costo que significa para la economía nacional la degradación y el agotamiento de los recursos naturales y sistemas biofísicos, y a la vez permite valorar la situación real del país en un escenario de sustentabilidad.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI 2004. Sistema de Cuentas Económicas y Ecológicas de México 2004. México

**Figura 2.4. Evolución del producto interno neto, y producto interno neto ecológico nacional, 1990-2003 (millones de pesos corrientes)**

Con base en metodologías aceptadas internacionalmente se estima el costo o valor económico total de los recursos perdidos en un período determinado. Una vez estimados tales costos, se incorporan como ajuste o deducción en los datos de contabilidad nacional, para calcular el Producto Interno Neto Ecológico (PINE) a partir del PIB y del Producto Interno Neto (PIN). De esta manera se construye el

Sistema de Cuentas Económicas y Ecológicas de México.

En la figura 2.4 se muestra la evolución del PIN a partir de 1990, observándose que el PINE es consistentemente inferior al PIN en un porcentaje comprendido entre el 11 y 13% del PIN, lo que implica que en el 2002 el costo del deterioro ambiental ascendió a más de seiscientos mil millones de pesos.

Los anteriores son sólo algunos ejemplos de los esfuerzos que en materia ambiental se realizan en el país, los cuales han permitido importantes avances en este rubro.

Sin embargo, es también evidente que la problemática es compleja, y que requiere la participación de los diversos sectores y actores involucrados en el transporte,

## **3 Aspectos básicos del HDM-4**

---

En este capítulo se describen brevemente aspectos generales del Sistema para el Desarrollo y Gestión de Carreteras (*Highway Development and Management System*), conocido por las siglas HDM-4.

El HDM-4 es un modelo computacional que simula condiciones económicas y físicas a lo largo de un periodo de tiempo, para una serie de especificaciones y escenarios definidos por el usuario.

No siendo el fin de este documento proporcionar una descripción exhaustiva del modelo en cuestión, se recomienda al lector interesado en profundizar en el tema consultar la bibliografía que se incluyó en este documento.

### **3.1 Antecedentes**

El paso inicial para producir un modelo de evaluación de proyectos de carreteras lo dio en 1968 el Banco Mundial. El primer modelo surgió como respuesta a los términos de referencia para un estudio de diseño de carreteras elaborado por el Banco Mundial. El modelo reasaltaba las áreas donde era necesaria una mayor investigación para proporcionar un modelo que fuese más adecuado para entornos de países desarrollados, con relaciones adicionales específicas de ese entorno.

Posteriormente, el Laboratorio de Investigación en Transporte y Caminos (TRRL, por sus siglas en inglés *Transport and Road Research Laboratory*), en colaboración con el Banco Mundial auspiciaron un importante estudio de campo en Kenia para investigar el deterioro de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que afectan los costos de operación de los vehículos. Los resultados del estudio fueron utilizados para el modelo de Estándares de Diseño y Conservación de Carreteras, al cual se hace referencia como la versión dos del HDM.

En los años subsecuentes se realizaron diversos estudios que proporcionaron nuevos conocimientos en relación con mecanismos de deterioro de carreteras; costos de operación vehicular; problemas de operación; efectos del diseño geométrico en los costos de operación, entre otros. Estos resultados se integraron en el desarrollo del HDM III, el cual concluyó en 1984.

La evidente mejora de la tecnología empleada en la industria automotriz; la existencia de diversos estudios que contribuyeron a conocer mejor el

comportamiento de las obras de infraestructura a través de su vida útil; así como los grandes avances en la capacidad de los medios de cómputo, permitieron que a mediados de los noventa se empezara a trabajar en una nueva versión del HDM, la cual habría de abarcar un espectro más amplio de efectos para los usuarios, como: congestionamientos viales, climas fríos, una gama mas amplia de pavimento, seguridad vial, y efectos medioambientales.

Con este propósito, en 1997 se inició el Estudio Internacional sobre Desarrollo y Gestión de Carreteras (ISOHDM, por las siglas de *International Study of Highway Development and Management*), en el cual participaron organizaciones de diversos países; y en febrero del 2000 se anunció la terminación de la versión 1.0 del HDM-4.

La versión 1.3 del HDM-4 utilizada en este estudio incorpora un número importante de mejoras y correcciones, aunque no difiere significativamente de la versión original.

Por su parte, la versión 2.0 se finalizó en junio del 2005 e incluye mejoras en rubros como: herramientas para realizar análisis de sensibilidad; análisis para diferentes escenarios de presupuestos y multicriterio; estimación de beneficios sociales y mejoras en el modelado de emisiones, entre otros.

Aunque no fue factible su uso en este estudio por la fecha de inicio de su comercialización (septiembre del 2005), se pretende incorporar las mejoras señaladas en futuros análisis que se desarrollen en el IMT.

## **3.2 La gestión de carreteras**

Dentro de las aplicaciones del HDM-4, se pueden distinguir cuatro etapas en el proceso de gestión de carreteras:

- a) Planeación
- b) Programación
- c) Preparación
- d) Operaciones

### **a) Planeación**

Comprende el análisis de un sistema de carreteras en su conjunto, requiriéndose la preparación de presupuestos a mediano y largo plazo, incluso a nivel estratégico, de estimaciones de gastos en el desarrollo y conservación del sistema.

Para ello, se consideran diferentes supuestos económicos y presupuestarios,

siendo en esta etapa las características principales del sistema que a continuación se citan:

- Características de la red, la cual incluye parámetros como tipo de camino, flujos vehiculares, estado superficial del pavimento, entre otros;
- Longitud de la carretera en cada categoría;
- Características del parque vehicular que se utiliza en la red.

### **b) Programación**

Esta etapa puede considerarse como una planeación táctica a menor escala, ya que comprende la preparación, bajo restricciones presupuestarias, de programas de gastos y obras de varios años, en los que se seleccionan y analizan tramos de red que necesitan conservación, mejora o nueva construcción.

La actividad de programación produce estimaciones de gastos para cada año, bajo partidas presupuestarias definidas, para diferentes tipos de obras y para cada tramo de carretera.

### **c) Preparación**

Esta es la fase de la planeación a corto plazo, donde los programas carreteros aprobados se agrupan para realizarlos. En esta fase se definen los diseños y se preparan con más detalle, se hacen listas de cantidades y costos detallados, junto con instrucciones para las obras y contratos.

Son actividades típicas en la preparación del diseño detallado de:

- Una definición de esfuerzos( overlay)
- Las obras de mejora de la carretera

Por ejemplo, construcción de un nuevo trazo, ensanche de las carreteras, reconstrucción del firme, etc.

### **d) Operaciones**

Estas actividades cubren la operación diaria de una organización. Las decisiones se suelen tomar diaria o semanalmente, incluyendo la programación de las obras a realizar, monitoreo del trabajo, equipo y materiales, el registro del trabajo concluido y el uso de esta información con fines de monitoreo y control.

Las actividades se centran normalmente en tramos o subtramos individuales de una carretera, con mediciones relativamente detalladas.

Cuando el proceso de gestión avance de la fase de planeación a operaciones,

resulta evidente que el detalle de los datos debe ir aumentando debido al enfoque o escala que se analiza.

### 3.3 Arquitectura del HDM-4

En la Figura 3.21 se muestra la arquitectura del Sistema HDM-4 [Kerali, 2000]

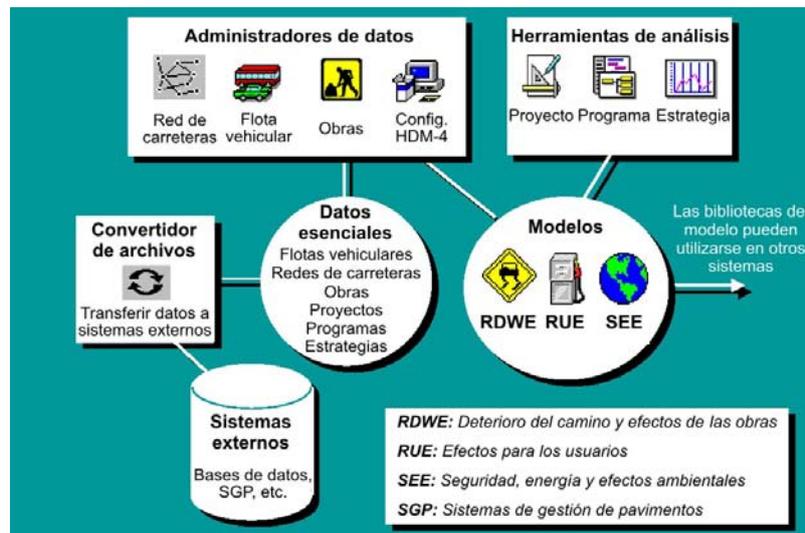


Figura 3.1. Arquitectura del Sistema HDM-4 [Kerali, 2000]

Las herramientas incorporadas al HDM-4 permiten la realización de algunas de las siguientes tareas:

1. Predecir el deterioro del pavimento durante su vida útil
2. Calcular los efectos de acciones de conservación y mejoramiento del pavimento.
3. Estimar costos de operación vehicular y otros, de los usuarios de infraestructura vial.
4. Determinar los efectos de la congestión en la velocidad de operación de vehículos en los costos de operación vehicular.
5. Evaluar proyectos, políticas y programas de conservación en términos

técnicos y económicos, obteniendo los costos y beneficios de cada alternativa considerada y calculando indicadores de rentabilidad como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). En términos generales, los costos incluidos en el análisis corresponden al gasto corriente y de inversión en los que debe incurrir la organización operadora para que se ejecuten las obras; mientras que los beneficios se derivan, principalmente de ahorros en costos de operación vehicular y disminuciones de los tiempos de recorrido, inducidos ambos por el mejoramiento del estado físico de las carreteras y la reducción de la congestión.

6. Optimizar programas de conservación y mejoramiento sujetos a restricciones presupuestales.
7. Calcular los montos de inversión necesarios para mantener determinado nivel de servicio en una red de carreteras, o estimar el nivel de servicio que puede lograrse con un techo financiero dado.
8. Evaluar los efectos de políticas de largo plazo como cambios en las cargas legales del tránsito, estándares de conservación de pavimentos y normas de diseño.

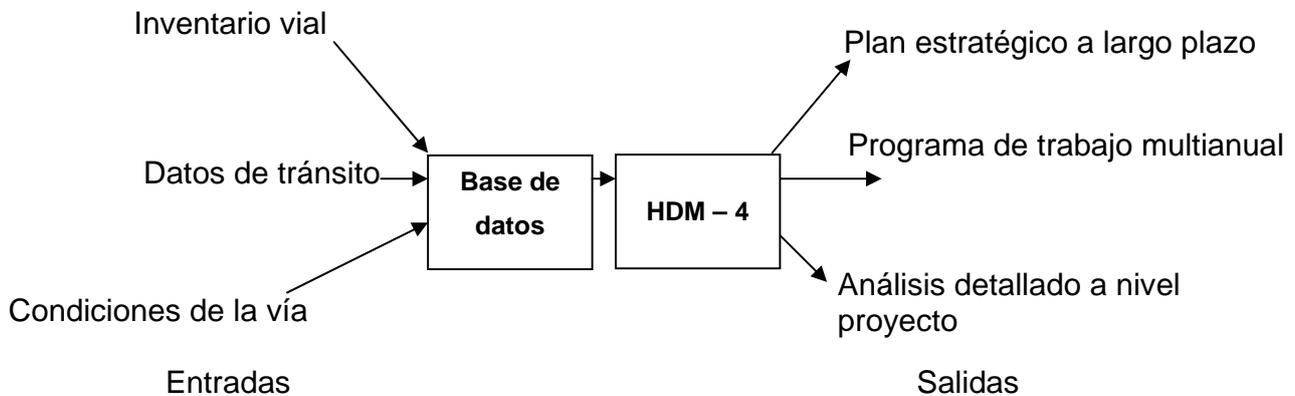
### **3.4 Uso del HDM-4 en un Sistema de Gestión de Carreteras**

Como parte de un conjunto de herramientas para asistir en la toma de decisiones en la gestión de pavimentos, se tienen como retos y expectativas los siguientes puntos:

- Efectos medioambientales (consumo de energía, ruido del tráfico y emisiones de vehículos)
- Modernizar la flota vehicular utilizada en los análisis
- Ampliar el rango de tipos de pavimento y estructuras
- Contemplar los efectos de congestionamiento del tráfico
- Contemplar los efectos del clima frío
- Evaluar aspectos relacionados con la seguridad de las carreteras

El HDM-4 es una herramienta para:

- El análisis y evaluación técnica y económica de proyectos viales a través de comparación objetiva de alternativas
- La planeación y presupuesto de recursos de construcción y conservación de proyectos viales
- La programación de proyectos de conservación programados, o por estándares
- La optimización de recursos disponibles sujetos a restricciones presupuestarias
- La priorización de intervenciones en determinados corredores viales de una red, con base en políticas definidas por la agencia correspondiente
- El seguimiento y control de la eficiencia de trabajos de conservación y mejoramiento, y en general el deterioro de un pavimento
- La estimación de costos y beneficios sociales y privados generados por el desarrollo de un proyecto vial



**Figura 3.2**

### **Implementación del HDM-4 dentro de un Sistema de Gestión**

## 3.4 Aplicaciones del HDM-4

El HDM-4 ofrece tres tipos de aplicaciones:

- Análisis de proyectos
- Análisis de programas de inversión
- Análisis de estrategias

### Análisis de proyectos

El análisis de proyectos se relaciona con la evaluación de uno o más proyectos de carreteras. La aplicación analiza un tramo o corredor carretero con las acciones de conservación seleccionadas por el usuario, y los costos y los beneficios asociados, proyectados anualmente a lo largo del periodo de análisis.

