



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**ANALISIS DE EMISIONES EN RUTA DE VEHICULOS DIESEL EN CIUDAD DE  
MEXICO, SANTIAGO Y SAO PAULO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MENCION MECANICA**

**SEBASTIAN ANDRES TOLVETT CARO**

**PROFESOR GUIA:  
MAURICIO OSSES ALVARADO**

**MIEMBROS DE LA COMISION:  
LAURA GALLARDO KLENNER  
ROBERTO CORVALAN PAIVA  
MARCELO MENA CARRASCO**

**SANTIAGO DE CHILE  
ENERO - 2009**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
TITULO DE MAGISTER EN CS. DE LA  
INGENIERIA MENCION MECANICA  
POR: SEBASTIAN ANDRES TOLVETT CARO  
FECHA: 21 DE ENERO 2009  
PROF. GUIA: SR. MAURICIO OSSES ALVARADO**

**ANALISIS DE EMISIONES EN RUTA DE VEHICULOS DIESEL EN CIUDAD DE  
MEXICO, SANTIAGO Y SAO PAULO**

La mayoría de los inventarios de emisiones de fuentes móviles en Latinoamérica provienen de modelos internacionales de estimación de emisiones, en su mayoría estadounidenses o europeos. Modelos como COPERT, Mobile o IVE en sus distintas versiones se han utilizado completa o parcialmente en orden de establecer los inventarios que sirven como herramienta a los tomadores de decisión locales. Sin embargo, dentro de la ecuación básica que usan estos modelos para calcular las emisiones existe un dato que no necesariamente es válido para la realidad en Latinoamérica: los factores de emisión.

El objetivo principal de este trabajo de Tesis es medir y analizar las emisiones de vehículos diesel en Latinoamérica, utilizando sistemas de medición a bordo y la metodología de Potencia Específica Vehicular para el análisis.

En general los factores de emisión internacionales no necesariamente reflejan las condiciones de conducción, de mantención, características de los combustibles o características geográficas de las distintas ciudades de la región. Considerando lo anterior, se realizaron 4 campañas de emisión, midiendo un total de 143 vehículos diesel en Latinoamérica, con el apoyo de The William and Flora Hewlett Foundation en el caso de Ciudad de México y Sao Paulo, y con el apoyo del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile (DIMEC) y la Secretaría Interministerial de Planificación de Transporte (SECTRA) en el caso de Santiago.

Las mediciones se realizaron utilizando equipos de medición de carácter portátil. Para los gases se utilizó una unidad Semtech-D de Sensors-Inc y para la medición de material particulado se utilizó una unidad DMM240 de Dekati. La unidad Semtech-D tiene la capacidad de medir monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (THC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La unidad DMM240 mide material particulado menor a 1.5 micrones. Ambos equipos tienen una frecuencia de muestreo de 1 hertz.

Una vez recogidos los datos segundo a segundo de los equipos, se utilizó la metodología de Potencia Específica Vehicular. La cual permite normalizar los resultados obtenidos en diferentes localidades y bajo diferentes ciclos de conducción de manera de obtener resultados comparables. De esta manera se logró analizar los resultados de emisiones respecto de la energía utilizada por el vehículo para un instante dado, la cual es estimada a partir de variables medidas con un GPS.

La principal conclusión de este trabajo corresponde a la utilización de la metodología de Potencia Específica Vehicular que permite comparar resultados medidos bajo diferentes condiciones de operación. De los resultados obtenidos se concluye que las emisiones normalizadas por ciclo de conducción presentan diferencias respecto de los modelos de emisiones internacionales. Esta realidad corrobora la necesidad de realizar campañas de emisión locales.

