

**COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES PARA EL CÁLCULO  
DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES UTILIZANDO MODELOS DE  
ASIGNACIÓN DE TRÁFICO**

**JUAN DAVID MACHADO ARIAS  
SILVIA JULIANA MANTILLA GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

**COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES PARA EL CÁLCULO  
DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES UTILIZANDO MODELOS DE  
ASIGNACIÓN DE TRÁFICO**

**JUAN DAVID MACHADO ARIAS  
SILVIA JULIANA MANTILLA GALVIS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Civil**

**Director:  
YERLY FABIAN MARTÍNEZ ESTUPIÑAN  
Ingeniero Civil, Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia agradecemos a Dios y a nuestra familia que son nuestra motivación.

Así mismo agradecemos a nuestro director, el ingeniero Yerly Fabián Martínez por dirigir nuestro proyecto, así como también por su confianza y acompañamiento en el proceso de ejecución del mismo.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	14
1. DESCRIPCIÓN	16
2. MODELOS EXISTENTES DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES	18
2.1 MODELO MOBILE	18
2.1.1 Categorías vehiculares.	20
2.1.2 Contaminantes	20
2.2 MODELO MOVES	21
2.2.1 Categorías vehiculares	22
2.2.2 Contaminantes	24
2.3 MODELO IVE	25
2.3.1 Categorías vehiculares	26
2.3.2 Contaminantes	27
2.4 MODELO COPERT	29
2.4.1 Categorías vehiculares	29
2.4.2 Contaminantes	30
2.5 DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS DE EMISIONES DE GASES	31
3. MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO EXISTENTES	34
3.1 MODELO GETRAM	34
3.1.1 Modelamiento	35
3.1.2 Parámetros de entrada	35
3.1.3 Parámetros de salida	36
3.2 MODELO ESTRAUS	37
3.2.1 Parámetros de entrada	37

3.2.2 Parámetros de salida	38
3.3 MODELO TRANSCAD	38
3.3.1 Parámetros de entrada	39
3.3.2 Parámetros de salida	40
3.4 COMPARACIÓN	41
4. CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS	52

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ejemplo del aporte de emisiones contaminantes por parte de cada tipología de transporte en la ciudad de Bogotá.	17
Figura 2. Ejemplo de Fuentes de Emisiones en Vehículos Automotores.	21
Figura 3: Ejemplo de los principales gases contaminantes y su aporte en la calidad del aire.	28
Figura 4: Esquema metodológico de un estudio de modelización.	40

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Inventario de emisiones Fuentes móviles.	16
Tabla 2. Categorías vehiculares consideradas por MOVES. (TC: trayecto corto, TL: trayecto largo)	23
Tabla 3. Ejemplo de resultados arrojados por MOVES en años.	25
Tabla 4. Ejemplo de algunas categorías vehiculares definidas por IVE.	27
Tabla 5. Categorías vehiculares consideradas por IVE.	30
Tabla 6. Diferencias relevantes entre los modelos estudiados.	32
Tabla 7. Parámetros contemplados en el simulador GETRAM.	36
Tabla 8. Ejemplo de esquema de resultados obtenidos por GETRAM y sus respectivas unidades.	36
Tabla 9. Parámetros de entrada para el modelamiento en STRAUS.	37
Tabla 10. Parámetros de salida para el modelamiento en STRAUS.	38
Tabla 11. Parámetros de entrada para el modelamiento en TRANSCAD.	39
Tabla 12. Parámetros de salida para el modelamiento en TRANSCAD.	41

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Descripciones del modelo MOBILE	53
ANEXO B. Descripción para el modelo MOVES	56
ANEXO C. Descripción para el modelo IVE	58
ANEXO D. Descripción del modelo COPERT	60
ANEXO E. Comparación entre los modelos MOBILE, MOVES, IVE Y COPERT	61
ANEXO F. Paralelo entre modelos de asignación de tráfico	62
	62

## RESUMEN

**TÍTULO:** COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS EXISTENTES PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES UTILIZANDO MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO\*

**AUTORES:** JUAN DAVID MACHADO ARIAS\*\*  
SILVIA JULIANA MANTILLA GALVIS

**PALABRAS CLAVE:** Calidad del Aire, Contaminantes, Parámetros Ambientales, Parámetros de Movilidad, Factores de Emisión.

### DESCRIPCIÓN

La contaminación es probablemente el mayor foco de preocupación a nivel global debido a la producción excesiva de contaminantes y las consecuencias que esto conlleva, gran parte de esta contaminación a medida de los años se ha tratado de mitigar y monitorear con el fin de brindar salud y protección a la sociedad. En el auge en el que se encuentra la venta de vehículos que funcionan con combustibles fósiles, se ha demarcado un gran incremento de emisiones contaminantes por parte de estos, los cuales requieren ser proyectados y estudiados con gran precisión, aunque hoy en día el monitoreo de estos aún se encuentra con un bajo nivel de desarrollo debido a que no es posible abarcar grandes áreas de centros urbanos, se han ido implementado software y metodologías que permiten la estimación y caracterización de los diferentes gases contaminantes producidos por estos vehículos. A medida que el parque automotor crece en las diferentes ciudades se requiere una mejor organización del tráfico de tal manera que se garantice la movilidad. Para esto existen diferentes modelos de asignación de tráfico que permiten la optimización del flujo vehicular y el diseño de nuevos corredores viales. En el presente artículo se presentan diferentes metodologías y software para el cálculo de emisiones contaminantes que permiten realizar estimaciones futuras combinado con el uso, de diferentes modelos de asignación de tráfico que permiten abarcar zonas más grandes de estudio proporcionando información detallada y un mejor análisis de esta.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director: Yerly Fabián Martínez Estupiñán, Ingeniero Civil. Ms.C.

## ABSTRACT

**TITLE:** COMPARISON OF EXISTING METHODOLOGIES FOR CALCULATING POLLUTANT EMISSIONS USING TRAFFIC ASSIGNMENT MODELS\*

**AUTORES:** JUAN DAVID MACHADO ARIAS\*\*  
SILVIA JULIANA MANTILLA GALVIS

**KEY WORDS:** Air Quality Pollutants, Contaminants, Environmental Parameters, Mobility Parameters, Emission Factors.

### DESCRIPTION

Contamination is probably the biggest concern at a global scale since the massive production of pollutant agents generates severe consequences on the environment. There have been several attempts to mitigate this effect through the years and to track it with the aim of protecting society. Currently, there peak has been reached in the car selling sector, which work with fossil fuel and therefore there has been an increase in the emissions of pollutants that have to be studied with a higher precision. Although the monitoring of these agents remains on a low development level due to the impossibility of including big areas in urban settlements, different software and methodologies have been implemented to estimate and characterize the wide variety of pollutants that come from vehicles. As the number of cars grows in a city, a better traffic allocation is required in order to guarantee mobility. To this effect there are several traffic assignment models which allow the optimization of traffic flow and the design of new traffic lanes. This research project presents different methodologies and software to quantify pollutant emissions which enable to predict them. Different traffic assignation models are presented along with the pollutant emission models to include bigger study areas which provide more detailed information on the phenomena and facilitate a better analysis of it.

---

\* Degree work

\*\* School of Physics and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering Director: Yerly Fabián Martínez Estupiñan, Ingeniero Civil. Ms.C.

## INTRODUCCIÓN

En esta sociedad una de las problemáticas más relevantes es la contaminación ambiental, la cual aqueja diariamente a sus habitantes, ya que viene afectando su entorno. Por ello, la mayoría de las personas han empezado a tener conciencia ambiental adoptando reglas mínimas para mitigar un daño irreversible del planeta.

Es de resaltar que se han realizado distintos esfuerzos, para producir un cambio que favorezca al medioambiente, aunque no han sido lo suficientemente grandes para que estos den sus frutos. Se han generado nuevas iniciativas en diferentes ámbitos con un enfoque más detallado, que junto a ellos generarán un mayor impacto y la posible solución a dicha problemática.

Uno de los aspectos de sumo interés en lo que se refiere al deterioro ambiental es la contaminación del aire, el cual es el receptor diario de emisiones contaminantes de fuentes fijas y móviles. Es de vital importancia mantener la calidad del aire para los seres vivos; por ello, surge la necesidad de conocer cuál es el impacto que generan en este la circulación diaria de vehículos por las vías de una ciudad, y monitorear las emisiones de gases contaminantes producidas a lo largo del tiempo. Por esta razón en el mundo existen diferentes metodologías y *software* que permiten obtener la cantidad de vehículos que circulan por una determinada malla vial, y a su vez existen otros que determinan el nivel de emisiones contaminantes que perturban el aire como lo es la presencia de monóxido de carbono, dióxido de azufre, nitrógeno, ozono y material particulado. Ellos posibilitan una zona de análisis mucho más amplia.

Para el caso del área metropolitana de Bucaramanga estos compuestos son analizados por la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la cual cuenta con estaciones de monitoreo de calidad del aire en sitios muy específicos como lo son los sectores del Mutis y Real de Minas. Su campo de acción es muy limitado, ya que están restringidos a unos rangos máximos según las normas locales de calidad del aire, pues estos componentes en gran cantidad o a exposiciones crónicas en concentraciones bajas, tienen efectos nocivos para la salud humana: “Efectos adversos en órganos de alto consumo de oxígeno como el cerebro (déficit en memoria, atención, concentración y alteraciones del movimiento tipo parkinsonismo) y el corazón (hipertensión arterial, aparición de arritmias y signos electrocardiográficos de isquemia)”.