Se puede usar el análisis de proyectos para estimar la variabilidad económica o técnica de los proyectos de inversión de carreteras, considerando los elementos siguientes:

- Comportamiento estructural del pavimento
- Análisis del ciclo de deterioro
- Costos y beneficios del usuario
- Comparaciones económicas

Los análisis típicos incluyen conservación y rehabilitación de carreteras existentes, proyectos de ampliación del ancho de corona, o de rectificación del diseño geométrico y reconstrucción de pavimentos.

En los costos de los usuarios pueden incluirse aspectos relacionados con la seguridad de las carreteras, el consumo de energéticos y los efectos sobre el medio ambiente.

### Análisis de programas

Trata principalmente sobre la asignación de prioridades, a una lista de proyectos considerados para la formulación de un programa de obras anuales o multianual, bajo restricciones presupuestarias definidas.

Una vez identificados todos los proyectos candidatos, la aplicación del análisis del programa del HDM-4 se puede usar para programar los costos del ciclo de vida previstos bajo el régimen existente de conservación de pavimentos, frente a los costos del ciclo de vida previstos para las alternativas de conservación periódica, y mejora de carreteras. Esto proporciona la base para estimar los beneficios económicos que se derivan de incluir todos los proyectos candidatos en el periodo de análisis contemplado por el programa.

### **Análisis de estrategias**

El análisis estratégico comprende redes completas o subredes administradas por una sola organización. Un ejemplo de redes de carreteras, son las redes principales; caminos alimentadores; vías urbanas o municipales; y como ejemplo de subred están las autopistas, y las carreteras pavimentadas o sin pavimentar.

Para presidir las necesidades en el mediano y largo plazo, de toda una red o subred de carreteras, el HDM-4 utiliza una matriz basada en categorías que se definen en función de los atributos clave que influyen en el comportamiento del pavimento y los costos de los usuarios.

Los usuarios pueden definir la matriz de carreteras de manera que represente los factores más importantes que afectan los costos del transporte en el país o región. Una matriz típica de red de carreteras se podría clasificar en función de los siguientes parámetros:

- Volumen de tránsito
- Tipo de pavimento
- Condiciones del pavimento
- Zonas medioambientales o climáticas
- Clasificación funcional

Dentro de las aplicaciones más comunes del análisis estratégico para la administración de carreteras puede mencionarse:

- Prevenciones de mediano y largo plazo de niveles de financiamiento necesarios para cumplir los estándares de conservación para una red de carreteras
- Asignación óptima de recursos según partidas presupuestarias definidas, por ejemplo, conservación rutinaria, conservación periódica, y mejoramiento de red

- Estudios de políticas, como cambios en el límite de la carga por eje, estándares de conservación de pavimentos, análisis del equilibrio energético, tamaño sostenible de la red de carreteras

Considerando que la modelación de todos y cada uno de los vehículos individuales que se pudiesen presentar en el parque vehicular de una entidad, el análisis que se realiza en este modelo es con base en una flota de vehículos representativos, los cuales muestran características que pueden considerarse como representativas del total de vehículos.

## 3.5 Configuración del programa

En la configuración del programa se considera los siguientes conceptos:

### **Modelos de tránsito**

Se utilizan para representar diferentes patrones de intensidad del tránsito que se presentan en un tramo carretero a lo largo del día; esto para considerar el hecho de que diferentes secciones de un mismo camino pueden llegar a presentar diferentes patrones de flujo. Algunos ejemplos son: el modelo estacional, el interurbano, y el de viajeros de cercanías (en inglés, *commuter*).

### **Tipos de flujos de velocidad/capacidad**

Representan las características de capacidad de diferentes tipos de carreteras, siendo necesario incluir parámetros, como la capacidad última, capacidad de tránsito libre, entre otros, que alimentan el modelo para la curva flujo – velocidad. Aquí también se define el índice de accidentalidad y los factores de calibración de velocidad para los tipos de caminos representados.

### **Zonas climáticas**

Usadas para representar las condiciones climáticas en diferentes secciones de la carretera, clasificando las diversas zonas, acorde con las categorías de humedad y temperatura.

### **Divisas**

Se declara una lista de divisas para especificar los costos unitarios de la flota vehicular y de trabajos por omisión, además de las salidas del análisis de proyectos, programas y estrategias.

### **Sección de tablas y datos agregados**

Para permitir una definición de acuerdo con el lugar de estudio de parámetros con valores cualitativos, tales como bueno, regular o malo, HDM-4 incorpora en esta

sección datos y tablas que permiten adaptar los valores.

HDM-4 proporciona para los anteriores conceptos una serie de valores por omisión, los cuales pueden ser modificados conforme a las necesidades del usuario, incluyendo crear nuevas configuraciones particulares para el lugar de estudio.

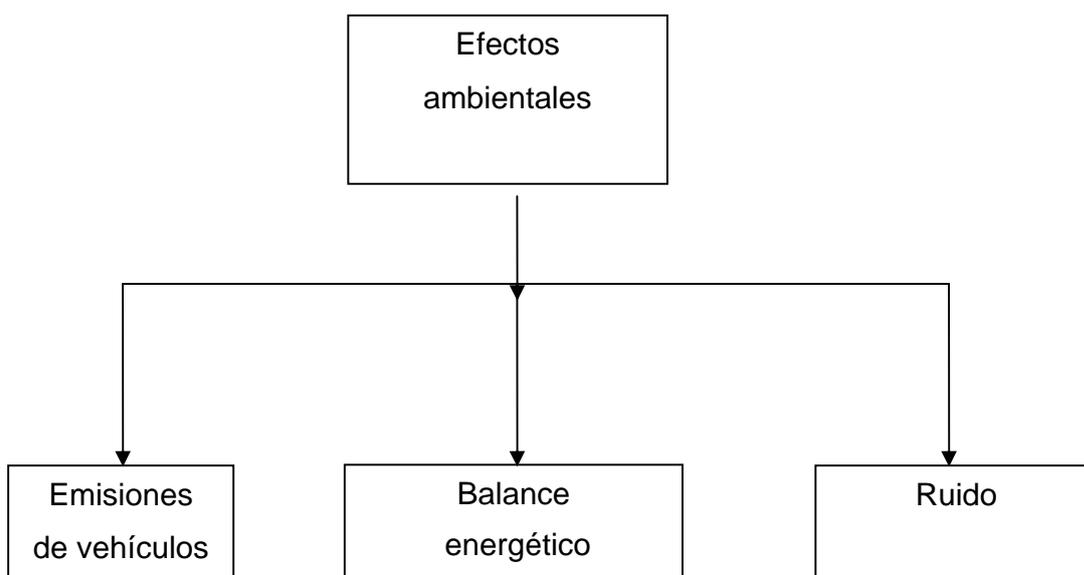
## 4 Descripción del submodelo Efectos Ambientales

---

Como parte integral del HDM-4, el submodelo Efectos Ambientales hace uso de cálculos realizados en otros módulos, además de requerir información específica para este módulo. A continuación se describen sus principales características.

### 4.1 Generalidades

El modelo permite calcular la cantidad de emisiones contaminantes en forma de sustancias químicas y ruido, generadas por la operación del transporte sobre una red carretera o segmento de la misma, así como el balance energético del ciclo de vida de estrategias de conservación, como se ilustra como en la figura 4.1.



**Figura 4.1**

#### **Estructura del submodelo Efectos Ambientales**

Cabe hacer notar que el objeto de estudio de este documento es únicamente el cálculo de emisiones de vehículos, debido a que el módulo de ruido no se ha incluido en el programa (hasta la versión 1.3), dejándose su inclusión para futuras versiones del HDM-4.

En este sentido, se pretende incluir un módulo para calcular niveles de ruido con base en el modelo propuesto por el Departamento de Transporte del Reino Unido, el cual proporciona estimaciones de los niveles de ruido para condiciones de flujo

libre y con congestión en unidades estándares seleccionadas (Bennet, 2001).

En lo que respecta al balance energético, si bien su inclusión en el presente estudio fue considerado en etapas tempranas, después de analizar y valorar los diferentes datos de entrada requeridos por el módulo para calcular el consumo de energía en el ciclo de vida de diferentes estrategias de inversión en mejoras de la infraestructura carretera, se concluyó que esta parte del modelo se dejaría fuera del alcance del estudio.

Lo anterior debido a que en el país la información del consumo energético para muchas actividades relacionadas con actividades es aún escasa o inexistente, como es el caso de la cantidad de energía usada para producir, distribuir el combustible y los vehículos considerados en el análisis, la energía usada para mover y operar el vehículo, entre otros.

## **4.2 Modelo para el cálculo de emisiones de vehículos**

Los vehículos emiten una serie de compuestos químicos como resultado directo del proceso de combustión. La naturaleza y cantidad de estas emisiones depende de una serie de factores que incluyen el tipo, edad y estado de mantenimiento del vehículo, velocidad de desplazamiento, composición del combustible, el estado superficial y la pendiente del camino, así como de las condiciones climatológicas.

Estas emisiones han requerido la atención de investigadores por sus efectos adversos en las construcciones y edificios, acidificación de la precipitación pluvial, afectación de cosechas, contribución al calentamiento global y de manera significativa, el daño a la salud humana.

### **4.2.1 Emisiones consideradas**

Las emisiones pueden clasificarse en primarias y secundarias. Las primeras son las que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidas por la fuente; las secundarias son las que han estado sujetas a cambios químicos, o bien, son producto de la reacción de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera, entre las que destacan los oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono.

El modelo considera únicamente las siguientes emisiones primarias: el monóxido de carbono (CO); el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>); el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); hidrocarburos (HC); plomo (Pb), y las partículas suspendidas (también llamadas en la literatura especializada PM, por sus siglas en inglés *Particulate Matter*).

A continuación se presenta una breve descripción de las emisiones, así como su daño potencial a la salud y al medio ambiente.

### **Monóxido de carbono (CO)**

Es un gas incoloro, inodoro, inflamable y altamente tóxico. Es el contaminante que frecuentemente se encuentra en mayor cantidad en ambientes urbanos, o zonas con alto flujo vehicular.

Se produce cuando se queman materiales combustibles como gas, gasolina, kerosina, carbón, petróleo, tabaco o madera en ambientes de poco oxígeno.

En caso de los vehículos, las emisiones de este contaminante dependen de la afinación de los motores y de la eficacia en la combustión de los procesos industriales; de las condiciones y características del sistema vial; el tráfico y los diferentes medios de transporte. También los vehículos detenidos con el motor encendido liberan, monóxido de carbono.

Al ser inhalado, el CO entra al flujo sanguíneo y reduce el transporte de oxígeno a células y tejidos (cuando se combina con la hemoglobina de la sangre disminuye automáticamente el transporte de oxígeno al cuerpo). También provoca una sobrecarga de trabajo para el corazón. Se asocia con la disminución de la percepción visual, la capacidad de trabajo, la destreza manual y la habilidad de aprendizaje. La población más sensible son las personas con enfermedades cardiovasculares, angina de pecho o enfermedades relacionadas.