*Dedicado a abuelita Cora*

*Índice*

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Factores de emisión en Latinoamérica .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>2</b>
1.2.1	Objetivo principal .....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
<b>2</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelos de emisión internacionales.....</b>	<b>3</b>
2.1.1	COPERT (Europa) .....	3
2.1.2	Mobile 6 (USA).....	6
2.1.3	MODELO MOVES (USA) .....	9
2.1.4	IVE (USA).....	13
2.1.5	Comparación entre modelos internacionales.....	16
<b>2.2</b>	<b>Potencia Especifica Vehicular.....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Teoría de la Potencia Especifica Vehicular .....	20
2.2.2	Metodología IVE de Potencia Especifica Vehicular .....	21
<b>3</b>	<b>Metodología General .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Mediciones en ruta (Planificación).....</b>	<b>25</b>
3.1.1	Equipos portátiles de medición .....	26
3.1.2	Circuitos recorridos por los vehículos .....	27
3.1.3	Flotas medidas por ciudad .....	28
<b>3.2</b>	<b>Mediciones en ruta (Campaña Experimental) .....</b>	<b>28</b>
3.2.1	Instalación de equipos.....	28
3.2.2	Medición de emisiones con equipos portátiles.....	29
3.2.3	Procesamiento y análisis de datos obtenidos.....	30
<b>4</b>	<b>Resultados de emisiones.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Emisiones por VSP .....</b>	<b>32</b>
4.1.1	Análisis de VSP versus velocidad y aceleración como variables predictivas.....	32
4.1.2	Análisis de VSP por campaña .....	35
<b>4.2</b>	<b>Resultados de emisiones en gramos kilómetro por campaña .....</b>	<b>40</b>
4.2.1	Distribución de emisiones en gramos por kilómetro por campaña (NO <sub>x</sub> vs. MP) .....	40
4.2.2	Distribución de emisiones en gramos por kilómetro por campaña (NO <sub>x</sub> vs. CO <sub>2</sub> ) .....	42
4.2.3	Resultados promedio por campaña .....	44
<b>5</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusiones y Discusión .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Comparación resultados en Latinoamérica con otras ciudades del mundo.....</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Sugerencias para realizar una campaña de emisiones.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>56</b>

*Anexos*

*Anexo A - Resultados de emisiones por vehículo medido*

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Modelos Comparados	16
Figura 2.2 Comparación de emisiones entre los modelos IVE 2.0 y COPERT IV	19
Figura 2.3 Ecuación de VSP según Jiménez	21
Figura 2.4 Distribución de consumos energéticos Ciclo FTP Fase I	22
Figura 2.5 Distribución energética Ciclo Europeo ECE2	22
Figura 2.6 Emisiones en bins de VSP para CO <sub>2</sub>	24
Figura 2.7 Programa de procesamiento de VSP	24
Figura 3.1 Sistema de canalización de gases	29
Figura 3.2 Equipos analizadores	29
Figura 3.3 Medición de emisiones Sao Paulo (izq.) y Santiago (der.)	30
Figura 3.4 Alineación de datos segundo a segundo	31
Figura 4.1 Emisiones de NO <sub>x</sub> versus Velocidad	33
Figura 4.2 Emisiones de NO <sub>x</sub> versus Aceleración	34
Figura 4.3 Emisiones de NO <sub>x</sub> versus VSP	34
Figura 4.4 Relación de emisiones de CO <sub>2</sub> versus Velocidad y VSP	35
Figura 4.5 Porcentaje de conducción según VSP – Stress por campaña	36
Figura 4.6 Emisiones de CO según VSP – Stress por campaña	37
Figura 4.7 Emisiones de CO <sub>2</sub> según VSP – Stress por campaña	37
Figura 4.8 Emisiones de NO <sub>x</sub> según VSP – Stress por campaña	38
Figura 4.9 Emisiones de HC según VSP – Stress por campaña	38
Figura 4.10 Emisiones de MP según VSP – Stress por campaña	39
Figura 4.11 Distribución de emisiones de NO <sub>x</sub> vs. MP para cada campaña	41
Figura 4.12 Distribución de emisiones de NO <sub>x</sub> vs. MP para todos los vehículos	42
Figura 4.13 Distribución de emisiones de NO <sub>x</sub> vs. CO <sub>2</sub> para cada campaña	43
Figura 4.14 Distribución de emisiones de NO <sub>x</sub> vs. CO <sub>2</sub> para todos los vehículos	44
Figura 4.15 Emisiones promedio de CO por campaña	45
Figura 4.16 Emisiones promedio de CO <sub>2</sub> por campaña	46
Figura 4.17 Emisiones promedio de NO <sub>x</sub> por campaña	46
Figura 4.18 Emisiones promedio de HC por campaña	46
Figura 4.19 Emisiones promedio de MP por campaña	47
Figura 5.1 Comparación de emisiones en Ruta con modelos IVE 2.0 (USA) y COPERT IV (Europa)	49
Figura 5.2 Emisiones de NO <sub>x</sub> según VSP – Stress por campaña	51
Figura 5.3 Comparación de emisiones de campañas IVE a nivel mundial	52
Figura 5.4 Comparación de emisiones de campañas IVE a nivel mundial (normalizadas por CO <sub>2</sub> )	53