“Los asmáticos son especialmente sensibles a los efectos del NO<sub>2</sub>; se ha encontrado que el 70 % de ellos responden a concentraciones más bajas que las personas sanas (90-560 560 µg/m<sup>3</sup> (0,05-0,3 ppm) frente a mayor de 1880 µg/m<sup>3</sup> (1 ppm) en personas sanas). El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se ha asociado a problemas de asma y bronquitis crónica, aumentando la morbilidad y mortalidad en personas mayores y niños”<sup>1</sup>.

Es por ello que en este artículo se presenta un análisis hecho mediante un proceso de recopilación y consulta bibliográfica acerca de los modelos con los cuales actualmente se cuentan y han sido de mayor impacto a nivel mundial, siendo utilizados como herramientas informáticas para la realización de estudios.

## 1. DESCRIPCIÓN

Un inventario de emisiones contaminantes es una herramienta importante para realizar una gestión ambiental, que permita identificar las fuentes más destacadas de contaminación y los tipos de contaminantes que estos generan. Ello da una idea del aporte que tiene cada uno de estos para el deterioro del aire y la atmósfera; lo cual permite identificar las diferentes fuentes de emisiones de gases y las posibles medidas para su reducción, marcando las tendencias en los niveles de emanación. Existen modelos que permiten realizar inventarios de emisiones para apoyar de muchas maneras al control y regulación de estas. Sin embargo, debe entenderse de manera precisa el funcionamiento de cada modelo que realiza este inventario de efluvios, de manera que la información en la cual se basa sea completa, confiable y veraz. Como resultado se logran fuentes confiables de predicciones con bajos márgenes de incertidumbre, reduciendo las posibles pérdidas económicas e información errónea.<sup>2</sup>

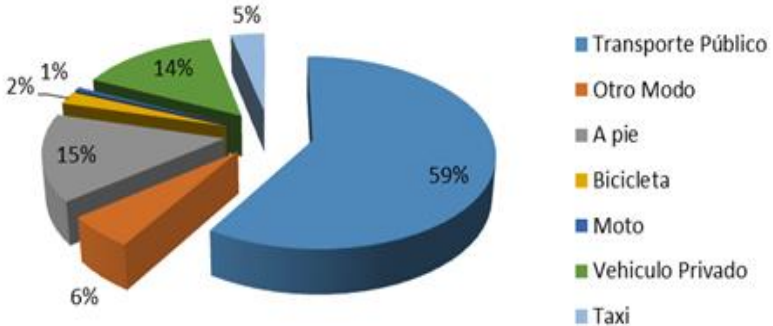
Un ejemplo palpable de la mejora en la calidad del aire obtenida a partir del uso de la información resultante, luego de realizar un inventario de gases, se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1. Inventario de emisiones Fuentes móviles.**

Primer Inventario de Gases Efecto Invernadero GEI-Bogotá: Metodología e Información fuentes móviles

CONTAMINANTES	UNIDADES	Todos	Livianos	Pesados	Articulados
CO	g/Km	15.47 ± 2.84	8.27 ± 1.96	385.2 ± 142.3	7.75
NOX	g/Km	0.41 ± 0.09	0.11 ± 0.02	18.9 ± 0.37	10.05
SO2	g/Km	0.10 ± 0.02	0.06 ± 0.02	2.82 ± 1.12	-
COV	g/Km	5.58	-	-	-
PM	g/Km	0.35 ± 0.08	0.27	2.38	0.22

**Figura 1. Ejemplo del aporte de emisiones contaminantes por parte de cada tipología de transporte en la ciudad de Bogotá.**



Fuente: Alcaldía mayor de Bogotá Secretaria Distrital de Ambiente “Calidad del aire en Bogotá e iniciativas para mitigar el cambio climático”, 2014.

## 2. MODELOS EXISTENTES DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

En la actualidad existe gran preocupación debido a los altos niveles de contaminación encontrados en el ambiente, especialmente en el aire. Se han venido realizando esfuerzos, aunque no los suficientes, para que la calidad de este mejore. Algunos países como México y Japón, han tenido iniciativa por reducir y controlar sus emisiones contaminantes como, por ejemplo, la *Convención sobre la Contaminación Transfronteriza a Larga Distancia*, adoptada en Ginebra en 1979, dentro de la cual se han establecido diversos protocolos: el de Helsinki sobre el SO<sub>2</sub> (1985); el de Sofía sobre los NO<sub>x</sub> (1988); el de Génova sobre los COVs (1991) y el Protocolo de Oslo sobre el azufre (1994). El surgimiento de estos tratados ha generado que en diferentes países se hayan venido desarrollando *software* y metodologías que ayudan a estimar los niveles de los principales contaminantes, como medida inicial para la mitigación del impacto negativo que producen. Algunos de estos modelos se presentan a continuación.<sup>3</sup>

### 2.1 MODELO MOBILE

“El modelo MOBILE es un programa de cómputo integrado por rutinas elaboradas en lenguaje de programación Fortran, y es utilizado para el cálculo de factores de emisión para vehículos automotores de gasolina y diésel, así como para ciertos vehículos especializados, como los vehículos a gas natural. El programa ha ido evolucionando y su versión actual (MOBILE6.2) proporciona una herramienta analítica flexible que puede aplicarse a una variedad amplia de condiciones geográficas y de características de la flota vehicular.”<sup>4</sup>

Algunas de las aplicaciones fundamentales del modelo MOBILE han sido utilizadas en el desarrollo de los inventarios de emisiones vehiculares en Estados Unidos y en otros países del mundo donde predominan los vehículos con tecnología norteamericana.

MOBILE6 calcula factores de emisión para cada contaminante en gramos por milla [g/milla] así como también para cada tipo de vehículo considerado en la flota analizada.<sup>5</sup>

Con el fin de realizar la estimación de los factores de emisión para los contaminantes y tipos de vehículos en una ciudad determinada, MOBILE requiere que le sean suministrados una serie de datos que tienen gran incidencia en las emisiones generadas por la flota vehicular del sitio en estudio. Para algunos de estos requerimientos, el modelo cuenta con valores predeterminados; sin embargo, dichos valores representan un “promedio nacional” (para Estados Unidos en el caso de la versión original), por lo cual es necesario incorporar al modelo información estimada localmente, a fin de que las condiciones del sitio para el que se desea obtener el inventario de emisiones queden reflejadas en los factores de emisión producidos por el modelo.

Algunos de los parámetros de entrada demandados por MOBILE6 se muestran en el cuadro A.1 correspondiente al Anexo A. Como mínimo, el usuario debe proporcionar datos como el año calendario, la temperatura ambiental máxima y mínima y la volatilidad del combustible, así como también, datos sobre la flota y la actividad vehicular.

Cuadro A.1, Insumos de MOBILE6-Anexo A.

**2.1.1 Categorías vehiculares.** MOBILE calcula factores de emisión para 28 diferentes categorías vehiculares, las cuales son conformadas en base a criterios tales como el uso del vehículo, tipo de combustible empleado, peso bruto vehicular y tecnología del motor. Adicionalmente, para cada categoría vehicular MOBILE tiene la capacidad de estimar factores de emisión para 25 años-modelo, dentro de los años calendario comprendidos entre 1952 a 2050. Esto quiere decir que si el año base del inventario de emisiones es 2009, para cada categoría vehicular se puede estimar el factor de emisión para los autos 2009 y los 24 años-modelo anteriores.

Es de suma importancia resaltar que MOBILE sólo incluye, dentro de sus categorías vehiculares, vehículos construidos bajo estándares estadounidenses (como Tier0, TierI, TierII, EPA98,etc.), mas no incluye los fabricados con normas de otros países como Europa o Japón.

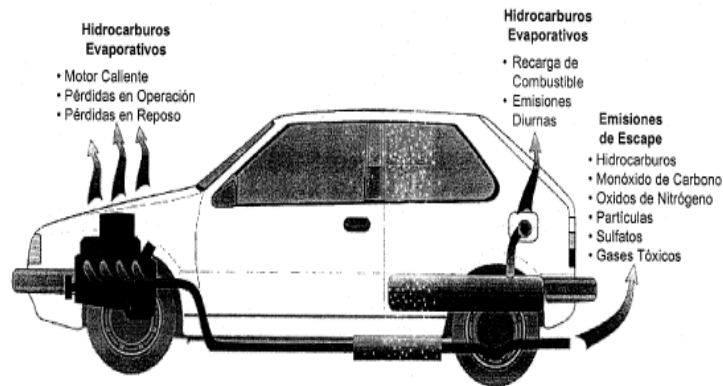
MOBILE fue diseñado para estimar factores de emisión considerando los provenientes por escape, como por ejemplo, las emisiones evaporativas para los vehículos que circulan en vías y carreteras.

Cuadro A.2, Categorías vehiculares MOBILE6-Anexo A.

**2.1.2 Contaminantes.** Los contaminantes para los cuales es capaz de generar factores de emisión en unidades de gramos de contaminante emitido por milla recorrida se muestran en el cuadro A.3.

Cuadro A.3, Contaminantes considerados por MOBILE6- Anexo A.

**Figura 2. Ejemplo de Fuentes de Emisiones en Vehículos Automotores.**



Fuente: Radian International 10389 Old Placerville Road Sacramento, “Manuales del programa de inventarios de emisiones de México”, Vol 4, 1997.