Si se respira en niveles elevados, puede causar la muerte por envenenamiento en pocos minutos.

### **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

Tiene diversas fuentes, como emisiones volcánicas, combustión de materia orgánica, y el proceso de respiración de seres vivos.

El dióxido de carbono no atenta directamente contra la salud humana, y es uno de los gases de efecto invernadero que contribuye a que la Tierra tenga una temperatura habitable, siempre y cuando se mantenga en unas cantidades determinadas. Sin dióxido de carbono el planeta Tierra sería un bloque de hielo.

Por otro lado, un exceso impide la salida de calor al espacio y provoca un calentamiento excesivo del planeta, fenómeno conocido como efecto invernadero.

En los últimos años la cantidad de dióxido de carbono ha aumentado mucho, contribuyendo al calentamiento global del planeta.

### **Hidrocarburos (HC)**

Conjunto de sustancias químicas orgánicas que están compuestas únicamente de hidrógeno y carbono; Las emisiones de hidrocarburos se presentan cuando no se queman completamente las moléculas del combustible en el motor, o sólo se queman parcialmente.

Los hidrocarburos reaccionan en presencia de los óxidos de nitrógeno y la luz solar para formar ozono a nivel del suelo, que es uno de los componentes principales del smog.

El ozono irrita los ojos, perjudica los pulmones y agrava los problemas respiratorios. Éste representa nuestro problema urbano más extendido e intratable del aire. También ciertos hidrocarburos del tubo de escape son tóxicos, y tienen potencial para causar cáncer.

### **Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Son compuestos de nitrógeno y oxígeno que se forman en la combustión con exceso de oxígeno y altas temperaturas. En forma genérica son llamados NO<sub>x</sub>, siendo el monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno dos de los óxidos más importantes toxicológicamente.

El monóxido de nitrógeno es un gas a temperatura ambiente de olor dulce penetrante, fácilmente oxidable a NO<sub>2</sub>; mientras que el NO<sub>2</sub> tiene un fuerte olor desagradable.

Los NO<sub>x</sub> son liberados al aire desde el escape de vehículos motorizados (sobre todo diesel y de mezcla pobre), de la combustión del carbón, petróleo o gas natural. Estos contaminantes, por sí, no representan problemas inmediatos para la salud, pero al reaccionar con la luz solar producen compuestos tóxicos.

Son degradados rápidamente en la atmósfera al reaccionar con otras sustancias comúnmente presentes en el aire. La reacción del NO<sub>2</sub> con sustancias químicas producidas por la luz solar lleva a la formación de ácido nítrico, el principal constituyente de la lluvia ácida. El dióxido de nitrógeno reacciona con la luz solar, lo cual lleva a la formación de ozono.

Aún niveles bajos de NO<sub>x</sub> en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones, y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aire, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones 1 ó 2 días luego de la exposición.

### **Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

Es un gas incoloro con un característico olor asfixiante. Este contaminante se genera principalmente por la quema de combustibles que contienen azufre, y por la producción de energía en las plantas termoeléctricas, además de los vehículos automotores. En la naturaleza, el dióxido de azufre se encuentra sobre todo en las proximidades de los volcanes; y las erupciones pueden liberar cantidades importantes.

El dióxido de azufre es el principal causante de la lluvia ácida, ya que en la atmósfera se transforma en ácido sulfúrico, y además es un precursor del ozono troposférico.

El dióxido de azufre y el ozono se asocian a padecimientos como: la conjuntivitis, la disminución de la agudeza visual y enfermedades del aparato respiratorio. También puede provocar reacciones alérgicas. Sus efectos más frecuentes son irritación de la piel, de los ojos y del sistema respiratorio. Puede causar severos daños a los pulmones, como sucede cuando se fija en partículas pequeñas, y de esta forma llega a los alvéolos pulmonares.

Igualmente provoca alteraciones de la mucosa y del epitelio nasal, edema, enfisema en fumadores, así como reactividad bronquial, tanto en fumadores como en personas asmáticas.

En México se han tenido importantes avances en lo que respecta a la venta de gasolinas con bajo contenido de azufre, como ya fue comentado en el párrafo 2.1.1 de este documento.

### **Partículas suspendidas (PM)**

Las partículas suspendidas totales se producen generalmente en las industrias, en los vehículos o por la erosión del suelo. La fracción respirable de las partículas dispersas en la atmósfera, con un diámetro menor a las 10 o 2,5 micras, son también llamadas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> respectivamente.

Por su tamaño, una parte de estas partículas no se filtran en el tracto nasal-oral y pueden llegar hasta las regiones traqueo bronquiales y alveolares de los pulmones. Se asocian al incremento de la mortalidad crónica por causas respiratorias y cardiovasculares, a la bronquitis crónica y a ataques de asma.

Los ancianos, niños y personas que padecen enfermedades pulmonares son los grupos de población que se ha detectado, son más sensibles a este contaminante.

De igual manera, contribuyen al deterioro en materiales de construcción, y otras superficies interfieren en la fotosíntesis y disminuyen la visibilidad en presencia de altas concentraciones.

En los últimos años ha crecido el interés de la comunidad científica en conocer los efectos de la presencia de las partículas suspendidas. Se tiene evidencia de que niveles altos de partículas inhalables ( $PM_{10}$ ) en el medio ambiente, tiene relación directa con la mortalidad causada en la población por diferentes tipos de problemas en las vías respiratorias.

Gustafsson et al (2005) reportan que contrario a lo que se pensaba, una parte importante de las  $PM_{10}$  no se originan a partir de las emisiones del vehículo, sino que provienen del desgaste y resuspensión de partículas provenientes del pavimento, las llantas y los frenos.

### **Plomo (Pb)**

Este es uno de los contaminantes más nocivos en las áreas densamente pobladas con altos flujos vehiculares. Se emite por la combustión de la gasolina en los vehículos y en las fábricas fundidoras. Este contaminante se deposita en el aire y puede llegar a permanecer en forma suspendida durante un largo periodo de tiempo al ser no degradable.

El cuerpo puede absorber plomo a través de las vías respiratorias, del aparato digestivo, o por la piel. El plomo ingresa al cuerpo al respirar aire contaminado, pero también puede ser ingerido mediante el uso de utensilios de cocina elaborados con barro, o en la cerámica vidriada de baja temperatura.

El plomo se asocia a una disminución de las funciones neurológicas y tiene efectos nocivos en el sistema nervioso de los niños, además de afectar órganos como los riñones, el hígado, el cerebro y los huesos.

Existen datos que asocian los niveles altos de plomo en la sangre con la disminución de la inteligencia. Reduce también la asimilación del hierro y el calcio, por lo que se le relaciona con la anemia.

Actualmente en México, desde enero de 1998 se suspendió la comercialización de gasolinas con plomo (ver párrafo 2.1.1 de este documento).

### **4.2.2 Características del modelo**

El modelo para el cálculo de emisiones del HDM-4 está diseñado para realizar estimaciones comparativas de las cantidades de emisiones generadas por diferentes opciones de mejora y mantenimiento.

Considerando el grado de sofisticación y de agregación de datos, el modelo contenido en el HDM-4 para predecir la cantidad de emisiones generadas por la operación del transporte, suele considerarse como un modelo a escala meso – macroscópica.

Este hecho simplifica en gran medida el modelo y permite su relativa fácil

aplicación para casos en que el nivel de detalle en la cuantificación de emisiones requerido no sea muy grande.

Atendiendo a su planteamiento matemático, el modelo se clasifica como mecanístico, ya que utiliza ecuaciones que han sido desarrolladas utilizando fundamentos de la Química y Física, que permiten describir la tasa de emisión de un tipo de fuente en particular.

A diferencia de otros modelos, el HDM-4 realiza una comparación en cuanto a nivel de emisiones entre dos proyectos de mejora de una carretera y no entre dos vehículos, motivo por el cual se construyó el modelo con base en la predicción de niveles de emisión promedio.

Esta comparación podría ayudar a decidir entre diversas estrategias de conservación a la que debería ser usada para un segmento determinado de la red, comparando los beneficios que se obtendrían con la disminución en la cantidad de emisiones generadas debido a la mejora de las condiciones del camino, y el costo de implementar dichas estrategias.

Algunos factores que influyen la generación de emisiones, se enuncian a continuación:

### **Motores de gasolina y diesel**

Entre estos dos tipos de motores hay una variación importante en la cantidad de emisiones generadas, las cuales son consecuencia no sólo de la propia naturaleza de los combustibles, sino también del proceso de combustión, el cual requiere diferentes temperaturas y presiones, generándose así diferencias en cuanto a cantidades y composición de las emisiones.

El HDM-4 toma en cuenta esta diferencia al permitir definir el tipo de combustible que usan los vehículos de estudio.

### **Emisiones en frío y en caliente**

Un factor determinante en el nivel de emisiones producidas por los vehículos es la temperatura del motor. A mayor temperatura la eficiencia del motor aumenta, y la combustión se realiza de manera más limpia. De igual manera, los convertidores catalíticos requieren de altas temperaturas para operar eficientemente. De lo anterior se desprende que es en la etapa de arranque del motor en la que la mayor cantidad de emisiones se producen.

En el HDM-4 no se considera la duración o distancia total de los recorridos realizados como dato de entrada, por lo que la composición del tiempo en el que el motor genera emisiones en frío o en caliente no es considerada dentro del modelo y se asume siempre en caliente.

Esto debido a que se asume que la composición de tiempos no sufriría cambios sustanciales causados por las obras de mejora o reconstrucción, salvo en los casos en los que la obra implique una reducción importante del tiempo de recorrido.

### **Emisiones evaporativas**

Las emisiones generadas por los vehículos no provienen en su totalidad del escape, sino que interviene también el proceso de evaporación, que es de relevancia en la producción de HC. La tasa de evaporación de combustible está directamente relacionada con la temperatura del aire y con el nivel de presión de vapor en el combustible.

Diversos estudios señalan que la mayoría de las emisiones evaporativas se presentan en vehículos estacionados. Al igual que en el caso de las emisiones en frío y caliente, el impacto que pudiese tener la implementación de mejoras o deterioro de la infraestructura se considera mínimo, por lo que el HDM-4 no considera este fenómeno en su modelo de emisiones.

### **Regulaciones ambientales**

El nivel de emisiones es estrechamente regulado en muchos países, por lo que aún cuando existan diferencias en las características físicas de los vehículos, el nivel de compuestos químicos emitidos por el escape tenderá a ser uniforme.

## **4.2.3 Funciones para el cálculo de emisiones**

A continuación se presentan las ecuaciones para el cálculo de emisiones, haciendo notar que está fuera del alcance de este documento analizar el planteamiento matemático que da origen a las mismas.

El modelo se basa en el propuesto por Hammerstrom (1995), y predice las emisiones del escape de los vehículos en función del consumo de combustible y de la velocidad.

El consumo de combustible está en función de la velocidad del vehículo, que a su vez depende de las características del camino y de la propia unidad. De esta manera es posible analizar el cambio en la cantidad de emisiones como resultado de la implementación de diferentes estrategias de mantenimiento y mejora de un camino, o cuando hay cambios mayores en la flota vehicular en la red carretera.

Otro ejemplo de uso es el que se presenta en México al reducirse los contenidos de azufre de las gasolinas que se venden en el país.

Los coeficientes y constantes mencionados en las fórmulas, provienen de diversos estudios con condiciones controladas que han permitido la elaboración de tablas con valores recomendados para su uso en el modelo. Estas tablas se proporcionan en la documentación del HDM-4, por lo que se omite su reproducción en este documento.

### Hidrocarburos

$$E_{HC} = \frac{3,6 Ke_{HO0} (a_0 + a_1 Ke_{HO1} IFC) (1 + 0,5 a_2 vida) 10^3}{velocidad} \quad (4.1)$$

Donde:

$E_{HC}$  = emisiones de HC, en g / vehículo - km

IFC = consumo instantáneo de combustible, en ml/s

Vida = vida de servicio del vehículo, en años

Velocidad = velocidad del vehículo, en km/h

$a_0$  ,  $a_1$  y  $a_2$  = parámetros del modelo

$Ke_{HC0}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

$Ke_{HC1}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

### Monóxido de carbono

$$E_{CO} = \frac{3,6 Ke_{CO0} (a_0 + a_1 Ke_{CO1} IFC) (1 + 0,5 a_2 vida) 10^3}{velocidad} \quad (4.2)$$

Donde:

$E_{CO}$  = emisiones de CO, en g / vehículo - km

$a_0$  ,  $a_1$  y  $a_2$  = parámetros del modelo

$Ke_{CO0}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

$Ke_{CO1}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

El resto de las variables son iguales a las previamente definidas.

### Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

$$E_{NOX} = \frac{3,6 Ke_{NOX0} (a_0 + a_1 Ke_{NOX1} IFC) (1 + 0,5 a_2 vida) 10^3}{velocidad} \quad (4.3)$$

Donde:

$E_{NOX}$  = emisiones de NO<sub>x</sub>, en g / vehículo - km

$a_0$  ,  $a_1$  y  $a_2$  = parámetros del modelo

$Ke_{NOX0}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

$Ke_{NOX1}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

El resto de las variables son iguales a las previamente definidas.

El modelo original contemplaba un aumento de las emisiones con la edad. Dentro del HDM-4 se considera que las emisiones al momento de alcanzar la mitad de su vida útil (es decir, *0,5 vida*), representan con suficiente aproximación las emisiones generadas.

El parámetro  $a_2$  representa la degradación de un vehículo equipado con un convertidor catalítico.

### Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

$$E_{SO2} = \frac{3,6 Ke_{SO20} a_0 a_1 IFC 10^3}{velocidad} \quad (4.4)$$

Donde:

$E_{SO2}$  = emisiones de SO<sub>2</sub>, en g / vehículo - km

$a_0$  y  $a_1$  = parámetros del modelo

$Ke_{SO20}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

El parámetro  $a_0$  representa el porcentaje en peso de azufre en el combustible

### Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

$$E_{CO_2} = \frac{3,6 Ke_{CO_2} a_0 IFC 10^3}{velocidad} \quad (4.5)$$

Donde:

$E_{CO_2}$  = Emisiones de CO<sub>2</sub>, en g / vehículo - km

$a_0$  = parámetro del modelo

$Ke_{CO_2}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

### Partículas suspendidas

$$E_{PAR} = \frac{3,6 Ke_{PAR0} (a_0 + a_1 Ke_{PAR1} IFC) 10^3}{velocidad} \quad (4.6)$$

Donde:

$E_{PAR}$  = emisiones de partículas suspendidas, en g / vehículo - km

$a_0$  y  $a_1$  = parámetros del modelo

$Ke_{PAR0}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

$Ke_{PAR1}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

### Plomo (Pb)

$$E_{Pb} = \frac{3,6 Ke_{Pb0} a_0 a_1 IFC 10^3}{velocidad} \quad (4.7)$$

Donde:

$E_{Pb}$  = Emisiones de plomo, en g / vehículo - km

$a_0$  y  $a_1$  = parámetros del modelo

$Ke_{Pb0}$  = factor de calibración (por omisión igual a uno)

El parámetro  $a_0$  representa el porcentaje en peso de plomo en la gasolina.

#### **4.2.4 Datos requeridos**

Los siguientes datos son requeridos para el cálculo de las emisiones:

1. Volumen de tránsito en la sección considerada
2. Longitud de la sección
3. Velocidades de los vehículos, la cual se obtiene en el módulo RUE (efectos para los usuarios)
4. Consumo de combustible, también obtenido en el módulo RUE
5. Vida de servicio del vehículo
6. Parámetros del modelo, proporcionados en forma de tablas en la documentación del HDM-4

#### **4.2.5 Limitantes del modelo**

Para permitir la comparación de emisiones entre un vehículo y otro, fabricantes e investigadores utilizan los llamados ciclos de manejo, que representan los patrones de manejo que se presentan en el medio rural o urbano.

Dichas variaciones en los patrones de manejo no son consideradas en la formulación matemática del modelo por considerarse que la necesidad de datos sería entonces enorme, quedando este grado de detalle fuera del alcance del módulo del HDM-4.

El modelo también parte del hecho de que el motor está constantemente en su fase caliente y las emisiones evaporativas no son contabilizadas; y tampoco se consideran las condiciones prevalecientes en áreas urbanas (flujo de circulación discontinua, debido a: semáforos, cruces peatonales, accidentes de tránsito, obras de reparación, prioridad a vehículos de emergencia, entre otras).

Los efectos de las emisiones generadas no se valoran, ni se incluyen en el análisis económico; únicamente se consideran las diferencias netas en la cantidad de contaminantes generados para cada par de opciones de inversión.

Si bien este modelo no representa de manera detallada la cantidad y naturaleza exacta de las emisiones generadas y el grado de agregación de la información es considerable, es de resaltar que el modelo permite obtener una idea concreta de las implicaciones ambientales por el deterioro de las condiciones de la red carretera, sobre todo en zonas suburbanas, donde la población que es afectada por la mala calidad del aire es mayor.

Para realizar análisis detallados del impacto de estrategias específicas en el transporte, se recomienda el uso de modelos específicamente diseñados para tal

propósito, como es el caso de MOBILE6-México.

Este modelo fue desarrollado a partir del modelo MOBILE 6.2 de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos de América, y toma en consideración: la altitud; la velocidad promedio; la temperatura ambiente, mínima, máxima y anual; el número de verificaciones anuales, entre otras.

Actualmente se emplea este modelo para generar el Inventario Nacional de Emisiones, en un proyecto iniciado en el 2001 y que concentra los esfuerzos de la EPA; la Asociación de Gobernadores de Occidente (WGA por sus siglas en inglés Western Governors' Association); la Comisión Norteamericana para la Cooperación Ambiental (CEC por sus siglas en inglés Comisión for Environmental Cooperation ); la SEMARNAT y el INE.

En abril del 2004 se terminó el inventario en los seis estados fronterizos con los Estados Unidos de América (ERG, 2004), y se pretende tener el reporte final para todo el país en marzo del 2006 (ERG, 2005 en versión preliminar).

Finalmente, cabe aclarar que la versión 2.0 del HDM-4 contempla importantes mejoras en el cálculo de emisiones, y en general en el SEE. Además, se incluye la posibilidad de realizar un análisis multicriterio para cualquier proyecto, lo que permite comparar proyectos utilizando criterios a los que no es fácil asignarles un costo económico, como es el caso de los costos ambientales (Stannard, 2005).



## 5 Estimación de emisiones con el HDM-4

---

Con el fin de ejemplificar la manera en que se obtiene la cantidad de emisiones generadas por la operación del transporte carretero con ayuda del HDM-4, a continuación se presenta la aplicación del modelo para un tramo real de una carretera mexicana.

Se pretende así ilustrar el proceso de cálculo, la definición de parámetros requeridos, y la obtención de reportes.

El cálculo se restringe a las emisiones generadas, estando fuera del alcance del estudio el análisis económico y de estrategias, propio del resto de los módulos del HDM-4.

### 5.1 Vehículos representativos

La flota vehicular utilizada en éste estudio se integró con los siete tipos de vehículos aforados anualmente por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT en la red federal de carreteras y que se publican en el documento “Datos Viales”.

Se utilizó la composición vehicular definida en la tabla 5.1, misma que corresponde con los datos de aforo vehicular proporcionados por la DGST para el tramo de estudio.

**Tabla 5.1**  
**Composición vehicular utilizada en el análisis**

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Vehículo ligero	77,70
Autobús	7,10
Camión mediano C2	7,80
Camión pesado C3	4,30
Camión articulado (T3-S2)	1,60
Camión articulado (T3-S3)	1,30
Camión articulado (T3-S2-R4)	0,20

Con relación a las características físicas de cada vehículo, se retomó la información de la Publicación Técnica 202 del IMT (Arroyo *et al.*, 2002) y se utilizaron algunos valores por omisión del HDM-4. El resumen de los parámetros requeridos por el modelo se presenta en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2**  
**Características de la flota vehicular (Arroyo et al., 2002)**

Parámetro	unidad	Identificación del vehículo						
		A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4
Potencia máxima en operación	HP métrico	45	281	133	190	327	327	327
Potencia nominal del vehículo	HP métrico	60	375	177	253	436	436	436
Potencia máxima del freno	HP métrico	43	286	218	347	554	707	996
Peso del vehículo vacío	kg	1300	15275	6100	8800	17436	19436	29436
velocidad deseada	km/h	110	95	90	90	100	100	100
Coefficiente aerodinámico	Adimensional	0,46	0,65	0,85	0,85	0,63	0,63	0,63
Area frontal	m <sup>2</sup>	2,941	7,722	6,999	6,999	9,136	9,136	9,136
Factor ajuste combustible	adimensional	1,16	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
km conducidos por año	km	20000	240000	150000	150000	180000	180000	180000
Vida útil promedio de servicio	Años	6	8	8	8	8	8	8
Costo	\$	149683	1559644	399500	508300	863364	896089	1096178
Consumo de combustible, en l	1000 km-veh	157,59	366,12	329,43	483,12	480,64	574,66	753,68
Consumo de lubricantes, en l	1000 km-veh	1,85	3,37	3,37	3,37	5,45	5,45	5,45

Estos parámetros se incorporaron en el HDM-4, en el apartado “Atributos de los vehículos”, definiendo así las características de los vehículos representativos.

## 5.2 Descripción de la carretera de estudio

Para este estudio se consideró la carretera Amealco – Acámbaro, la cual cruza los estados de Santiago de Querétaro, Michoacán de Ocampo, y Guanajuato, en la República Mexicana (fig 5.1).

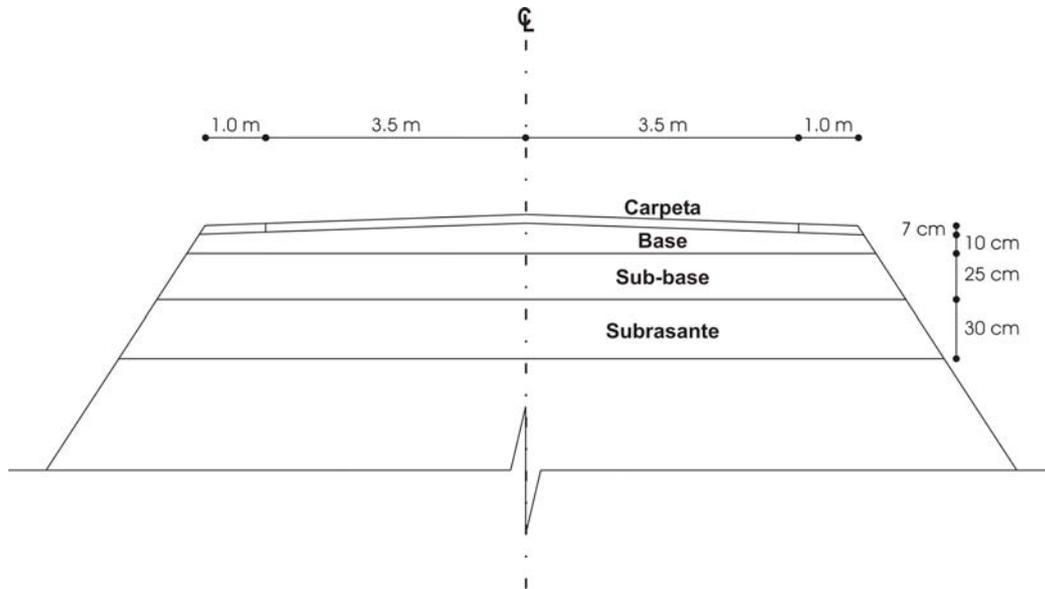
Las características generales de la carretera se indican a continuación:

- Clase de carretera: secundaria
- Tipos de flujos de velocidad/capacidad: 2 carriles estándar
- Modelo de tránsito: tránsito libre
- Zona climática: subtropical – cálido / semiárido
- Tipo de pavimento: concreto asfáltico



**Figura 5.1**  
**Localización del tramo de estudio**

La geometría general de la carretera se esquematiza en la figura 5.2



**Figura 5.2**

**Sección geométrica del tramo de estudio**

Se subdividió la carretera en tres tramos de características homogéneas en cuanto al Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA) y el estado de conservación de los mismos, con base en la irregularidad del pavimento.

La irregularidad del pavimento se expresa en términos del Índice Internacional de Irregularidad (IRI, por las siglas de *International Roughness Index*), como valor de referencia.

El IRI es un resumen estadístico del perfil longitudinal de un camino a lo largo de una rodada, y representa los desplazamientos verticales de un vehículo de pasajeros típico que tienen su origen en la irregularidad de la superficie de rodamiento (Soliminihac, 2001).