## Índice de Tablas

Tabla 2.1 Categorías vehiculares COPERT.....	4
Tabla 2.2 Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT .....	5
Tabla 2.3 Contaminantes considerados en COPERT.....	5
Tabla 2.4 Categoría vehiculares en MOBILE6. ....	7
Tabla 2.5 Contaminantes considerados en el modelo MOBILE6.....	8
Tabla 2.6 Categorías vehiculares en MOVES.....	10
Tabla 2.7 Elementos considerados en la definición de subcategorías de fuente o bins en la caracterización de la flota vehicular en MOVES.....	11
Tabla 2.8 Contaminantes considerados en las diferentes versiones de MOVES.....	12
Tabla 2.9 Criterios para definir las categorías vehiculares en IVE.....	14
Tabla 2.10 Ejemplo de algunas categorías vehiculares en IVE.....	14
Tabla 2.11 Contaminantes considerados en IVE.....	15
Tabla 2.12 Correlaciones de Categorías y Composición.....	18
Tabla 2.13 Resultado de emisiones de MP y NOx .....	19
Tabla 2.14 Potencia Específica Vehicular agrupada en 20 niveles de operación .....	23
Tabla 2.15 Límites considerados para el estrés del motor.....	23
Tabla 3.1 Equipos portátiles para medición de gases y partículas .....	27
Tabla 4.1 Nomenclatura de las categorías por campaña.....	40
Tabla 4.2 Resultados promedio por campaña.....	45
Tabla 5.1 Comparación de emisiones en Ruta con modelos IVE 2.0 (USA ) y COPERT IV (Europa) en porcentaje respecto a las emisiones en ruta.....	50

# 1 Introducción

## 1.1 Factores de emisión en Latinoamérica

La mayoría de los inventarios de emisiones de fuentes móviles en Latinoamérica provienen de modelos internacionales de estimación de emisiones, en su mayoría estadounidenses o europeos. Modelos como COPERT, Mobile o IVE en sus distintas versiones se han utilizado completa o parcialmente en orden de establecer los inventarios que sirven como herramienta a los tomadores de decisión locales. Sin embargo, dentro de la ecuación básica que usan estos modelos para calcular las emisiones existe un dato que no necesariamente es válido para la realidad en Latinoamérica: los factores de emisión.

Los factores de emisión utilizados en la región, presentes en los modelos antes mencionados, corresponden a datos obtenidos en Estados Unidos o Europa. Es decir, dichos factores de emisión no necesariamente reflejan las condiciones de conducción, de mantenimiento, características de los combustibles o características geográficas de las distintas ciudades de la región.

Se puede decir que en el caso de vehículos a gasolina existe alguna experiencia en la medición de emisiones. En Santiago de Chile, el modelo de emisiones MODEM basado en COPERT III utiliza factores de emisión medidos localmente para vehículos a gasolina. Sin embargo, en el caso de vehículos diesel la información es escasa o no existe.