MOBILE arroja los resultados de su estimación únicamente en año calendario, la cantidad depende del deseo del usuario. Los factores de emisión son especificados por tipo de vehículo según la nomenclatura asignada y por tipo de combustible acorde a los considerados por el modelo. En el cuadro 3.4 se muestra un ejemplo del formato de salida del modelo MOBILE6, en el cual se puede observar una última columna resumen para la totalidad de vehículos en circulación que fueron estudiados y su respectivo promedio de factor de emisión por tipo de combustible emitido.

Cuadro A.4, Ejemplo de archivo de salida de MOBILE6 – Anexo A.

## **2.2 MODELO MOVES**

Para atender las necesidades referentes al análisis de emisiones vehiculares, la oficina de transporte y calidad del aire (OTAQ, por sus siglas en inglés), de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, ha desarrollado un

sistema de modelación de emisiones vehiculares llamado *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), el cual consiste en una base de datos escrita en Java / MySQL (*software* para el manejo de bases de datos relacionales). Este sistema permite estimar emisiones para un amplio rango de contaminantes, lo cual mejora la estimación a través del uso de patrones de manejo. Este modelo puede ser usado tanto para vehículos que circulan en carretera como para vehículos fuera de ella, así como también, permite múltiples escalas de análisis, las cuales van desde intersecciones hasta la estimación de un inventario nacional. El propósito fundamental de MOVES es facilitar la ejecución y el desarrollo de inventarios de emisiones vehiculares y la evaluación de políticas con mayor resolución y menor incertidumbre que MOBILE.

Para estimar las emisiones de contaminantes generadas por cada categoría de fuente, MOVES incluye valores preestablecidos. Sin embargo, estos valores son representativos de la flota vehicular de Estados Unidos, por lo que es necesario incorporar información que caracterice adecuadamente las condiciones del sitio de interés si se desea aplicar en otro país.

Una lista de los parámetros de entrada demandados por MOVES son mostrados en el cuadro A.1 correspondiente al Anexo A.

Cuadro A.1., Insumos de MOVES-Anexo A.

**2.2.1 Categorías vehiculares.** En MOVES el criterio primordial de caracterización es el uso del vehículo y sobre esta base, la flota vehicular en circulación se clasifica en 13 categorías. Sin embargo, en su diseño se implementó el concepto de “subcategorías de fuente”, debido a que el modelo estima las emisiones teniendo en cuenta no solo el uso de los vehículos sino también las variables que mayor influencia tienen en los patrones de actividad, consumo de energía y generación de emisiones. Bajo este concepto, los vehículos dentro de cada

categoría, son reagrupados partiendo de criterios como tipo de combustible, tecnología del motor, año, modelo y peso del vehículo cargado.

En general, esta característica de conformar subcategorías le otorga ventajas a MOVES para realizar estimaciones con diferentes mezclas de tecnologías vehiculares.

MOVES está diseñado para estimar las emisiones provenientes tanto de los vehículos que circulan en carretera como de los vehículos fuera de camino. Dicha estimación considera las emisiones generadas escape (como las evaporativas), añadiendo a ellas, las emisiones de partículas por el desgaste de los frenos, desgaste de las llantas, etc.

MOVES considera 13 categorías vehiculares bajo un único criterio, siendo éste el uso del vehículo. Por esta razón la denominación de sus categorías se presenta de la siguiente manera en la Tabla 2.

**Tabla 2. Categorías vehiculares consideradas por MOVES. (TC: trayecto corto, TL: trayecto largo)**

<b>CATEGORIAS VEHICULARES</b>
Vehículos de pasajeros
Camiones de pasajeros ligeros
Camiones comerciales ligeros
Camiones recolectores de basura
Camión de trayecto largo
Camión de trayecto corto
Motorhome
Autobuses urbanos
Autobuses de ciudad a ciudad
Autobuses escolares
Camiones de combinación TC
Camiones de combinación TL
Motocicletas

MOVES para obtener un análisis más detallado a partir de sus categorías, define unas subcategorías vehiculares bajo criterios como el año-modelo, tipo de combustible, tecnología y tamaño del motor.

Las Descripciones de las categorías vehiculares se encuentran especificadas en el cuadro B.1 correspondiente al Anexo B, y las subcategorías vehiculares se encuentran detalladas en el cuadro 3.6 del mismo anexo mencionado anteriormente.

Cuadro B.1, Categorías vehiculares MOVES-Anexo B.

Cuadro B.2, Subcategorías vehiculares MOVES- Anexo B.

**2.2.2 Contaminantes.** “La primera versión de MOVES, conocida como MOVES4 o MOVES2004, únicamente estima emisiones de óxido nitroso, metano y bióxido de carbono, conocidos gases de efecto invernadero, en función del consumo de combustible por tipo de vehículo. Finalmente, MOVES es capaz de estimar las emisiones para todos los contaminantes por hora del día, día de la semana, o mes, para fechas desde 1999 hasta 2050.”<sup>6</sup>

Cuadro A.3, Contaminantes considerados por MOVES-Anexo A.

El modelo MOVES arroja el inventario de emisiones en toneladas para tipo de contaminante y categoría vehicular en días, meses o años de acuerdo con las necesidades del usuario, como lo muestra la tabla 3.

**Tabla 3. Ejemplo de resultados arrojados por MOVES en años.**

	Tipo de Contaminante	
	CO2	CH4
Tipo de vehículo	Ton/año	Ton/año
Autobus urbano	5492	0.05
Motos	5836.85	19.20
Vehículo de pasajeros	2779.01	69.28
Camiones comerciales	2313.07	158.30

### **2.3 MODELO IVE**

El modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE) es un programa que permite la estimación de las emisiones de los contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero provenientes de vehículos automotores que circulan por carretera; así como también, considera las emisiones provenientes del escape y las evaporativas. Al igual que MOVES, incorpora en su estimación, la medición de patrones de manejo.

“IVE fue desarrollado por la Universidad de California en Riverside, el Colegio de Ingeniería del Centro para la Investigación Ambiental y Tecnología, el Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sustentables y la empresa Investigación en Sistemas Globales Sustentables, con fondos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y está disponible actualmente en varios idiomas, entre ellos el inglés, español, francés y ruso.”<sup>7</sup>

El fundamento para el desarrollo e implementación del modelo IVE fue el de proveer a países en vías de desarrollo, una herramienta de estimación rápida y eficiente del inventario de emisiones de vehículos en circulación, con el cual, se le facilitaría a las autoridades evaluar estrategias de control y planeación de transporte.

Debido a la insuficiencia de los datos en ciertos países que se encuentran en vía de desarrollo junto con la falta de experiencia para usar de manera adecuada los modelos de emisiones de gases más complejos, IVE fue diseñado para, ser flexible, adaptarse a cualquier país, ser fácil de entender y usar, demandar pocos insumos, utilizar mediciones de campo y generar resultados consistentes. En el cuadro 3.7 correspondiente al Anexo 3 se muestra un esquema de la arquitectura del modelo IVE para comprender un poco mejor las etapas complementarias usadas en su análisis.

Para estimar el inventario de emisiones para la región de interés, IVE requiere los insumos que se muestran en el cuadro A.1 correspondiente al Anexo A.

Cuadro A.1, Insumos de IVE- Anexo A.

**2.3.1 Categorías vehiculares.** IVE es un modelo que permite la estimación de emisiones contaminantes generadas por fuentes móviles como los automóviles, motocicletas, camiones y autobuses, permitiendo así, el uso de factores de emisión europeos y estadounidenses. En lo particular, contempla un total de 7 categorías vehiculares, 1372 tecnologías predefinidas y 45 tecnologías adicionales no definidas.

“Las tecnologías predefinidas se encuentran agrupadas con base en los siguientes parámetros: tamaño del vehículo (7 subcategorías incluyendo camiones); tipo de combustible (5 subcategorías); uso del vehículo (3 subcategorías); sistema de alimentación del combustible (3 subcategorías); sistemas de control de emisiones evaporativas (varias subcategorías) y sistemas de control de emisiones por escape (varias subcategorías).”<sup>8</sup>

El cuadro 3.8 presenta algunos de los criterios usados para definir las categorías vehiculares en el modelo IVE.

Cuadro C.2, Criterios para definir las categorías vehiculares en IVE-Anexo C.

Una categoría vehicular es una combinación irrepetible de valores, es decir, “una categoría vehicular pudiera quedar definida por todos los vehículos ligeros (con peso bruto vehicular inferior a 2.268 kg); a gasolina con alimentación de combustible vía carburador; sin sistemas de control de emisiones; con menos de 79.000 kilómetros recorridos y tamaño de motor inferior a 1.5 litros.”<sup>9</sup>Esta flexibilidad en la definición de las categorías vehiculares le otorga a IVE la posibilidad de estimar las emisiones de diferentes mezclas de tecnologías vehiculares.

IVE define sus categorías vehiculares en el orden de: Tipo de vehículo, tipo de combustible y Peso del vehículo, tal como se muestra en la tabla 4.