Las características de los tramos de estudio se presentan en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3**  
**Características de los tramos de estudio**

<b>Tramo</b>	<b>TDPA</b>	<b>Longitud</b>	<b>IRI</b>	<b>Año de medición</b>	<b>Velocidad máxima permitida</b>
Tramo 1 Amealco - Coroneo	1800	24 km	5	2003	100 km/hr
Tramo 2 Coroneo - Jerécuaro	2100	20 km	7	1997	80 km/hr
Tramo 3 Jerécuaro - Acámbaro	3500	31 km	3	2002	100 km/hr

## 5.3 Definición de escenarios

En este trabajo se analizan dos escenarios. El primero considera la implementación de diferentes variables de conservación en el tramo de estudio. Con lo anterior se pretende visualizar los cambios en la cantidad de emisiones generadas por los vehículos cuando se implementan medidas para mejorar las condiciones de operación de la carretera.

Para el segundo escenario, se aprovecha la oportunidad que presenta la introducción de nuevos combustibles con menores contenidos de azufre, de acuerdo con las nuevas disposiciones en materia regulable que entrarán en vigor en los próximos años en México. Se observan gráficamente los ahorros en emisiones que se tendrán específicamente en el tramo en estudio.

### 5.3.1 Implementación de variables de conservación

Se definen tres variables de conservación para los tramos mencionados. Las características respectivas se muestran en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4**  
**Descripción de variables de conservación**

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
1	Bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8
2	Bacheo, reconstrucción para IRI = 8, y sobrecarpeta para IRI=5
3	Bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8, y sobrecarpeta para IRI=5

### **5.3.2 Mejora en la tecnología del combustible**

Como se planteó en el punto 2.11 de este documento, en el 2006 entrará en vigor la nueva Norma Oficial Mexicana (NOM) para regular el contenido de azufre del combustible, por lo que una de las modificaciones en los escenarios será este parámetro.

En el escenario **A**, se usaran los valores vigentes que señalan un contenido máximo de azufre para la gasolina tipo Magna de 500 mg/km (equivale al 0,05 % en peso), siendo el mismo valor vigente para el PEMEX diesel.

Cabe señalar que si bien se comercializa en México la gasolina tipo Premium, que contiene un máximo de 0,03% de azufre, pero por su incipiente participación en el mercado nacional con el 16,7% del total de ventas en el 2005, no es incluida en éste análisis (Indicadores Petroleros, 2005).

Para el escenario **B**, se utilizarán los valores máximos que serán vigentes en etapas escalonadas, iniciando en enero del 2007.

El resumen de estos valores se muestra en la tabla 5.5.

**Tabla 5.5**  
**Definición de valores para el contenido de azufre en combustibles, en México (valores máximos)**

Escenario	Normativa	Gasolina Magna (% en peso)	Diesel (% en peso)
A	NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 vigente	0,05	0,05
B	NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 a partir del 2007	0,008 <sup>1</sup>	0,0015 <sup>2</sup>

NOTAS:

1 Entra en vigor en octubre del 2008, y será limitado a la Zona Metropolitana del Valle de México y las Zonas Metropolitanas de Guadalajara y Monterrey. Para el resto del país, esta disposición entrará en vigor en enero del 2009.

2 Entra en vigor en enero del 2007 en la zona fronteriza; en enero del 2009 para la Zona Metropolitana del Valle de México y las Zonas Metropolitanas de Guadalajara y Monterrey, y para el resto de país en septiembre del 2009.

Fuente: NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005

Calculando las emisiones con estos escenarios, se podrán observar los ahorros en emisiones de SO<sub>2</sub> planeados con la introducción en el 2007 de mejores combustibles.

## 5.4 Factores de calibración

En la tabla 5.6 se presenta el resumen de los factores de calibración empleados en este estudio. Se observa que la mayoría de los factores asumen el valor por defecto de HDM-4 igual a uno. Esto es debido a que la calibración de los factores implica estudios de campo con medición directa de las emisiones generadas por vehículos en condiciones acordes con la realidad nacional.

Aunque lo anterior implicaría una inversión importante de recursos, sería entonces deseable analizar la factibilidad de realizarlos en un futuro casi inmediato.

**Tabla 5.6**  
**Factores de calibración**

Vehículo	HC		CO		Nox		PM		CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> <sup>1</sup>	Pb
	k0	k1	k0	k1	k0	k1	k0	k1	k0	k0	k0
Autobús (B)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,61	0,00
Camión articulado (T3-S2)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,61	0,00
Camión articulado (T3-S3)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,61	0,00
Camión doblemente articulado (T3-S2-R4)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,61	0,00
Camión mediano (C2)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,61	0,00
Camión pesado (C3)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,61	0,00
Vehículo ligero (A)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,17	0,00

1 Ver sección 5.4.1

Los anteriores parámetros se incorporaron a los atributos de los vehículos representativos en el HDM-4, en el área concerniente a factores de calibración para el cálculo de emisiones.

### 5.4.1 Factor de calibración para el SO<sub>2</sub>

Siendo 0,012% el valor por omisión del contenido de azufre del modelo para gasolinas, y 0,031% para diesel, se debe cambiar el factor de calibración  $K_{e\ SO_2}$  de la ecuación 4.4 para ambos escenarios. Lo anterior para tomar en cuenta el contenido de azufre de los combustibles que se comercializan en el país, siendo los factores utilizados los siguientes:

#### Escenario A

Vehículos que utilizan gasolina:  $K_{0\ SO_2} = 4,17$

Vehículos que utilizan diesel:  $K_{0\ SO_2} = 1,61$

#### Escenario B

Vehículos que utilizan gasolina:  $K_{0\ SO_2} = 0,67$

Vehículos que utilizan diesel:  $K_{0\ SO_2} = 0,048$

## 5.4.2 Factor de calibración para el Pb

Para el caso del plomo, las gasolinas que se comercializa en el país no contienen el aditivo llamado tetraetilo de plomo, que se usa para incrementar el índice de octano. Además, el contenido de plomo propio de la gasolina es muy bajo, con un máximo de 0,0026 kg/m<sup>3</sup>.

Por lo anterior se decidió modificar el factor de calibración  $K_{e_{Pb0}}$  de la ecuación 4.7 por el valor de cero, siendo entonces las emisiones de plomo causadas por el transporte carretero en México no significativas en magnitud.

Para el resto de los parámetros que intervienen en los modelos de deterioro, se asumieron los valores por omisión propuestos por el HDM-4, verificando que fueran compatibles con la definición de los casos de análisis y con las características generales de las carreteras mexicanas.

Se considero el año 2005 para el inicio del periodo de análisis, con una duración de diez años.

## 5.5 Interpretación de resultados

Con los datos anteriormente presentados se calcularon las emisiones con el HDM-4. Se hace notar que al configurar la ejecución del análisis de proyectos, el modelo de emisiones debe ser incluido para así obtener las emisiones generadas. Para detalles acerca del uso de la interfaz del programa, consultar Wightman (2002).

Una vez realizado el análisis, el programa permite generar tres tipos de reportes:

1. Emisiones anuales por vehículo
2. Resumen de emisiones anuales
3. Cambio neto anual en emisiones

Debido a la gran cantidad de información generada en forma de tablas, se analizan en este documento sólo los datos para el tramo 1, Amealco – Coroneo, incluyéndose en los anexos la información utilizada en la elaboración de las gráficas aquí presentadas.

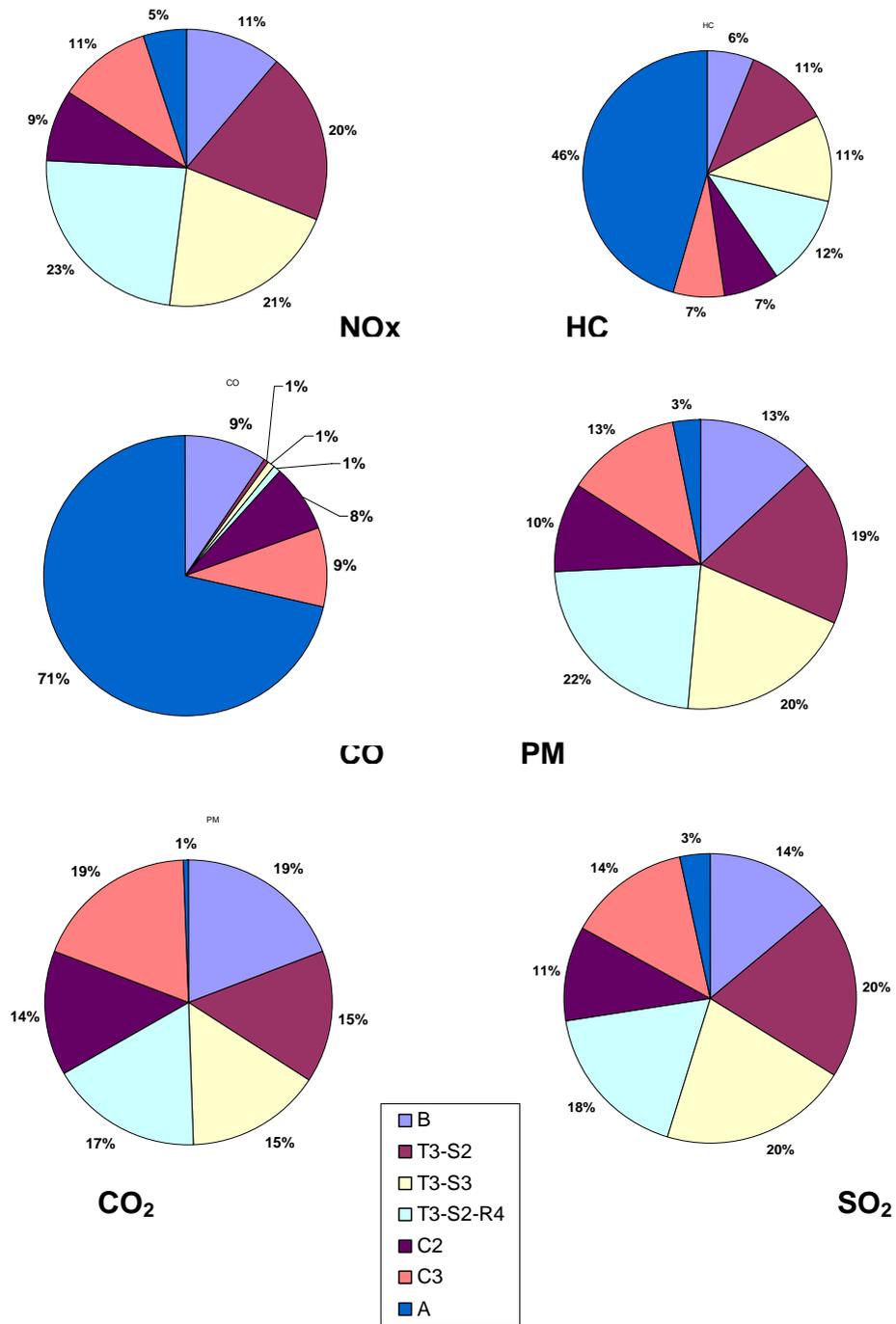


Figura 5.3

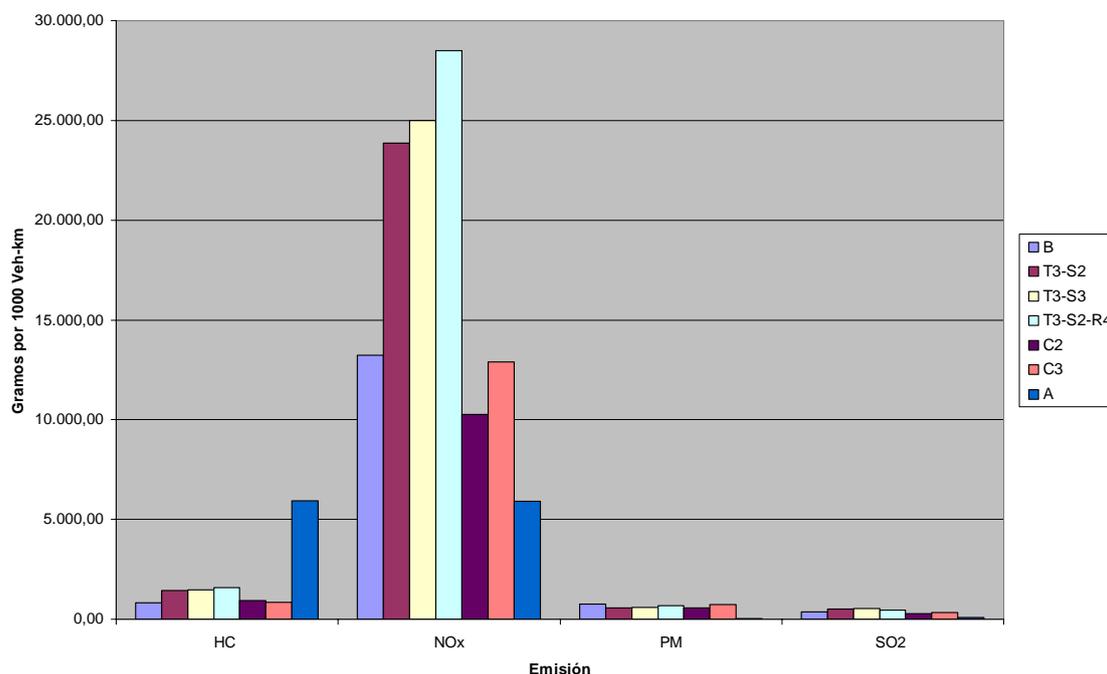
Contribuciones relativas por tipo de vehículo, para el año 2005 en el tramo Amealco - Coroneo