Considerando lo anterior, ISSRC realizó 4 campañas de emisión, midiendo un total de 143 vehículos diesel en Latinoamérica, con el apoyo de The William and Flora Hewlett Foundation en el caso de Ciudad de México y Sao Paulo, y con el apoyo del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile (DIMEC) y la Secretaría Interministerial de Planificación de Transporte (SECTRA) en el caso de Santiago. Estas campañas están enmarcadas en un proyecto a nivel mundial llevado a cabo por ISSRC donde además de medir en Latinoamérica se realizaron campañas en Beijing y Xi'an, China y en Estambul, Turquía.

Las 4 campañas en Latinoamérica se definieron como 1) Santiago Livianos, 2) México D.F. Pesados, 3) Santiago Pesados y 4) Sao Paulo Pesados. Todas ellas fueron enfocadas a medir emisiones de vehículos diesel. Las campañas se describen en el Capítulo 3.

Las mediciones se realizaron utilizando equipos de medición de carácter portátil, para los gases se utilizó una unidad Semtech-D de Sensors-Inc y para la medición de material particulado se utilizó una unidad DMM240 de Dekati. La unidad Semtech-D tiene la capacidad de medir monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (THC), óxidos de nitrógeno (NOX) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La unidad DMM240 mide material particulado menor a 1.5 micrones. Ambas unidades tienen una frecuencia de muestreo de 1 hertz.

Una vez equipados con las unidades de medición de emisiones, los vehículos se operaron de manera de obtener un amplio rango de condiciones de conducción en un circuito urbano. El recorrido tuvo una duración de entre 30 a 50 minutos dependiendo de la ciudad y las condiciones del tráfico. Para simular condiciones de operación normal, los vehículos fueron cargados al 50% de su capacidad con sacos de arena.

Una vez recogidos los datos segundo a segundo de los equipos, se utilizó la metodología de Potencia Especifica Vehicular (VSP por sus siglas en Ingles). La metodología VSP permite normalizar los resultados obtenidos en diferentes localidades y bajo diferentes ciclos de conducción de manera de obtener resultados comparables. Utilizando la VSP se logró analizar los resultados de emisiones respecto de la energía utilizada por el vehiculo para un instante dado, la cual es estimada a partir de variables medidas con un GPS.

De los resultados obtenidos se concluye que las emisiones normalizadas por ciclo de conducción presentan diferencias respecto de los modelos de emisiones internacionales. Esta realidad corrobora la necesidad de realizar campañas de emisión locales.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo principal**

El objetivo principal de este trabajo de Tesis corresponde a medir y analizar las emisiones de vehículos diesel en Latinoamérica, utilizando equipos de medición a bordo y la metodología de análisis de Potencia Específica Vehicular.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos son:

- Medir emisiones de vehículos diesel en México D.F., Santiago y Sao Paulo.
- Analizar las emisiones utilizando la metodología de Potencia Específica Vehicular.
- Obtener resultados de emisiones en gramos por kilómetro.
- Comparar los resultados con modelos existentes utilizados en la región.



## **2 Antecedentes**

En el presente capítulo se describen los dos puntos que conforman los antecedentes de este trabajo de tesis: 2.1) Modelos de emisión internacionales y 2.2) Potencia Específica Vehicular.

En el primer punto se describen las características más relevantes de los modelos de emisiones vehiculares utilizados en la actualidad. Los modelos COPERT, Mobile 6, MOVES e IVE. Al final de este punto se presenta una comparación de las emisiones en gramos kilómetro de los modelos utilizando las categorías de vehículos diesel medidas en este estudio.

Potencia específica vehicular es la metodología utilizada para obtener resultados comparables entre cada una de las ciudades, independiente de los ciclos de conducción. La metodología aquí descrita corresponde a la aproximación utilizada por el modelo IVE.

A continuación se presentan los detalles de cada uno de estos puntos.