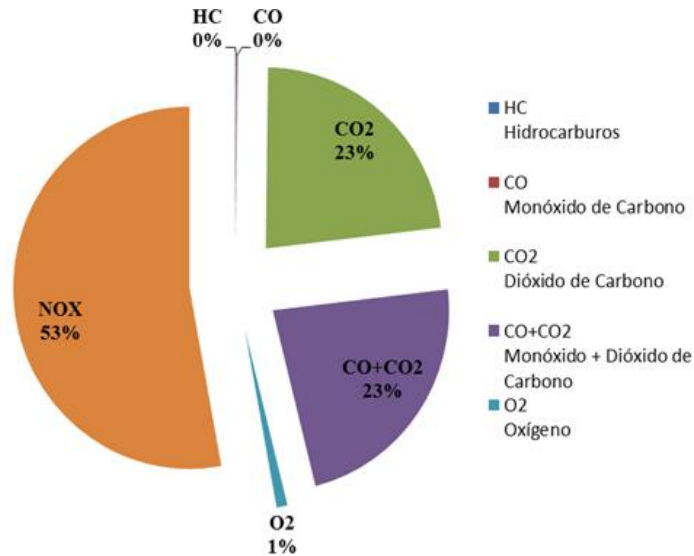
**Tabla 4. Ejemplo de algunas categorías vehiculares definidas por IVE.**

<b>CATEGORIA VEHICULAR</b>
Automóvil/Camión ligero a gasolina; ligero
Automóvil/Camión ligero a gasolina; mediano
Automóvil/Camión ligero a gasolina; pesado

**2.3.2 Contaminantes.** El modelo IVE realiza la respectiva estimación de los gases generados por contaminantes tóxicos como también los generados por el efecto invernadero, los cuales se muestran en la figura 3. El listado específico de los contaminantes para los cuales IVE es capaz de estimar las emisiones de las diferentes categorías vehiculares se muestra en el cuadro A.3 correspondiente al Anexo A.

Cuadro A.3, Contaminantes considerados por IVE- Anexo A.

**Figura 3: Ejemplo de los principales gases contaminantes y su aporte en la calidad del aire.**



Fuente: Smith Quintero Ricardo, Manual del usuario, "Inventario de emisiones de fuentes móviles-Etrome-", Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Agosto 2006.

El modelo IVE muestra los resultados de la estimación en horas o días de acuerdo con la necesidad del usuario, como se muestra en el cuadro 3.9. Los resultados pueden ser exportados para abrirse en una planilla (tipo Excel) o en otra aplicación.

Cuadro C.3, Parámetros de salida del modelo IVE- Anexo C.

## 2.4 MODELO COPERT

Este sistema de modelación conocido coloquialmente como COPERT (*Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*), es un programa elaborado en Visual Studio.NET 2003 en Microsoft, para efectuar estimaciones de gases vehiculares. Su creación se debe a la necesidad europea de tener una herramienta para calcular las emisiones provenientes de vehículos en circulación, como también las de vehículos fuera de camino (como por ejemplo, los equipos con motores de combustión interna empleados en agricultura, residencial, industria, barcos y ferrocarriles). COPERT fue diseñado, fundamentalmente, para realizar la estimación de emisiones de vehículos fabricados en Europa y regidos de acuerdo a las especificaciones tecnológicas del mismo sitio (como por ejemplo EURO II, III Y IV).<sup>10</sup>

“La metodología de COPERT permite la compilación de inventarios nacionales anuales; sin embargo, se ha demostrado que también se puede utilizar, con un suficiente grado de certeza, para la compilación de inventarios de emisiones urbanos hasta con una resolución espacial de 1x1 km<sup>2</sup> y una resolución temporal de 1 hora.”<sup>11</sup>

Para realizar el inventario de emisiones del sitio en estudio, COPERT requiere que le sean suministrados los insumos que se muestran en el cuadro A.1 correspondiente al Anexo A.

Cuadro A.1, Insumos de COPERT-Anexo A.

**2.4.1 Categorías vehiculares.** COPERT realiza la estimación de emisiones para seis categorías vehiculares, cuyas emisiones son generadas básicamente por los vehículos a gasolina (con y sin plomo), diésel y GLP. Su categorización la realiza

en base a dos criterios fundamentales como lo son el uso y el peso de vehículo. Las categorías vehiculares se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5. Categorías vehiculares consideradas por IVE.**

<b>CATEGORIA VEHICULAR</b>
Vehiculos de pasajeros
Vehiculos ligeros
Vehiculos pesados
Autobuses urbanos
Motonetas
Motocicletas

Para obtener una estimación con un mínimo margen de error, COPERT construye unas subcategorías vehiculares a partir de las categorías ya existentes indicadas en la tabla 5. Estas subcategorías se fundamentan en criterios tales como: tipo de combustible, peso del vehículo, tamaño del motor, tecnología del motor, etc. El cuadro D.1 correspondiente al Anexo D, muestra algunas de las consideraciones específicas, que abarca cada criterio, las cuales se emplean en la construcción de las subcategorías en COPERT.

Cuadro D.1, Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT-Anexo D.

El número de subcategorías establecidas en COPERT III es de 48. Cabe resaltar que dicha cifra puede variar de acuerdo a las necesidades del usuario.

**2.4.2 Contaminantes.** El cuadro A.3 correspondiente al Anexo A, muestra la lista de contaminantes considerados por COPERT para estimar el inventario de emisiones de fuentes vehiculares. “Una característica de este modelo es su

capacidad para proporcionar información desagregada por especie, sobre las emisiones de hidrocarburos (propano, butano, isobutano, etileno, etc.).”<sup>12</sup>

Cuadro A.3, Contaminantes considerados en COPERT- Anexo A.

El modelo COPERT al igual que IVE realiza un inventario de emisiones de fuentes vehiculares mediante un análisis respectivo, con la diferencia de que COPERT lo realiza mediante especificaciones europeas e IVE lo hace mediante especificaciones estadounidenses y/o europeas según sea la necesidad del usuario. Los resultados arrojados por COPERT se presentan en el cuadro C.3 correspondiente a Anexo C.

Cuadro C.3, Parámetros de salida del modelo COPERT-Anexo C.

## **2.5 DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS DE EMISIONES DE GASES**

Como se desprende de lo anteriormente expuesto, la relación que se presenta entre los modelos descritos es el hecho de que requieren como parámetros iniciales, información puntual que permita de manera óptima caracterizar la flota vehicular, la actividad vehicular y los factores de emisión acordes a las condiciones de la región de interés; sin embargo, también existen diferencias. Por ejemplo, con el modelo MOBILE solo es posible obtener como resultado de la estimación factores de emisión, mientras que con los modelos restantes MOVES, IVE y COPERT ocurre todo lo contrario, ya que es factible estimar de manera directa los inventarios de emisiones vehiculares contando con diversidad en los niveles de resolución espacial y temporal.

Cabe destacar que a nivel operacional, también se perciben ciertas diferencias relevantes entre dichos modelos; una de ellas se encuentra en la forma de caracterizar la flota vehicular y su actividad, es decir, entre más elementos o criterios se tengan en cuenta en la caracterización de la flota, y junto a esto, datos de actividad específicos para cada una de ellas; mayor será la precisión en lo referente a la estimación del inventario de emisiones. En términos generales, modelos como COPERT, MOVES e IVE pueden dar lugar a la integración de inventarios de emisiones más confiables y precisas en comparación con los resultados obtenidos en base a MOBILE, teniendo en cuenta que lo anterior se presenta si se cuenta con la información pertinente para realizar la caracterización apropiada de la flota y su actividad respectivamente.

Algunas de las diferencias más relevantes son el número de categorías vehiculares que considera cada modelo y las especificaciones tecnológicas con las que trabaja. Lo anterior, se encuentra materializado en el Tabla 2.

**Tabla 6. Diferencias relevantes entre los modelos estudiados.**

	No. DE CATEGORIAS VEHICULARES	NORMATIVIDAD	
		EUROPA	U.S.A
MOBILE	28		X
MOVES	13		X
IVE	7	X	X
COPERT	6	X	

Fuente: "Guía metodológica de emisiones de gases contaminantes"- México, Vol 1, 2007.

De esta manera en los cuadros 3.11 Y 3.12 correspondiente al Anexo E, se muestran la totalidad de diferencias encontradas entre los cuatro modelos expuestos anteriormente.

Cuadro E.1, Diferencias en la caracterización vehicular de cada modelo de emisión de gases- Anexo5.

Cuadro E.2, Diferencias entre los modelos existentes de estimación de gases- Anexo 5.

### **3. MODELOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁFICO EXISTENTES**

En esta época la mayor problemática que se presenta en la contaminación vehicular es debido a la congestión de las vías en los centros urbanísticos. Una alternativa para su solución es diseñar sistemas de gestión de tráfico dinámico que permitan integrar conjuntos de tecnologías, para hacer más eficiente la forma de administrar los sistemas de transporte y disminuir los niveles de contaminación ambiental.

Para el desarrollo de estos sistemas existe la necesidad de un modelo que proporcione precisión y alta confiabilidad en la información, y de esta manera generar un estado del sistema en términos de flujo vehicular, nivel de ocupación de las vías y tiempos de viajes. Es aquí donde los modelos de asignación de tráfico juegan un papel importante, puesto que estos analizan la interacción entre la oferta y la demanda de transporte para la estimación del sistema.

Por esta razón, los resultados arrojados por los modelos de asignación de tráfico son utilizados para realizar la estimación pertinente de emisiones de gases vehiculares y de dicho modo obtener un resultado con menor incertidumbre.

#### **3.1 MODELO GETRAM**

(Generic Environment for Traffic Analysis and Modeling).

El tráfico puede ser modelado desde dos puntos de vista, siendo uno de ellos la perspectiva macroscópica y la microscópica.

Los modelos microscópicos describen el comportamiento de cada vehículo como elemento individual, influido tanto por factores internos, como por las interacciones con el resto de los vehículos y sus comportamientos.

GETRAM es un microsimulador utilizado para realizar estudios de tráfico, cuya validez y eficacia para modelar y analizar distintas situaciones ha sido probado tras su utilización en un gran número de proyectos en todo el mundo.