Las gráficas de la figura 5.3 muestran las contribuciones relativas de cada vehículo a la cantidad total de emisiones generadas en el tramo Amealco – Coroneo en el año 2005. De los resultados se desprenden las siguientes conclusiones:

La mayoría de las emisiones de HC y CO provienen de los vehículos tipo A. Esto se debe en esencia a que los factores de emisión para los vehículos que utilizan gasolina como combustible tienen valores relativamente más elevados.

De igual manera los vehículos pesados a diesel son la categoría de fuente más significativa en cuanto a emisiones de NO<sub>x</sub>, PM, CO y CO<sub>2</sub>. Ello se debe a que los factores de emisión de estos contaminantes para vehículos pesados que se alimentan con diesel son considerablemente mayores que los correspondientes a vehículos y camiones ligeros a gasolina.

En la figura 5.4 se presentan las emisiones de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas y dióxido de azufre, generadas por los vehículos representativos de la flota nacional en el año 2005 en el tramo Amealco – Coroneo. Se observa la importante participación de los vehículos pesados en la generación de NO<sub>x</sub>, además de la generación de hidrocarburos por parte de los vehículos ligeros (tipo A), debido al uso de gasolina como combustible.



**Figura 5.4**

**Cálculo de emisiones generadas por la flota representativa en el año 2005 para el tramo Amealco - Coroneo**

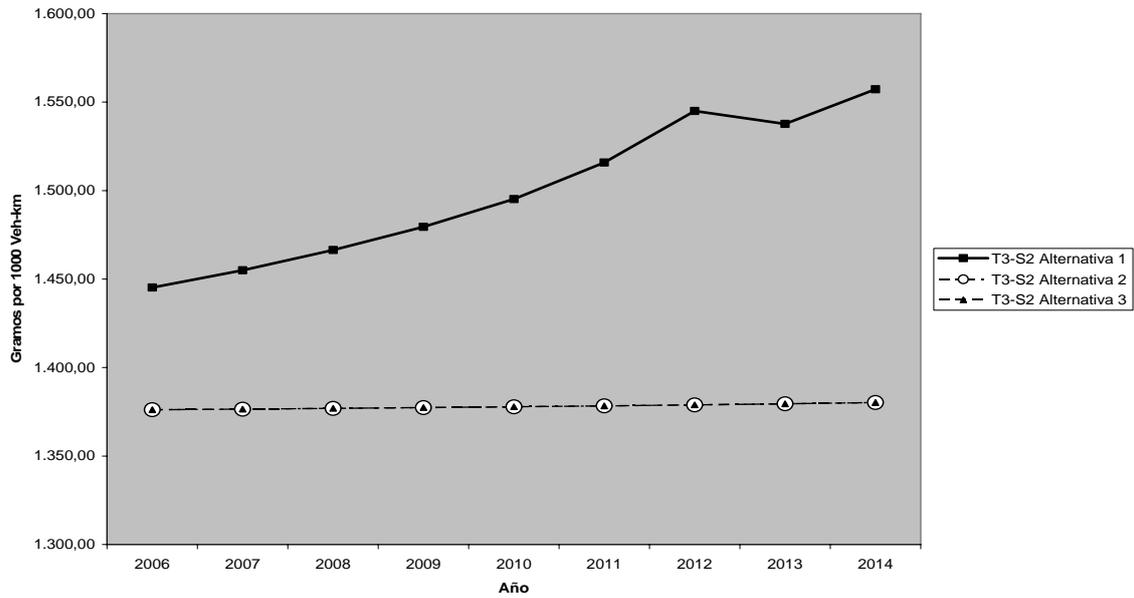


Figura 5.5

**Evolución en las emisiones de hidrocarburos generadas por el vehículo T3-S2 en el tramo Amealco – Coroneo**

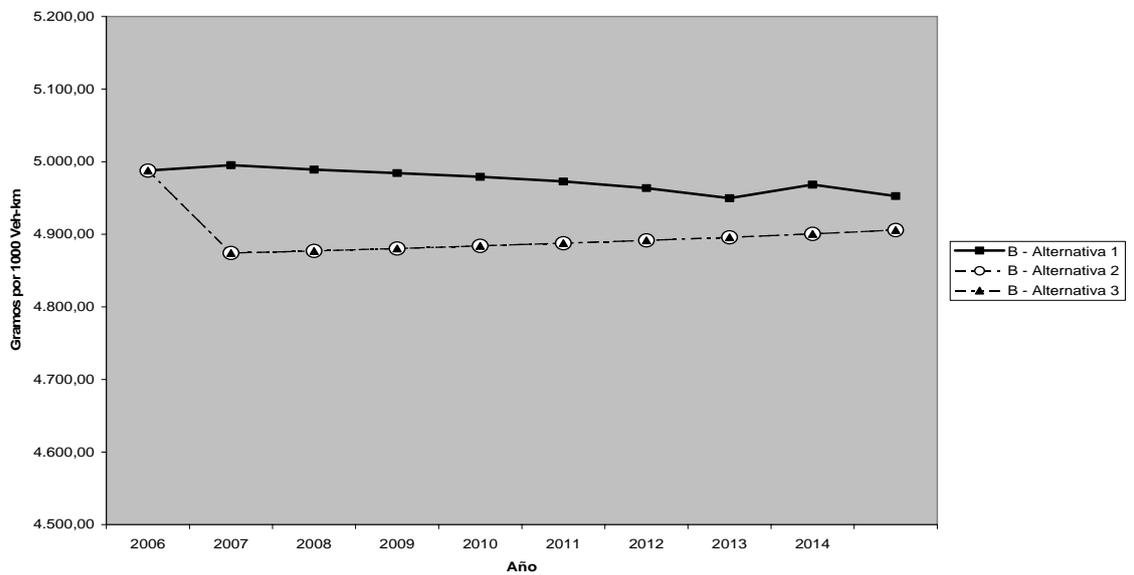


Figura 5.6

**Evolución en las emisiones de monóxido de carbono generadas por el**

### vehículo B en el tramo Amealco – Coroneo

En las figuras 5.5 y 5.6 se presenta la variación de emisiones de hidrocarburos para el vehículo T3-S2, y de monóxido de carbono para el vehículo B, respectivamente. En ellas se observa que las alternativas de conservación 2 y 3 se sobreponen, debido a que la implementación de la alternativa 3 de conservación no representa ahorros adicionales en cuanto a emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono, ambas ligadas al consumo de combustible.

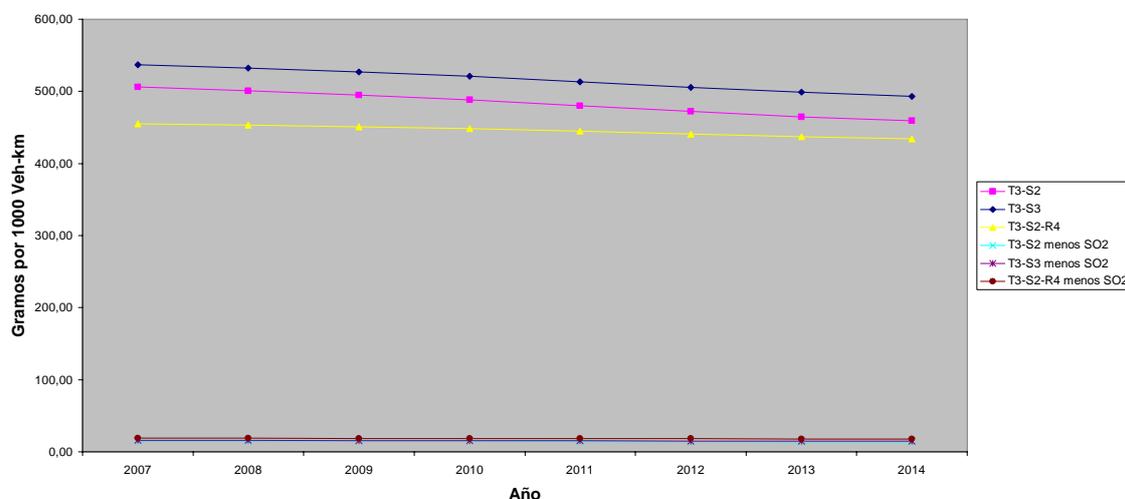


Figura 5.7

### Emisión de SO<sub>2</sub> con y sin mejora en la tecnología de los combustibles

De la gráfica para SO<sub>2</sub> en la figura 5.3 se desprende que los vehículos T2-S3, T3-S3 y T3-S2-R4 contribuyen con el 60% del total de las emisiones de SO<sub>2</sub>. En la figura 5.7 se muestra el ahorro en emisiones de SO<sub>2</sub> que se tendrá en el tramo Amealco – Coroneo, con la introducción de los combustibles con menor contenido de azufre, a partir del 2007.

La gráfica señala la producción de solamente el 3% de las emisiones de SO<sub>2</sub> con respecto a los combustibles con contenido normal de azufre, lo cual corresponde a la reducción de este elemento en el diesel.

## 5.6 Discusión de resultados

Graficas similares a las anteriores pueden elaborarse para cada tipo de vehículo, emisión, tramo y variable de mantenimiento. Por cuestiones de espacio se presentan en este documento, únicamente algunos ejemplos ilustrativos del uso

potencial de la información generada por el módulo de cálculo de emisiones del HDM-4.

Es evidente que el modelo no representa de manera detallada la cantidad y naturaleza exacta de las emisiones generadas, y el grado de agregación de la información es considerable.

Sin embargo, es de resaltar que el modelo permite obtener una idea aproximada de las implicaciones ambientales del deterioro de las condiciones de la red carretera, lo que genera un aumento en el consumo de combustible, costos para el usuario, y por ende, de las emisiones emitidas a la atmósfera.

Además de la anterior, el HDM-4 ofrece la oportunidad de utilizar información requerida para otros módulos, como el de efectos para los usuarios (ver sección 4.2.4), cuya relevancia es vital para la definición de estrategias de conservación de una red carretera, e integrarla en el módulo de efectos ambientales.

Lo anterior permite obtener información del comportamiento ambiental en cuanto a la generación de emisiones contaminantes, con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada adicionales a los que se requieren para realizar un análisis de proyecto dentro del mismo programa.

La comparación relativa de emisiones es también una característica a resaltar, ya que facilita una comparación entre las consecuencias de las distintas obras y alternativas de construcción con un caso base.

Por lo anterior, sería recomendable implementar en lo posible su utilización e integración dentro de las políticas de conservación en las redes que usan el HDM-4 como herramienta de gestión.

## 6 Conclusiones

---

Durante las últimas décadas, México ha sufrido profundos cambios económicos y sociales, que han venido acompañados de un creciente deterioro de su medio ambiente y una reducción de sus recursos naturales. La contaminación del aire, el ruido, las vibraciones, la alteración del paisaje, entre otros, son las contribuciones negativas más preocupantes del Sector Transporte al deterioro ambiental.