### **2.1 Modelos de emisión internacionales**

La necesidad de estimar las emisiones vehiculares a nivel mundial ha provocado que los países desarrollados generen modelos de emisiones. En Estados Unidos distintas entidades como la Environmental Protection Agency (EPA), California Air Resource Board (CARB), Center for Environmental Research & Technology (CE-CERT), International Sustainable System Research Center (ISSRC), etc. han desarrollado modelos de emisiones entre los cuales están Mobile [1], Moves [2], IVE [3], etc. En Europa, la European Environmental Agency (EEA) ha desarrollado los modelos COPERT [4], la agencia alemana Umwelt Bundes Amt (UBA) el modelo Handbook [5], etc. Finalmente, existen los modelos desarrollados en Latinoamérica, que utilizan como base los modelos antes mencionados. Un ejemplo de esto es el modelo de emisiones MODEM [6], desarrollado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, el cual utiliza como base los factores de emisión recomendados por COPERT III.

En este apartado se describen los modelos más utilizados en Latinoamérica.

#### **2.1.1 COPERT (Europa)**

El sistema de modelación de emisiones vehiculares llamado COmputer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT), es un programa elaborado en Visual Studio.NET 2003 de Microsoft y funciona en cualquier PC con Windows. Fue desarrollado como la herramienta europea para calcular las emisiones provenientes de los vehículos automotores en circulación.

El desarrollo de COPERT fue financiado por la Agencia Europea del Medioambiente (EEA, por sus siglas en inglés), en el marco de las actividades del centro europeo de asuntos del aire y cambio climático. Actualmente está en uso, a nivel nacional, en: Bosnia, Bélgica, Croacia, Chipre, Dinamarca, Eslovenia, España, Estonia, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo y Moldavia. Sin embargo, muchos otros países de la Unión Europea han preferido utilizar sus propios modelos que son más complejos y precisos que este modelo genérico.

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 en una resolución más alta, es decir para la compilación de inventarios de emisiones urbanos con una resolución espacial de 1x1 km<sup>2</sup> y una resolución temporal de 1 hora. Una consideración importante a destacar es el hecho de que COPERT fue diseñado específicamente para vehículos fabricados de acuerdo con la legislación europea.

### Categorías vehiculares

COPERT estima las emisiones generadas por vehículos a gasolina (con y sin plomo), diesel y gas licuado de petróleo para 6 categorías básicas de vehículos a saber: vehículos de pasajeros, vehículos livianos, vehículos pesados, autobuses, motonetas y motocicletas (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1 Categorías vehiculares COPERT**

Categorías	Descripción
Vehículos de pasajeros	Vehículos para el transporte de pasajeros que no poseen más de 8 asientos en adición al del conductor
Vehículos livianos	Vehículos para el transporte de bienes y con un peso no mayor a 3.5 toneladas
Vehículos pesados	Vehículos para el transporte de bienes y con un peso mayor a 3.5 toneladas
Autobuses urbanos	Vehículos para el transporte de pasajeros, con más de 8 asientos en adición al del conductor
Motonetas y motocicletas	Vehículos de 2 o 3 ruedas con motor de menos de 50 cc y diseñado para no exceder una velocidad de 40 km/h
Motocicletas	Vehículos de 2 o 3 ruedas con motor de más de 50 cc y diseñado para correr a una velocidad superior a 40 km/h

Con el objeto de hacer una estimación de emisiones vehiculares más precisa, a partir de las categorías indicadas en la Tabla 2.1, COPERT puede construir subcategorías vehiculares con base en criterios tales como: tipo de combustible, peso del vehículo, tamaño del motor, tecnología del motor, etc. La Tabla 2.2 muestra algunas de las consideraciones específicas, dentro de cada criterio, que se emplean en la construcción de las subcategorías en COPERT.