El programa de simulación GETRAM consta de un editor gráfico de redes de tráfico y un simulador microscópico avanzado e interactivo para redes urbanas e interurbanas.

**3.1.1 Modelamiento.** Para comenzar a construir un modelo de simulación de tráfico con el programa GETRAM, se debe representar la red y sus características en el editor, seguido de una serie de comandos y acciones que se muestran a continuación.

- Representación geométrica de la red.
- Ubicación de los distintos elementos que regulan el tráfico.
- Determinación de establecimientos de transporte público.
- Introducción de los datos al modelo.

**3.1.2 Parámetros de entrada.** En referencia a esta última acción se desprende una serie de parámetros, los cuales harán que el modelo y la simulación arrojen información que genere un nivel mínimo de incertidumbre.

A continuación se describen los diferentes parámetros contemplados en el simulador:

**Tabla 7. Parámetros contemplados en el simulador GETRAM.**

Parámetros	Descripción
Matriz "origen-destino".	Fue necesario conocer los distintos destinos tomados por los vehículos.
Composición del tráfico.	Vehículos ligeros particulares, vehículos pesados, autobuses de transporte público y privados y taxis.
Horarios e información de las líneas de transporte público.	Que pasan por la zona sometida a estudio, debido al notable efecto que las paradas de autobuses tienen en el resto del tráfico.

**3.1.3 Parámetros de salida.** Los parámetros que son arrojados por este simulador pueden ser el resultado de diferentes focos de estudio, como son: toda la red, cada sección, cada giro, cada tramo o conjunto de secciones continuas. Estos resultados son resumidos en la tabla 3.

**Tabla 8. Ejemplo de esquema de resultados obtenidos por GETRAM y sus respectivas unidades.**

Flujo Medio	Veh/h
Número medio de vehículos por Km	Veh/Km
Velocidad media de recorrido	Km/h
Velocidad media armónica	Km/h
Tiempo medio de permanencia	s/veh.Km
Tiempo medio de retraso	s/veh
Tiempo medio parado	s/Km
número medio de paradas	Paradas/veh.Km
Kilómetros totales recorridos	Km/h
Litros de combustible	1

Una vez terminada la simulación y la obtención de los resultados es necesario validar los modelos llevados a cabo, de forma que se compruebe que estos se ajustan a la realidad.

### 3.2 MODELO ESTRAUS

Los modelos macroscópicos consideran la circulación de vehículos como un fluido continuo, tratando el flujo de los mismos en conjunto y con un nivel de detalle bajo. ESTRAUS es un modelo de equilibrio simultáneo entre oferta y demanda, que tiene en cuenta la congestión en las redes antes de asignar los viajes entre pares origen-destino. Permite modelar diferentes categorías de usuarios para los distintos modos de transporte, variable de gran relevancia para la predicción de equilibrio entre oferta y demanda en un sistema urbano.

**3.2.1 Parámetros de entrada.** Los parámetros necesarios para el modelamiento en STRAUS constan de diferentes ámbitos que se describen a continuación:

**Tabla 9. Parámetros de entrada para el modelamiento en STRAUS.**

Parámetros	Descripción
Encuesta de origen y destino	Viajes generados por zona y categoría usuario. Viajes atraídos por Zona. Tiempos de viajes, caminata y espera de modos. Tarifa de costo de los distintos modos
Información transporte público	Recomidos Tarifas Frecuencias Capacidad
Información redes viales	Longitud Categoría Capacidad Tiempo de viaje

Los resultados entregados por este modelo permiten la evaluación social y privada de proyectos de transporte urbano, proporcionando beneficios sociales tanto en los niveles de servicio en la red como en el control de indicadores de rentabilidad.

**3.2.2 Parámetros de salida.** Los principales resultados obtenidos de una simulación ESTRAUS son:

**Tabla 10. Parámetros de salida para el modelamiento en ESTRAUS.**

Parámetro	Descripción
Partición modal	De toda la zona modelada.
Matrices de viajes	Modo de transporte, propósito de viaje y categoría socioeconómica del viajero.
Niveles de servicio	Tiempos y costos de desplazamiento por modo de transporte, entre las zonas del sistema completo.
Duración de los viajes	En los arcos de la red
Flujos de los vehículos en los arcos	Segmentos de las redes de transporte público.
Trechos viales	Que se encuentren congestionados.

### 3.3 MODELO TRANSCAD

TransCAD es un sistema de información geográfica (SIG) planteado principalmente para especialistas en transporte, con el fin de recolectar, exponer y estudiar datos de tránsito. Combina las características de un SIG y las capacidades de modelización en una sola plataforma integrada.

Este modelo permite ser utilizado en todos los modos de transporte y a cualquier escala geográfica o nivel de detalle.

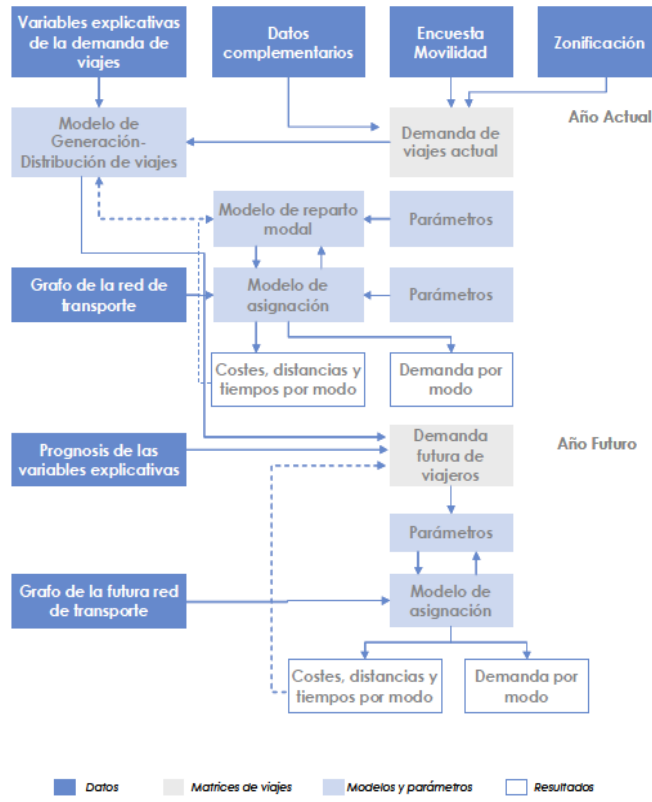
**3.3.1 Parámetros de entrada.** Para realizar proyectos futuros de sistemas de transporte se utiliza un sistema de cuatro etapas, permitiendo abarcar todos los aspectos de manera general.

Las cuatro etapas nombradas se describen a continuación en la tabla 11:

**Tabla 11. Parámetros de entrada para el modelamiento en TRANSCAD.**

<b>Etapas</b>	<b>Descripción</b>
Modelo de generación y atracción	Se realizará los análisis de importación y exportación de viajeros en distintos escenarios.
Modelo de distribución	Para examinar la relación de oferta/demanda en la zona de estudio.
Modelo de reparto modal	Realizado para la distribución de los viajeros que utilizan diferentes tipos de transporte.
Modelo de asignación	Permite determinar los caminos o rutas seleccionados en cada relación oferta/demanda, y la carga por tramos de las líneas o redes variadas durante los distintos períodos temporales de análisis.

**Figura 4: Esquema metodológico de un estudio de modelización.**



Fuente: C. Zamorano, J. M. Bigas y J. Sastre, 2004. Manual para la planificación, financiación e implantación de un sistema de transporte urbano.

**3.3.2 Parámetros de salida.** El objetivo de realizar un estudio de rutas con el *software* TRANSCAD es conocer la mejor alternativa a partir de los datos ingresados. Con base en ellos se realiza un proceso de asignación, donde el modelo genera una serie de tablas para exteriorizar los resultados del proceso.

Toda la información generada es exportable a formatos de uso común (Excel, etc.). Las tablas producidas como parámetros de salida del modelo son:

**Tabla 12. Parámetros de salida para el modelamiento en TRANSCAD.**

<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>
Carga pasajeros por ruta	Esta información se puede usar para obtener los perfiles de carga de cada una de las rutas y se pueden representar gráficamente.
Carga pasajeros por segmento	Cada segmento está definido por dos paradas.
Representación gráfica	Se puede encontrar la araña de pasajeros por ruta y/o la araña de pasajeros por segmentos.

### **3.4 COMPARACIÓN**

El modelo de asignación de tráfico cuenta con una plataforma SIG que permite la visualización de los datos en tiempo real y permite georreferenciar los corredores viales proporcionando un mejor aprovechamiento de los resultados, contrario a GETRAM Y ESTRAUS que contando con una interfaz gráfica para la visualización y configuración de la red vial hace que la abstracción de los resultados se dificulte debido a que no puede apreciar dentro de la geografía.

Un modelamiento entrelazado entre ESTRAUS y GETRAM permite el modelamiento a niveles macroscópicos y macroscópicos complementando las falencias uno del otro, aunque TRANSCAD permite realizar todos los tipos de modelamiento sin la necesidad de ser complementado por otro programa.

GETRAM cuenta con 4 etapas de composición de planeación para un modelamiento, al igual que TRANSCAD y diferente a ESTRAUS con la ventaja que este permite realizar dicho modelamiento con la ausencia de alguna de estas etapas afectando de manera mínima sus resultados.