Para terminar con tendencias claramente no sustentables se requiere una integración real de objetivos ambientales en áreas, como: energía, transporte, agricultura, industria, y planeación urbana. Las estrategias integrales para la sustentabilidad del transporte deben acompañar la mejora en la eficiencia de la tecnología de los vehículos, uso de fuentes de energía alternas, fomentar el cambio modal del transporte, y buscar alternativas para la reducción de emisiones, entre otros.

Para el diagnóstico y monitoreo de la calidad del aire, es fundamental conocer la naturaleza y cantidad de emisiones generadas por las diferentes fuentes generadoras de tales contaminantes. Si bien existen diversas herramientas y métodos para cuantificar de manera confiable las emisiones emitidas por una fuente cualquiera, su complejidad, costo de implementación y necesidad de datos de entrada, hacen que su uso en México sea aún restringido.

Con el uso del módulo ambiental para estimar la cantidad de emisiones integrado en el HDM-4, se tiene la posibilidad de conocer la cantidad de emisiones generadas en la red o segmento de la misma, por la operación del transporte carretero que circula sobre ella.

Además de las emisiones anuales totales y por vehículo, la variación anual neta de las emisiones como consecuencia de las distintas obras y alternativas de construcción con un caso base (sin proyecto o mínimo), que normalmente representa el estándar mínimo de conservación rutinario, puede también ser analizada con el HDM-4.

Es evidente que el modelo no representa de manera detallada la cantidad y naturaleza exacta de las emisiones generadas, y el grado de agregación de la información es considerable. De igual manera, el modelo no internaliza los costos ambientales ocasionados por la contaminación ambiental.

Sin embargo, es de resaltar que el modelo permite tener una idea aproximada de las implicaciones ambientales del deterioro de las condiciones de la red carretera, lo que genera un aumento en el consumo de combustible, costos para el usuario, y por ende, de las emisiones emitidas a la atmósfera. Esto se logra con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada adicionales a los que se requieren para un análisis de proyecto dentro del mismo programa.

Por lo anterior, sería recomendable implementar el cálculo de emisiones con el submodelo Efectos Ambientales como parte integral del HDM-4 en las redes carreteras que lo usan como herramienta de gestión, de incluir así la variable ambiental en el proceso de toma de decisiones, pudiendo incluso convertirse en un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire

El potencial de esta información es evidente al considerar que hoy en día es ampliamente reconocido que la eficiencia energética y los efectos ambientales deben considerarse en el análisis de políticas y proyectos, por lo que los tomadores de decisiones serán capaces de entender las implicaciones energéticas e impactos negativos ambientales de dichas actividades.

La tendencia mundial apunta a tomar en cuenta no solamente el valor cualitativo de los bienes ambientales, sino también una valoración monetaria de los daños o impactos ocasionados por la contaminación generada por la planeación, construcción y operación de la infraestructura del transporte, en forma de daños a la salud humana, los ecosistemas, bienes materiales, cosechas, etc.

La valoración monetaria de las externalidades permite sustituir subjetividades por cálculo científico, y utilizar los resultados en estudios de mitigación, valoración integral de tecnologías y procesos, análisis comparativos de opciones y estrategias de desarrollo; además de ayudar a definir si el costo de la no acción puede llegar a ser el equivalente a varias veces el monto de aplicar medidas preventivas.

Es prioritario que en México se consideren estímulos en todos los rubros para otros modos de transporte, que sean más amigables hacia el medio ambiente, como es el caso del transporte ferroviario. En menor medida se deben también hacer esfuerzos para proporcionar información a la población, e incentivos para cambiar la manera en que sus actividades cotidianas impactan el medio ambiente local, regional y global.

Finalmente, conviene mencionar que en nuestro país, el paradigma de los efectos ambientales sea un verdadero reto para los tomadores de decisiones y creadores de políticas, el asegurar que **“los costos reales de la contaminación sean internalizados en los precios de los productos y servicios”**.

## Bibliografía

---

Archondo-Callao, Rodrigo. *Análisis de sensibilidad del HDM-4*. División de Transportes, Departamento de Transportes, Aguas y Desarrollo Urbano. Banco Mundial (1996)

Arroyo Osorno, José Antonio; Roberto Aguerrebere Salido. *Estado superficial y costos de operación en carreteras*; Publicación Técnica No. 202; Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro (2002)

Bennett C R, William D O, Paterson. *HDM-4: Highway Development and Management. Volume Five: A Guide to Calibration and Adaptation*; Asociación Mundial de Carreteras (PIARC). París, Francia. (2000)

Bennett C R, Greenwood I D. *HDM-4: Highway Development and Management. Volume Seven: Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4*. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC); París, Francia (2001)

Berkowicz, O. Hertel; Larsen, S.E. *Modelling Traffic Pollution in Streets*. Ministerio de Medio Ambiente; Dinamarca (1997)

Diario Oficial de la Federación, Acuerdo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; edición del 23 de abril del 2003, Sección 4, pp. 65; México, (2003)

Eastern Research Group Inc para WGA, U.S. EPA, CEC, y SEMARNAT. *Mexico National Emissions Inventory, 1999: Six Northern States.*; (Abril 2004).  
<http://www.epa.gov/ttn/chief/net/mexico.html>

Eastern Research Group, Inc, para WGA, U.S. EPA, CEC, y SEMARNAT; *Mexico National Emissions Inventory, 1999. Draft Final*; (Noviembre 2005)

European Environment Agency; *The European Environment – State and Outlook 2005*. Copenhagen (2005)

Gatto, M.; A. Caizzi; L. Rizzi; and G. A. De Leo; *The Kyoto Protocol is cost-effective*; Conservation Ecology, Volumen 6, No 1; USA (2002)

Gustafsson M, Blomqvist G, Dahl A, Gudmundsson A; *Inhalable Particles from Pavement Wear caused by Studded Tyres – Properties and Inflammatory Effects in Human Airway Cell*; Administradora Sueca de Caminos, Reporte 520; Suecia, (2005)

Hammerstrom U; *Proposal for a vehicle exhaust model in HDM-4, ISOHDM Supplementary Technical Relationships Study, Draft report*, Administradora Sueca de Caminos. Suecia (1995)

Homero C, Gasca J, González U, Guzmán F; *Opciones para mitigar las emisiones de gases efecto invernadero del Sector Transportes; Compendio Cambio Climático: una visión desde México*; Instituto Nacional de Ecología. México (2004)

Instituto Nacional de Estadística Geografía en Informática; *Síntesis Metodológica de la Estadística de Vehículos de Motor Registrados en Circulación*; México, DF: (2005)

Juárez Del Angel, R; *Externalidades en el Transporte en México*; Primer Congreso Internacional de Ingeniería Vial; México (2003)

Kerali Henry G R; *HDM-4: Highway Development and Management. Volume One: Overview of HDM-4*; Asociación Mundial de Carreteras (PIARC); París, Francia (2000)

Kerali Henry G R, McMullen D, Odoki J B; *HDM-4: Highway Development and Management. Volume two: Applications Guide*; Asociación Mundial de Carreteras (PIARC); París, Francia (2000)

McKingley Galen, et al; *Final Report of the Second Phase of the Integrated Environmental Strategies Program in Mexico*; Instituto Nacional de Ecología; México (2003)

Nash C, Sansom T, Matthews B; *Concerted Action on Transport Pricing Research Integration, Reporte final*. UE (2001)

Odoki, J B; Henry G.R., Kerali. *HDM-4: Highway Development and Management. Volume Four: Analytical Framework and Model Descriptions*; Asociación Mundial de Carreteras (PIARC). París, Francia (2000)

Petróleos Mexicanos; *Indicadores Petroleros, Estadísticas Operativas 2005*; <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=2&catID=160&subcatID=244>

Rico R A, J M Orozco y O, R Téllez G y D Hernández. *Sistema de Evaluación de Pavimentos. Versión 1.0*, Publicación Técnica No 208. Instituto Mexicano del Transporte. México (2002)

Secretaría de Energía; *Sistema de Información Energética*; México (2004)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; *Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-1999*; México (2003)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; *Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003*; México (2005)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; *Norma Oficial Mexicana*

NOM-076-SEMARNAT-1995; México (2003)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; *Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005*; México (2005)

Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales; *Evaluación de las Externalidades Ambientales de la Generación Termoeléctrica en México*; México (2004)

Solminihaç Tampier, Hernán de; *Gestión de Infraestructura Vial*; Ediciones Universidad Católica de Chile, 2a. Ed; Santiago, Chile (2001)

Solorio M J R, Hernández D R I; *Análisis de Sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos Asfálticos*, Publicación Técnica No. 253, Instituto Mexicano del Transporte. México (2005)

Stannard E; *HDM-4: Highway Development and Management. Getting started with HDM-4; Version 2.0* ; HDMGlobal. Birmingham, Reino Unido,(2005)

Swedish National Road Administration SNRA; *ISOHDM Supplementary Technical Relationship Stud.* Reporte final; Suecia (1995)

Wightman David C; Stannard Eric E; *HDM-4: Highway Development and Management. Volume Three: Software User Guide*; Asociación Mundial de Carreteras (PIARC); París, Francia (2002)



# Anexo 1 Emisiones anuales por vehículo en el tramo Amealco – Coroneo para alternativa 1

---

Tabla A1.1

Emisiones anuales para el vehículo A (automovil)

Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehículos - km

Año	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO	Pb
2005	5.928,02	38.221,71	5.916,05	22,92	263.603,50	83,84	0,00
2006	5.894,15	38.009,97	5.885,76	22,80	262.682,91	83,55	0,00
2007	5.850,46	37.735,77	5.846,14	22,63	261.403,56	83,14	0,00
2008	5.803,40	37.440,61	5.803,58	22,46	260.045,03	82,71	0,00
2009	5.751,29	37.113,95	5.756,51	22,27	258.550,44	82,23	0,00
2010	5.689,82	36.728,65	5.701,04	22,04	256.796,33	81,67	0,00
2011	5.609,69	36.226,56	5.628,81	21,74	254.523,39	80,95	0,00
2012	5.497,76	35.525,50	5.528,06	21,33	251.373,09	79,95	0,00
2013	5.542,43	35.806,30	5.568,81	21,50	252.720,84	80,38	0,00
2014	5.461,28	35.297,71	5.495,61	21,20	250.410,84	79,64	0,00

**Tabla A1.2**

**Emisiones anuales para el vehículo B (autobús)**

**Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	809,52	4.987,83	13.246,69	754,04	1.140.010,75	361,88	0,00
2006	812,47	4.995,28	13.263,13	754,81	1.141.325,38	362,30	0,00
2007	816,21	4.989,08	13.237,56	752,90	1.138.850,88	361,51	0,00
2008	820,61	4.984,36	13.215,11	751,13	1.136.620,13	360,80	0,00
2009	825,87	4.979,23	13.189,79	749,10	1.134.089,88	360,00	0,00
2010	832,56	4.972,81	13.157,92	746,55	1.130.900,88	358,99	0,00
2011	842,00	4.963,72	13.112,85	742,94	1.126.391,38	357,56	0,00
2012	856,45	4.949,78	13.043,76	737,41	1.119.481,25	355,36	0,00
2013	851,42	4.968,35	13.108,51	741,87	1.125.517,75	357,28	0,00
2014	862,07	4.952,72	13.041,72	736,80	1.119.008,63	355,21	0,00

**Tabla A1.3**

**Emisiones anuales para el vehículo C2 (camión mediano)**

**Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehiculos-km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	923,68	4.058,93	10.271,56	559,36	868.677,44	275,75	0,00
2006	927,27	4.060,45	10.269,18	558,90	868.279,94	275,62	0,00
2007	930,14	4.055,08	10.247,76	557,33	866.220,19	274,97	0,00
2008	933,55	4.050,47	10.227,51	555,77	864.237,56	274,34	0,00
2009	937,46	4.045,64	10.205,69	554,08	862.089,06	273,66	0,00
2010	942,18	4.040,03	10.179,97	552,08	859.550,31	272,85	0,00
2011	948,50	4.032,66	10.146,00	549,43	856.193,25	271,79	0,00
2012	957,64	4.022,09	10.097,11	545,61	851.359,13	270,25	0,00
2013	955,57	4.033,20	10.134,04	548,08	854.760,13	271,33	0,00
2014	961,69	4.022,73	10.091,23	544,90	850.625,25	270,02	0,00