**Tabla 2.2 Elementos considerados en la definición de subcategorías en COPERT**

Tipo de combustible	Peso del vehículo (toneladas)	Tamaño del motor (litros)	Tecnología del motor
Gasolina	< 3.5	<1.4	PRE ECE*
Diesel	> 3.5	1.4 – 2.0	ECE 15/00-01
Gas Licuado de	> 7.5	> 2.0	ECE 15/02
Petróleo	7.5 – 16		EURO III
	16 -32		EURO IV
	> 32		EURO V

\*Comité Económico para Regulaciones Europeas 15 (ECE, por sus siglas en inglés)

Con este esquema de agregación de la flota vehicular, una subcategoría podría quedar conformada por todos los vehículos ligeros a gasolina, con motor de menos de 1.4 litros que cumple con la legislación establecida para los vehículos con tecnología EURO IV. El número de subcategorías preestablecidas en COPERT III es de 48, sin embargo, esta cifra puede variar de acuerdo a las necesidades del usuario

### Tipos de fuentes modeladas

COPERT está diseñado para estimar las emisiones provenientes tanto de vehículos en circulación como de vehículos fuera de camino (e.g., equipos con motores de combustión interna empleados en agricultura, selvicultura, residencial, industria, barcos y ferrocarriles).

### Tipos de contaminantes

La Tabla 2.3 muestra la lista completa de especies químicas para las cuales COPERT es capaz de estimar el inventario de emisiones de fuentes vehiculares.

**Tabla 2.3 Contaminantes considerados en COPERT**

Contaminante	Descripción
COV	Compuesto Orgánicos Volátiles
CO	Monóxido de carbono
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
PM	Partículas
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se y Zn	Metales pesados: plomo, cadmio, cromo, cobre, níquel, selenio y zinc, respectivamente.

Una característica destacable de este modelo es su capacidad para proporcionar información desagregada por especie sobre las emisiones de hidrocarburos (e.g., propano, butano, isobutano, etileno, etc.).

## Insumos generales

Para estimar el inventario de emisiones para la región de interés, COPERT demanda que le sean suministrados los insumos que se muestran a continuación.

- Temperatura máxima y mínima mensual
- Características del combustible (e.g. presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, contenido de plomo, relación hidrógeno-carbón, etc.)
- Datos sobre consumo de combustible
- Descripción del programa de inspección y mantenimiento
- Distribución de la flota vehicular por clase
- Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo y de vía
- Distribución de velocidad promedio por tipo de vehículo y de vía
- Distribución del número de arranques por tipo de vehículo
- Distribución de la longitud promedio de los viajes

### 2.1.2 Mobile 6 (USA)

El modelo MOBILE6 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 diesel, así como para ciertos vehículos especializados, tal como vehículos a gas natural. El programa proporciona una herramienta analítica flexible que puede aplicarse a una variedad amplia de condiciones geográficas y características de la flota vehicular. En este sentido, es importante mencionar que el modelo denominado MOBILE6-MEXICO fue adaptado y modificado a las características tecnológicas de la flota vehicular del país.

Algunas de las aplicaciones primarias del modelo MOBILE6 han estado vinculadas al desarrollo de los inventarios estatales de emisión de fuentes móviles en Estados Unidos y en varios países del mundo donde predominan los vehículos con tecnología Norteamericana, como es el caso de México.

Los factores de emisión calculados por MOBILE6 son promedios ponderados para cada contaminante en gramos por milla (g/milla) para cada tipo de vehículo considerado en la flota en cuestión. La estimación del inventario total se obtiene multiplicando esa cifra por una estimación de las millas totales recorridas (VMT) por todos los vehículos, de cada tipo o categoría, en la zona durante el periodo de tiempo cubierto por el inventario.

### Categorías vehiculares

MOBILE6 calcula factores de emisión para 28 diferentes categorías vehiculares, las cuales son conformadas con base en criterios tales como uso del vehículo, tipo de combustible empleado, peso bruto vehicular y tecnología del motor (Tabla 2.4).