#### 4. CONCLUSIONES

- Como resultado de la investigación se identificaron los 4 modelos más renombrados a nivel mundial para la estimación de gases vehiculares, así como también sus requisitos, encontrando que cada uno de ellos presentan características y clasificaciones vehiculares específicas, tipos de combustibles, tipos de fuentes y contaminantes para así obtener una estimación óptima y adecuada.
- Tras la elaboración del estado del arte y la información de referencia, se concluyó que los modelos de estimación de gases permiten realizar un análisis basados en el modelo utilizado siendo los más sobresalientes el de factores de emisión (como lo hace MOBILE6) o mediante inventario de emisiones (como lo hacen MOVES4, IVE y COPERT). El tipo de análisis que presenta cada modelo está sujeto a ciertas especificaciones tecnológicas de Estados Unidos (EPA) y/o de Europa (EURO III Y IV). Con base en dicho aspecto el modelo que trabaja con las especificaciones de ambos países es IVE, lo cual lo hace más ventajoso sobre los otros modelos ya que da al usuario una gama más amplia para satisfacer sus necesidades.
- Se plantea una gran diferencia entre los 4 modelos encontrados en lo que se refiere a la clasificación vehicular que cada uno realiza ya que MOBILE6 maneja un número de 28 categorías vehiculares, MOVES4 maneja 13, IVE cuenta con 7 y COPERT detalla 6 categorías respectivamente. De lo anterior se podría deducir que MOBILE6 sería la mejor opción a la hora de realizar una estimación; pero esta deducción se vería contrarrestada al mencionar los tipos de combustibles que contempla MOBILE6; pues de los 4 modelos, es junto a COPERT el que presenta menor cantidad de combustibles (3) considerados

para el análisis ya que solo tiene en cuenta la Gasolina, Diesel y GNC, dejando fuera muchos otros contaminantes como por ejemplo el Etanol, el Metanol, entre otros. Es por esta razón que no se puede definir de manera contundente cual sería el modelo más completo para realizar una óptima estimación de gases ya que cada uno presenta tanto ventajas como desventajas para cumplir con las expectativas y necesidades del usuario.

- Se identificaron 3 modelos de asignación de tráfico utilizados principalmente en el estudio y análisis de tráfico que permiten realizar estudios a diferentes niveles de detalle.
- Existe la posibilidad de relacionar las asignaciones determinadas por el modelo GETRAM (estudios microscópicos) y ESTRAUS (estudios macroscópicos) los cuales permiten un estudio completo de una red a analizar.
- TRANSCAD implementa una plataforma de estudios de tráfico con un Sistema de Información Geográfica, lo que refleja mayores ventajas al momento de compararlo con otros modelos de asignación que solo permiten la realización del estudio de tráfico sin la posibilidad de visualizarlos y analizar de manera inmediata en un SIG.
- La unificación entre los modelos de asignación de tráfico y los modelos de simulación de emisiones permiten realizar un estudio y diseño tanto de los corredores viales como de la distribución de tráfico en zonas requeridas con el fin de optimizar la relación movilidad- contaminación.
- En el municipio de Bucaramanga se han realizado estudios de estimación de gases contaminantes mediante los Equipos pertenecientes a la CDMB pero es importante resaltar que si se desea realizar dicha estimación mediante alguna de las metodologías expuestas anteriormente, se debe tener en cuenta el

inventario de parque automotor de la zona en estudio y las categorías en las cuales se subdivide este inventario, de igual manera se debe contar con la categorización de tipos de combustible.

## BIBLIOGRAFÍA

ADVANCED LOGISTIC GROUP. (2008). "Consultoría para la Capacitación en Modelación de Transporte en Plataforma TransCAD.

Astete Chuquichaico, Rolando. Metodología para mejorar el proceso de asignación de tráfico a una red de transporte. Lima, Perú, 2011. Trabajo de grado para optar por el título de maestro en ciencias con mención en ingeniería en transportes, Universidad Nacional de Ingeniería, facultad de ingeniería civil, sección de posgrado.

Canca Ortiz J.D, Galán de Vega R. Racero Moreno J. Villa Caro G. (2006). "Estimación de la emisión de contaminantes debida al tráfico urbano mediante modelos de asignación de tráfico", valencia, página 6.

Competición, E. N., & Emme, C. Y. (2005). Selección de software de modelo de transporte (pp. 1–8).

De Cea, J. and Fernandez, J.E. Transit Assignment Models, The State of the Art. HANDBOOK IN TRANSPORT, D.A. Hensher, and K.J Button. Ed. Pergamon Press, Oxford. 2000

Durán Amorocho, Natalia. Análisis de medidas de gestión de tránsito que afecten la demanda de tráfico usando trips, Santiago de Chile, Marzo de 2009, tesis para optar al grado de magister en ingeniería de transporte, Universidad de Chile.

Estudio del Ministerio de Medio Ambiente sobre contaminación por partículas en suspensión en España. Abril de 2005. (Estudio coordinado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

F. Cárdenas Roper. La Movilidad Urbana y el Ruido. I Congreso sobre Ruido Urbano. 'El Ruido Urbano Y Su Gestor Natural: El Ayuntamiento'. Vitoria-Gasteiz. Marzo de 2005.

Fernández Díaz. Estudio vía simulación del tráfico en la Plaza de la Independencia de Madrid. Proyecto del Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid dirigido por G. Fernández Rico.

Fernández Rico, G. Conclusiones del estudio del tráfico en zonas urbanas via simulación, 8º congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, Cusco, 25 de Octubre de 2007.

Fernández Rico, G. Conclusiones del estudio del tráfico en zonas urbanas via simulación". Cusco 2007. Universidad Antonio de Nebrija. Departamento de Ingeniería Industrial. Escuela Politécnica Superior.

Gabriel, L., & Díaz, M. (2010). Comparison of Traffic Assignment Methods For Different Traffic Volumes (pp. 77–84).

GIDPOT. Herramientas de transporte terrestre urbano de pasajeros de carga. Simulación del efecto de proyectos de infraestructura y políticas de transporte. Tunja 2012. Facultad de ingeniería. Escuela de transporte y Vías.

Herrera Montañez, Dayana. Modelo de emisiones vehiculares para la ciudad de Bogotá (EVB), 2007. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Ambiental, Universidad de los Andes, facultad de ingeniería, departamento de ingeniería civil y ambiental.

J. Barceló. Microscopic traffic simulation. Department of statistic and operations research. U.P. Cataluña. Barcelona, 2000.

Jornada sobre Contaminación Urbana y Tráfico. Colegio de Ingenieros Industriales de Madrid. 2007.

Lotero Vélez, Laura. Modelo matemático para la asignación de Tráfico al sistema de transporte urbano aplicado al valle de aburrá. Medellín, 2010. Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Sistemas.

Manuales de utilización de los distintos módulos del programa GETRAM. TSS Transport Simulation System.

Moreno, Jorge & Cruz, Pablo. Estudio integral del sistema de transporte urbano de pasajeros del gran mendoza". Facultad de ingeniería. Centro de tránsito y transporte.

R. Guardia López. Ingeniería de tráfico aplicada al estudio vía simulación de una red urbana del Municipio de Leganés. en la Plaza de la Independencia de Madrid. Proyecto del Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid dirigido por G. Fernández Rico.

Siegel Justin, De Grange Louis, Utilización conjunta de modelos macro y microscópicos para el análisis de sistemas de transporte urbano, X Congreso Chileno de ingeniería de Transporte. Concepción. Octubre de 2001.

Valdés González-Roldán; M. Gullón; S. De la Rica. "Ingeniería de tráfico". (3ª edición, 1998).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). (n.d). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire*, Consultado el 31 de mayo de 2013. <http://www.cdmb.gov.co/cai/cai2/>.
- [2] Correa M.A. Londoño J. Palacio C.A. (2011). “*Estimación De Las Emisiones De Contaminantes Atmosféricos Provenientes De Fuentes Móviles En El Área Urbana De Envigado, Colombia*” Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 16, Diciembre 2011, p. 149-162.
- [3] López de la Manzanara M<sup>a</sup>.T.A. (2000), *Efectos ambientales del tráfico urbano: la evaluación de la contaminación atmosférica en Madrid*, Madrid, página 79.
- [4] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 54, 1<sup>a</sup> edición, México 2009.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). “*Technical Guidance on the Use of MOBILE6 for Emission Inventory Preparation.*” Enero de 2002.
- [6] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 62, 1<sup>a</sup> edición, México 2009.
- [7] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 64, 1<sup>a</sup> edición, México 2009.
- [8] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 65, 1<sup>a</sup> edición, México 2009.

[9] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 66, 1ª edición, México 2009.

[10]European Environment Agency. (2000) “COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport, Methodology and emission factors (Version 2.1).

[11] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 68, 1ª edición, México 2009.

[12] Guía metodológica para la estimación de gases vehiculares en ciudades mexicanas- página 70, 1ª edición, México 2009.

## **ANEXOS**

## ANEXO A. Descripciones del modelo MOBILE

**Cuadro A.1: INSUMOS PARA CADA MODELO DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES**

PARAMETROS INICIALES	MODELOS DE EMISION DE GASES			
	MOBILE	MOVES	IVE	COPERT
Año calendario	X	X		
Mes	X	X		
Temperatura ambiental	X	X	X	X
Altitud	X			
Humedad relativa	X	X	X	
Día(hábil o fin de semana)	X			
Características del combustible	X	X		X
Tipo de vehículo y año modelo	X			
Km recorridos/tipo de vía	X			X
Velocidad prom/hora-tipo de vía	X			X
Longitud promedio de los viajes	X			X
Tiempo de reposo del vehículo	X			
Programa de inspección y mantenimiento	X	X	X	X
Población vehicular por año modelo y para el año base		X		
Km recorridos/tipo de vía- año modelo y hora del día		X		
Número de arranques vehículo/tipo de vía-año modelo y hora del día		X		X
Tiempo de reposo vehículo/tipo de vía-año modelo y hora del día		X		
Crecimiento promedio de la flota vehicular del año base al año de análisis		X		
Desglose de actividad por categoría vehicular			X	X
Características de la gasolina y del diesel			X	
Uso del aire acondicionado			X	
Número de arranques/día-tipo vehículo			X	
Factores de emisión para cada tecnología			X	
Distribución de flota vehicular por tecnología			X	
Datos sobre el consumo del combustible				X

Fuente: Elaboración Propia.