Tabla A1.4

## Emisiones anuales para el vehículo C3 (camión pesado)

Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehículos - km

Año	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO	Pb
2005	858,46	4.904,06	12.904,26	728,57	1.106.931,13	351,38	0,00
2006	861,18	4.911,66	12.921,59	729,41	1.108.336,50	351,83	0,00
2007	863,97	4.906,74	12.901,64	727,93	1.106.412,63	351,21	0,00
2008	867,38	4.903,26	12.884,77	726,59	1.104.731,75	350,68	0,00
2009	871,50	4.899,47	12.865,63	725,05	1.102.811,25	350,07	0,00
2010	876,77	4.894,59	12.841,03	723,07	1.100.344,25	349,29	0,00
2011	884,27	4.887,38	12.805,27	720,21	1.096.766,00	348,15	0,00
2012	895,86	4.876,12	12.749,62	715,76	1.091.201,88	346,39	0,00
2013	892,30	4.893,18	12.807,06	719,63	1.096.511,13	348,07	0,00
2014	900,70	4.879,56	12.750,54	715,40	1.091.033,75	346,33	0,00

Tabla A1.5

## Emisiones anuales para el vehículo T3-S2 (camión articulado)

Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehículos - km

Año	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO	Pb
2005	1.434,30	368,54	23.866,51	578,81	1.617.607,13	513,49	0,00
2006	1.445,26	363,17	23.860,70	580,21	1.611.927,50	511,68	0,00
2007	1.454,97	355,62	23.791,13	580,42	1.600.717,88	508,12	0,00
2008	1.466,42	347,68	23.731,28	581,01	1.589.631,50	504,61	0,00
2009	1.479,49	339,08	23.673,75	581,87	1.578.009,13	500,92	0,00
2010	1.495,17	329,22	23.615,23	583,07	1.565.066,75	496,81	0,00
2011	1.515,85	316,84	23.552,27	584,88	1.549.366,00	491,82	0,00
2012	1.544,99	300,58	23.490,88	587,86	1.529.859,88	485,63	0,00
2013	1.537,69	307,83	23.579,18	588,28	1.541.738,63	489,40	0,00
2014	1.557,25	296,28	23.523,50	590,06	1.527.259,25	484,81	0,00

**Tabla A1.6**

**Emisiones anuales para el vehículo T3-S3 (camión articulado)**

**Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	1.462,25	404,43	24.992,17	600,70	1.712.454,88	543,59	0,00
2006	1.472,96	399,82	25.000,86	602,30	1.708.284,38	542,27	0,00
2007	1.482,09	392,79	24.937,18	602,52	1.697.911,50	538,98	0,00
2008	1.492,97	385,43	24.884,68	603,16	1.687.792,88	535,76	0,00
2009	1.505,46	377,44	24.834,74	604,06	1.677.168,38	532,39	0,00
2010	1.520,51	368,21	24.784,06	605,30	1.665.275,25	528,62	0,00
2011	1.540,44	356,55	24.729,62	607,14	1.650.741,00	524,00	0,00
2012	1.568,72	341,25	24.680,94	610,21	1.632.854,63	518,33	0,00
2013	1.561,98	348,54	24.776,30	610,82	1.645.151,13	522,23	0,00
2014	1.580,84	337,40	24.722,54	612,53	1.631.179,63	517,79	0,00

**Tabla A1.7**

**Emisiones anuales para el vehículo T3-S2-R4(camión doblemente articulado)**

**Variable de conservación 1, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	1.570,82	506,64	28.508,39	671,97	1.998.795,13	457,54	0,00
2006	1.580,85	504,48	28.566,11	674,27	1.999.642,25	457,73	0,00
2007	1.587,84	499,42	28.524,83	674,56	1.992.417,38	456,08	0,00
2008	1.596,63	494,28	28.500,93	675,37	1.986.017,38	454,62	0,00
2009	1.606,90	488,67	28.482,04	676,47	1.979.406,75	453,10	0,00
2010	1.619,44	482,12	28.465,69	677,91	1.971.981,38	451,40	0,00
2011	1.636,25	473,67	28.451,78	679,98	1.962.789,13	449,30	0,00
2012	1.660,42	462,14	28.445,92	683,18	1.950.932,13	446,58	0,00
2013	1.656,20	468,95	28.557,36	684,39	1.963.585,63	449,48	0,00
2014	1.671,82	459,98	28.518,56	685,90	1.952.567,00	446,96	0,00

## Anexo 2 Emisiones anuales por vehículo en el tramo Amealco – Coroneo para alternativa 3

---

Tabla A2.1

Emisiones anuales para el vehículo A (automovil)

Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km

Año	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO	Pb
2005	5.928,02	38.221,71	5.916,05	22,92	263.603,50	83,84	0,00
2006	6.085,83	39.204,66	6.055,17	23,50	267.558,13	85,10	0,00
2007	6.087,53	39.215,50	6.056,81	23,50	267.623,41	85,12	0,00
2008	6.089,63	39.228,92	6.058,83	23,51	267.704,19	85,14	0,00
2009	6.091,75	39.242,42	6.060,87	23,52	267.785,84	85,17	0,00
2010	6.093,85	39.255,86	6.062,90	23,53	267.867,69	85,20	0,00
2011	6.096,02	39.269,68	6.064,99	23,54	267.952,66	85,22	0,00
2012	6.098,26	39.284,04	6.067,17	23,54	268.041,84	85,25	0,00
2013	6.100,56	39.298,78	6.069,41	23,55	268.134,97	85,28	0,00
2014	6.102,94	39.314,05	6.071,74	23,56	268.233,78	85,31	0,00

**Tabla A2.2**

**Emisiones anuales para el vehículo B (autobús)**

**Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	809,52	4.987,83	13.246,69	754,04	1.140.010,75	361,88	0,00
2006	801,61	4.874,27	12.924,89	734,72	1.111.709,75	352,90	0,00
2007	801,50	4.877,06	12.933,41	735,25	1.112.474,75	353,14	0,00
2008	801,37	4.880,52	12.943,91	735,92	1.113.419,13	353,44	0,00
2009	801,23	4.884,08	12.954,74	736,60	1.114.391,88	353,75	0,00
2010	801,09	4.887,73	12.965,85	737,31	1.115.390,88	354,06	0,00
2011	800,94	4.891,64	12.977,74	738,06	1.116.458,75	354,40	0,00
2012	800,79	4.895,91	12.990,69	738,88	1.117.622,63	354,77	0,00
2013	800,61	4.900,59	13.004,90	739,77	1.118.899,50	355,18	0,00
2014	800,42	4.905,90	13.021,04	740,79	1.120.349,00	355,64	0,00

**Tabla A2.3**

**Emisiones anuales para el vehículo C2 (camión mediano)**

**Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	923,68	4.058,93	10.271,56	559,36	868.677,44	275,75	0,00
2006	898,82	4.024,82	10.218,04	558,16	865.186,75	274,64	0,00
2007	899,01	4.026,16	10.221,64	558,37	865.498,75	274,74	0,00
2008	899,25	4.027,82	10.226,11	558,62	865.884,88	274,86	0,00
2009	899,50	4.029,52	10.230,67	558,89	866.279,31	274,99	0,00
2010	899,76	4.031,25	10.235,32	559,15	866.680,38	275,11	0,00
2011	900,04	4.033,09	10.240,23	559,43	867.103,88	275,25	0,00
2012	900,36	4.035,08	10.245,52	559,73	867.559,56	275,39	0,00
2013	900,73	4.037,24	10.251,23	560,06	868.050,13	275,55	0,00
2014	901,16	4.039,66	10.257,59	560,42	868.594,81	275,72	0,00

Tabla A2.4

## Emisiones anuales para el vehículo C3 (camión pesado)

Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km

Año	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO	Pb
2005	858,46	4.904,06	12.904,26	728,57	1.106.931,13	351,38	0,00
2006	847,21	4.797,28	12.609,01	711,18	1.081.170,75	343,20	0,00
2007	847,23	4.799,84	12.616,56	711,65	1.081.843,63	343,42	0,00
2008	847,26	4.803,00	12.625,89	712,22	1.082.673,75	343,68	0,00
2009	847,30	4.806,26	12.635,49	712,82	1.083.528,75	343,95	0,00
2010	847,33	4.809,61	12.645,35	713,43	1.084.406,38	344,23	0,00
2011	847,37	4.813,18	12.655,88	714,08	1.085.344,50	344,53	0,00
2012	847,42	4.817,08	12.667,37	714,79	1.086.366,63	344,85	0,00
2013	847,47	4.821,36	12.679,96	715,57	1.087.487,38	345,21	0,00
2014	847,54	4.826,22	12.694,26	716,45	1.088.759,63	345,61	0,00

Tabla A2.5

## Emisiones anuales para el vehículo T3-S2 (camión articulado)

Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km

Año	HC	CO	NOx	PM	CO <sub>2</sub>	SO	Pb
2005	1.434,30	368,54	23.866,51	578,81	1.617.607,13	513,49	0,00
2006	1.376,16	383,60	23.589,23	566,43	1.618.198,63	513,67	0,00
2007	1.376,51	384,04	23.603,05	566,70	1.619.362,00	514,04	0,00
2008	1.376,94	384,58	23.620,12	567,03	1.620.797,50	514,50	0,00
2009	1.377,38	385,13	23.637,65	567,38	1.622.271,13	514,97	0,00
2010	1.377,84	385,70	23.655,63	567,73	1.623.778,88	515,44	0,00
2011	1.378,34	386,30	23.674,80	568,10	1.625.383,00	515,95	0,00
2012	1.378,90	386,95	23.695,63	568,51	1.627.121,00	516,51	0,00
2013	1.379,52	387,65	23.718,38	568,96	1.629.011,38	517,11	0,00
2014	1.380,24	388,42	23.744,05	569,48	1.631.132,50	517,78	0,00

**Tabla A2.6**

**Emisiones anuales para el vehículo T3-S3 (camión articulado)**

**Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	1.462,25	404,43	24.992,17	600,70	1.712.454,88	543,59	0,00
2006	1.403,36	414,68	24.596,18	586,31	1.702.018,63	540,28	0,00
2007	1.403,78	415,16	24.611,58	586,62	1.703.299,38	540,69	0,00
2008	1.404,30	415,74	24.630,60	586,99	1.704.878,88	541,19	0,00
2009	1.404,84	416,34	24.650,15	587,38	1.706.501,75	541,70	0,00
2010	1.405,40	416,95	24.670,21	587,78	1.708.163,50	542,23	0,00
2011	1.406,00	417,60	24.691,61	588,21	1.709.932,88	542,79	0,00
2012	1.406,67	418,30	24.714,88	588,67	1.711.852,13	543,40	0,00
2013	1.407,41	419,06	24.740,32	589,18	1.713.942,63	544,07	0,00
2014	1.408,28	419,91	24.769,08	589,76	1.716.294,63	544,81	0,00

**Tabla A2.7**

**Emisiones anuales para el vehículo T3-S2-R4(camión doblemente articulado)**

**Variable de conservación 3, en gramos por 1000 vehículos - km**

<b>Año</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO</b>	<b>Pb</b>
2005	1.570,82	506,64	28.508,39	671,97	1.998.795,13	457,54	0,00
2006	1.506,98	503,09	27.741,55	650,95	1.955.121,00	447,54	0,00
2007	1.507,70	503,64	27.761,87	651,38	1.956.734,88	447,91	0,00
2008	1.508,58	504,31	27.786,97	651,90	1.958.726,38	448,37	0,00
2009	1.509,50	505,01	27.812,80	652,44	1.960.774,88	448,84	0,00
2010	1.510,44	505,72	27.839,32	653,00	1.962.875,13	449,32	0,00
2011	1.511,46	506,48	27.867,66	653,59	1.965.115,63	449,83	0,00
2012	1.512,58	507,30	27.898,53	654,24	1.967.552,13	450,39	0,00
2013	1.513,82	508,19	27.932,36	654,95	1.970.216,25	451,00	0,00
2014	1.515,25	509,19	27.970,74	655,76	1.973.228,75	451,69	0,00



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))

§ Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 ([www.imt.mx](http://www.imt.mx))

**CIUDAD DE MEXICO**

Av Patriotismo 683  
Col San Juan Mixcoac  
03730, México, D F  
tel (55) 55 985610  
fax (55) 55 986457

**SANFANDILA**

km 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro.  
tel (442) 216 9777  
fax (442) 216 9671

[www.imt.mx](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)