**Cuadro A.2: CATEGORÍAS VEHICULARES MODELO MOBILE6**

<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>	<b>DESCRIPCION</b>
LDGV	Vehículos ligeros a gasolina (vehículos de pasajeros)
LDGT1	Camiones ligeros a gasolina 1 (PBV de 0 a 2,72 kg; PP de 0 a 1,701 kg)
LDGT2	Camiones ligeros a gasolina 2 (PBV de 0 a 2,72 kg; PP > 1,701 a 2, 608 kg)
LDGT3	Camiones ligeros a gasolina 3 (PBV de 0 a 2.72 kg; PPA de 0 a 2,608 kg)
LDGT4	Camiones ligeros a gasolina 4 (PBV > 2.72 a 3,856 kg; PPA de 2,609 kg y mayores)
HDGV2b	Vehículos pesados a gasolina clase 2b (PBV > 3,856 a 4,536 kg)
HDGV3	Vehículos pesados a gasolina clase 3 (PBV > 4,536 a 6,250 kg)
HDGV4	Vehículos pesados a gasolina clase 4 (PBV > 6,350 a 7,258 kg)
HDGV5	Vehículos pesados a gasolina clase 5 (PBV > 7,258 a 8,845 kg)
HDGV6	Vehículos pesados a gasolina clase 6 (PBV > 8.845 a 11,794 kg)
HDGV6	Vehículos pesados a gasolina clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 kg)
HDV8a	Vehículos pesados a gasolina clase 8a (PBV > 14,969 a 27, 21 6 kg)
HDV8B	Vehículos pesados a gasolina clase 8b (PBV > 27,216 kg)
LDDV	Vehículos ligeros diesel (autos de pasajeros)
LDDT12	Camiones ligeros a diesel 1 y 2 (PBV de 0 a 2,722 kg)
HDDV2b	Vehículos pesados a diesel clase 2b (PBV de 3,856 a 4,536 kg)
HDDV3	Vehículos pesados a diesel clase 3 (PBV > 4,536 a 6,350 kg)
HDDV4	Vehículos pesados a diesel clase 4 (PBV > 6,350 a 7,258 kg)
HDDV5	Vehículos pesados a diesel clase 5 (PBV > 7,258 a 8,845 kg)
HDDV6	Vehículos pesados a diesel clase 6 (PBV > 8,845 a 11,794 kg)
HDDV7	Vehículos pesados a diesel clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 kg)
HDDV8a	Vehículos pesados a diesel clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 kg)
HDDV8b	Vehículos pesados a diesel clase 8b (PBV > 27,216 kg)
MC	Motocicletas (a gasolina)
HDGB	Autobuses a gasolina (escolar y transporte urbano e interurbano)
HDDBT	Autobuses de transporte urbano e interurbano a diesel
HDDBs	Autobuses escolares a diesel
LDDT34	Camiones ligeros a diesel 3 y 4 (PBV > 2,722 a 3856 kg)

PBV-Peso Bruto Vehicular; PP- Peso de prueba; PPA- Peso de prueba alternativo.

Fuente: Fuente: Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares, México, 2007.

**Cuadro A.3: CONTAMINANTES CONSIDERADOS POR LOS MODELOS DE EMISIONES DE GASES**

CONTAMINANTES	MODELOS DE EMISION DE GASES			
	MOBILE	MOVES	IVE	COPERT
HC	X	X		
CO	X		X	X
Nox	X	X	X	X
CO2	X	X	X	X
PM	X	X	X	X
Pb	X			X
SO2	X	X		
NH3	X	X	X	
BENZ	X		X	
MTBE	X			
BUTA	X		X	
FORM	X			
ACET	X			
ACRO	X			
CH4		X	X	X
N2O		X	X	X
COV			X	X
ALD			X	
HAP				X
COP				X

Fuente: Elaboración Propia.

**Cuadro 3.4 PARÁMETROS DE SALIDA DEL MODELO MOBILE6**

CONTAMINANTES			NOMENCLATURA VEHICULAR			
			LDGV	HDGV	MC	All Veh
CONTAMINANTES	<b>HC</b>	<b>1996</b>	2.481	1.12	0.427	2.764
	<b>Exhaust</b>	<b>1996</b>	1.396	2.601	6.005	1.656
	<b>Evap</b>	<b>1996</b>	0.075	1.618	2.172	2.475
	<b>Running</b>	<b>1996</b>	18.898	1.746	24.777	22.673
	<b>Resting</b>	<b>1996</b>	2.107	0.436	0.773	2.845
	<b>CO</b>	<b>1996</b>	0.46	3.522	1.551	2.006
	<b>Nox</b>	<b>1996</b>	1.475	0.079	0.39	1.607

Fuente: Elaboración Propia.

## ANEXO B. Descripción para el modelo MOVES

**Cuadro B.1: CATEGORÍAS VEHICULARES DEL MODELO MOVES**

Categorías	Descripción
Vehículos de pasajeros	Automoviles para uso de transporte particular
Camiones de pasajeros ligeros	Minivan, pickups, SUVs y otros vehículos de 2 ejes y 4 llantas utilizados principalmente para transporte personal
Camiones comerciales ligeros	Miniva, pickups, SUVs y otros vehículos de 2 ejes y 4 llantas utilizados principalmente para actividades comerciales. Se considera que estos camiones difieren de los camiones de pasajeros en términos de kilometraje anual recorrido, así como en sus patrones de operación por hora del día.
Camiones recolectores de basura	Camiones de recolección de basura o reciclaje. Se asume que difieren de otros tipos de camión en términos de su calendario de operación, distribución por tipo de vía y operación por hora del día.
Camión de trayecto corto	Camiones con menos de 200 millas en su trayecto
Camión de trayecto largo	Camiones con trayectos de más de 200 millas en su trayecto
Motorhome	Vehículo de motor construido sobre un chasis de camion o de autobús y diseñado para servir como una vivienda autónoma para viajes de recreo
Autobuses de ciudad a ciudad	Autobuses utilizados para el comercio de una ciudad a otra
Autobuses urbanos	Autobuses utilizados dentro de un área urbana
Autobuses escolares	Autobuses de transporte escolar
Camiones con combinación de trayectos cortos	Una combinación de camiones con la mayor parte de su operación con recorridos menores a 200 millas
Camiones con combinación de trayectos largos	Una combinación de camiones con la mayor parte de su operación con recorridos mayores a 200 millas
Motocicletas	....

Fuente: Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares, México, 2007.

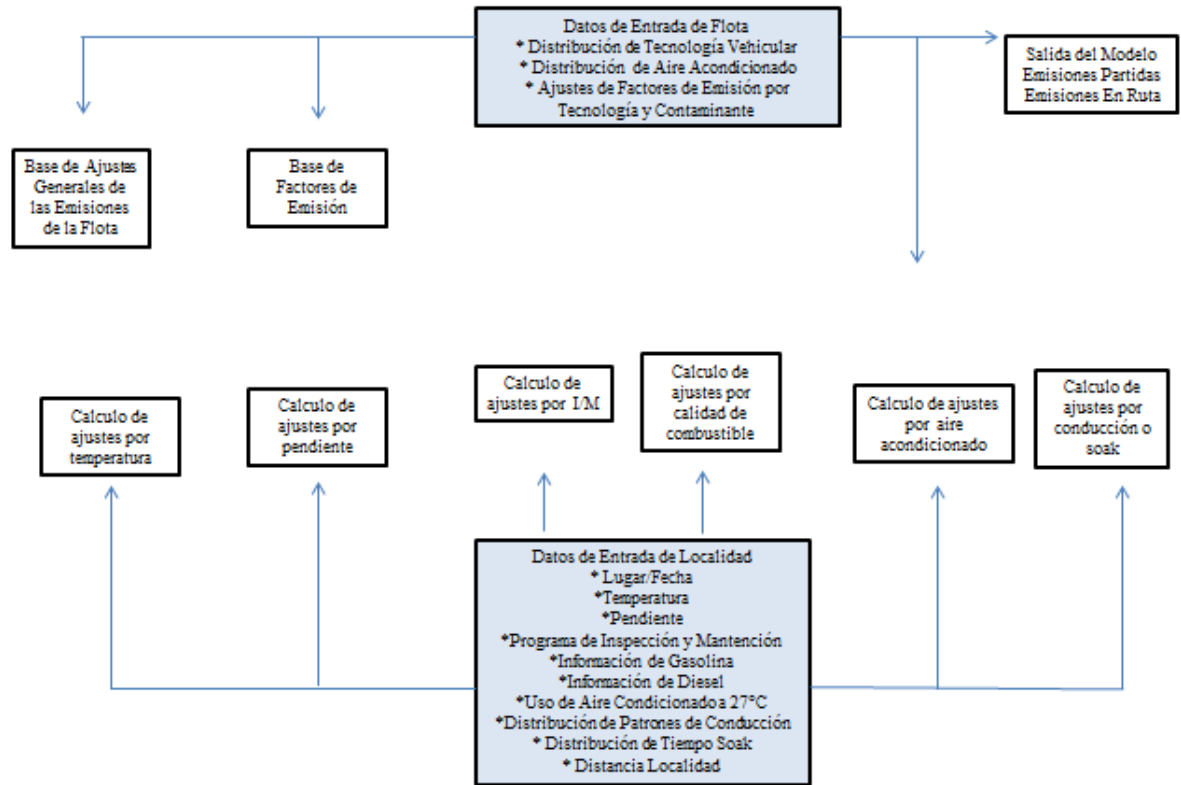
**Cuadro B.2: SUBCATEGORIAS VEHICULARES CONSIDERADAS POR MOVES**

Tipo de Combustible	Tecnología del motor	Peso del vehículo cargado (libras)	Tamaño del motor (litros)	Clase regulatoria	Grupo de año modelo
Gasolina	Combustión interna	< 500 (motocicletas)	< 2.0 2.1 - 2.5	Motocicleta LDV	1972 y ant. 1973
Diesel	Convencional	500 - 700 (motocicletas)	2.6 - 3.0 3.1 - 3.5	LDT HDG	1974 1975
Gas natural	Combustión interna	> 700	3.5 - 4.0	PBV<= 14000 lbs	
Comprimido		<=2000	4.1 - 4.5	HDG	1999
GNC	avanzada	2001 - 2500	4.5 - 5.0	PBV > 14000 lbs	2000
		2501 - 3000	> 5.0	LHDD	2001- 2010
Gas licuado de petróleo - GLP	Híbrido con combustión interna	3001 - 3500		MHDD HHDD Autobuses urbanos	2021 y post.
		3501 - 4000			
		4001 - 4500			
Etanol	Avanzada	4501- 5000			
Metanol	Celda de combustible	26,001 - 33,000			
		33,001 - 40,000			
Hidrógeno gaseoso	Eléctrico	50,001 - 60,000			
		60,001 - 80,000			
Hidrógeno líquido		80,000 - 100,000			
		100,001 - 130,000			
Electricidad		>= 130,001			

Fuente: Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares, México, 2007.

## ANEXO C. Descripción para el modelo IVE

Cuadro C.1: ARQUITECTURA DEL MODELO IVE



Fuente: Elaboración Propia.

**Cuadro C.2: CRITERIOS PARA DEFINIR LAS CATEGORÍAS VEHICULARES IVE**

Tipo de combustible	Alimentación del combustible	Uso del vehículo	Tecnología de control de emisiones	Sistema de recuperación de vapores
Gasolina	Carburador	Menos de 79.000 Km	Convertidor catalítico de dos vías	Sin control
Diesel				Válvula de ventilación positiva
Gas Natural Comprimido-GNC	Inyección electrónica central o monopunto	Entre 80.000 y 161.000 Km	Convertidor catalítico de tres vías	Válvula de ventilación positiva y control en el tanque de combustible
Gas Licuado de Petróleo-GLP	Inyección electrónica múltiple		Vehículos de baja emisión	
Etanol		Más de 161.000 Km	EURO I, II, III, IV y V	Control de emisiones evaporativas

Fuente: Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares, México, 2007.

**Cuadro C.3: Parámetros de salida del modelo IVE y COPERT**

CATEGORIA VEHICULAR	TIPO DE CONTAMINANTE			
	CO		CO	
	Group 1 -Reposo	Group 2- Reposo	Group 1- Mvto	Group 2- Mvto
Auto/Gasolina/ligero	0.004250815	0.002609217	0.001791611	0.001067519
Camión/Diesel/Mediano	0.116433355	0.071468724	0.005233926	0.141755492
Camión/Gasolina/Pesado	0.126758431	0.077821295	0.002005584	0.069108567

Fuente: Elaboración Propia.

## ANEXO D. Descripción del modelo COPERT

**Cuadro D.1: ELEMENTOS CONSIDERADOS PARA DEFINIR LAS SUBCATEGORIAS COPERT**

TIPO DE COMBUSTIBLE	PESO DEL VEHICULO (TON)	TAMAÑO DEL MOTOR (LITROS)	TECNOLOGÍA DEL MOTOR
Gasolina	< 3.5	< 1.4	PRE ECE
	> 3.5	1.4 - 2.0	ECE 15/00-01
Diesel	> 7.5	> 2.0	ECE 15/02
	7.5 - 16		
Gas licuado de petróleo	16 - 32		EURO III
	> 32		EURO IV
			EURO V

Fuente: Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares, México, 2007.

## ANEXO E. Comparación entre los modelos MOBILE, MOVES, IVE Y COPERT

**Cuadro E.1: Diferencias en la caracterización vehicular de cada modelo de emisión de gases**

	<i>MOBILE</i>	<i>MOVES</i>	<i>IVE</i>	<i>COPERT</i>
<b>CLASIFICACIÓN VEHICULAR</b>	LDGV	Vehículos de pasajeros	Automóvil/Camión ligero a gasolina; ligero	Vehículos de pasajeros
	LDGT1	Camiones de pasajeros ligeros		Vehículos ligeros
	HDGV	Camiones comerciales ligeros	Automóvil/Camión ligero a gasolina; mediano	Vehículos pesados
	LDDV	Camiones recolectores de basura		Autobuses urbanos
	HDDV	Camión de trayecto corto	Automóvil/Camión ligero a gasolina; pesado	Motonetas
	MC	Autobuses urbanos		Motocicletas
	HDGB	Autobuses escolares		
	LDDT	Motocicletas		

Fuente: Elaboración Propia.

**Cuadro E.2: Diferencias entre los diversos modelos de emisiones de gases**

		MODELOS DE ESTIMACIÓN DE GASES			
		MOBILE6	MOVES4	IVE	COPERT
<b>TIPOS DE COMBUSTIBLE</b>	<b>Gasolina</b>	X	X	X	X
	<b>Diesel</b>	X	X	X	X
	<b>GNC</b>	X	X	X	
	<b>GP</b>		X	X	X
	<b>Etanol</b>		X	X	
	<b>Metanol</b>		X		
	<b>H2 gaseoso</b>		X		
	<b>H2 líquido</b>		X		
	<b>Electricidad</b>		X		
<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	<b>Factores de emisión</b>	X			
	<b>Inventario de emisiones</b>		X	X	X
<b>CONTAMINANTES</b>	<b>Regulados</b>	X		X	X
	<b>Tóxicos</b>	X		X	X
	<b>Efecto Invernadero</b>	X	X	X	X
<b>TIPOS DE FUENTES</b>	<b>En circulación</b>	X	X	X	X
	<b>Fuera de camino</b>		X		X

Fuente: Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares, México, 2007.

## ANEXO F. Paralelo entre modelos de asignación de tráfico

CARACTERISTICAS	ESTRAUS	TRANSCAD	GETRAM
<b>Descripción general</b>	<p>Modelo de simulación entre oferta y demanda en el mercado de transporte urbano.</p> <p>Permite valorar los efectos de aplicación de planes y políticas de transporte</p> <p>Permite modelar múltiples niveles socioeconómicos de los usuarios del sistema.</p>	<p>Modelo de planeación de transporte que representa la integración entre un Sistema de Información Geográfica (SIG) y procedimientos de transporte</p> <p>Permite la simulación de la selección del modo de transporte, estimación de viajes, análisis de políticas como peajes.</p> <p>Integra un SIG con funciones de modelística y de logística.</p>	<p>Es un modelo de microsimulación especialmente diseñado para realizar análisis de impacto vial de modificaciones físicas y operacionales en una red de tránsito establecida.</p> <p>Permite representar en detalle cada una de las características geométricas y operativas del sistema analizado, simulando el comportamiento real del tránsito.</p> <p>Integración y complementación con ESTRAUS</p>
<b>Metodología</b>	<p>Método de diagonalización.</p> <p>Modelos de ejecución discreta.</p>	<p>Modelos de asignación de tráfico como todo o nada, asignación incremental, con restricciones de capacidad, y bajo los principios de Wardrop</p>	<p>Principios básicos de teoría de equilibrio de redes.</p> <p>Modelamientos de secciones específicas</p>
<b>Descomposición de las etapas de planeación</b>	<p>La etapa de generación de viajes es exógena al modelo.</p> <p>El modelo considera una formulación de equilibrio simultánea para la distribución de viajes.</p>	<p>Soporta diferentes estilos de modelación de la demanda, entre ellos el modelo de cuatro etapas, técnicas desagregadas, modelos simultáneos para múltiples elecciones, entre otros.</p> <p>Incluye herramientas para cada una de las cuatro etapas.</p>	<p>Realiza el modelamiento en 4 etapas cada una de ellas detallada y herramientas específicas.</p> <p>Las nuevas versiones permiten realizar modelos sin necesidad de realizar la conexión entre los cuatro pasos.</p>
<b>Relación con los modelos de emisiones de gases</b>	<p>Los parámetros útiles para relacionarlos son los tiempos de desplazamiento por modo de transporte y flujo de vehículos en los segmentos de la red vial.</p>	<p>Apartir de la mejor alternativa de red vial definida por TransCAD, los parámetros que pueden relacionarse para los modelos de emisiones de gases son la cantidad de vehículos y la clasificación por tipología de estos.</p>	<p>Los parámetros útiles para relacionarlos son el tiempo medio de paradas [s/Km], número medio de vehículos por kilómetro, velocidad media de recorrido [Km/h] y el número medio de paradas por vehículo.</p>