Adicionalmente, para cada categoría vehicular MOBILE6 es capaz de estimar factores de emisión para 25 años modelo, dentro de los años calendario 1952 a 2050. Esto es,

por ejemplo, si el año base del inventario de emisiones es 2007, para cada categoría vehicular se puede estimar el factor de emisión para los autos 2007 y los 24 años modelo anteriores (EPA, 2003).

Es importante destacar que MOBILE6 no incluye dentro de sus categorías vehiculares, vehículos fabricados de acuerdo con normas de otros países como Japón o la Comunidad Europea, sino sólo vehículos construidos bajo estándares estadounidenses (e.g., Tier0, Tier I, Tier II, etc.).

La familia de modelos MOBILE fueron diseñados para estimar factores de emisión que consideran tanto las emisiones provenientes del escape como las emisiones evaporativas exclusivamente para los vehículos que circulan en vías y carreteras. Los factores de emisión para vehículos que operan fuera de ruta, también llamadas fuentes móviles (e.g., aeronaves, locomotoras, equipo agrícola, equipo de construcción), normalmente son estimados con modelos como NONROAD.

**Tabla 2.4 Categoría vehiculares en MOBILE6.**

Tipo de vehículo	Descripción
LDGV	Vehículos livianos a gasolina (vehículos de pasajeros)
LDGT1	Camiones livianos a gasolina 1 (PBV* de 0 a 2,722 kg; PP** de 0 a 1,701 kg)
LDGT2	Camiones livianos a gasolina 2 (PBV de 0 a 2,722 kg; PP > 1,701 a 2,608 kg)
LDGT3	Camiones livianos a gasolina 3 (PBV > 2,722 a 3,856 kg; PPA*** de 0 a 2,608 kg)
LDGT4	Camiones livianos a gasolina 4 (PBV > 2,722 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 6,350 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)
HDGV7	Vehículos pesados a gasolina clase 7 (PBV > 11,794 a 14,969 kg)
HDV8a	Vehículos pesados a gasolina clase 8a (PBV > 14,969 a 27,216 kg)
HDV8B	Vehículos pesados a gasolina clase 8b (PBV > 27,216 kg)
LDDV	Vehículos livianos diesel (autos de pasajeros)
LDDT12	Camiones livianos 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 inter-urbano )
HDDBT	Autobuses de transporte urbano e inter-urbano a diesel
HDDBs	Autobuses escolares a diesel
LDDT34	Camiones livianos a diesel 3 y 4 (PBV > 2,722 a 3856 kg)

### Tipos de contaminantes

MOBILE6 estima los factores de emisión para los hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos del nitrógeno, dióxido de carbono, material particulado (el cual consiste de varios

componentes como el desgaste de llantas y frenos, además de lo emitido por el escape del motor) y tóxicos como el benceno, metil terbutil éter, butadieno, formaldehído, acetaldehído y acroleína.

La versión más reciente, MOBILE6.2, es la primera versión que tiene capacidad para estimar las emisiones de material particulado y de tóxicos de fuentes vehiculares. MOBILE6.2 contiene modificaciones de menor importancia, comparado contra MOBILE6, para las partes del modelo que estiman emisiones de hidrocarburos, óxidos del nitrógeno y monóxido de carbono. Los contaminantes para los cuales MOBILE6 es capaz de generar factores de emisión en unidades de gramos de contaminante emitido por milla recorrida se muestran en el Tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Contaminantes considerados en el modelo MOBILE6**

Contaminante	Descripción
HC	Hidrocarburos
CO	Monóxido de carbono
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
PM	Partículas
Pb	Plomo
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
BENZ	Benceno
MTBE	Metil Terbutil Eter
BUTA	1,3-Butadieno
FORM	Formaldehído
ACET	Acetaldehído
ACRO	Acroleína

### Insumos generales

Para estimar los factores de emisión para los contaminantes y tipos de vehículos señalados en las secciones anteriores, en un municipio o ciudad particular, MOBILE6 demanda que le sean suministrados una serie de datos que tienen incidencia directa en las emisiones generadas por la flota vehicular del sitio en cuestión. Para algunos de estos insumo, el modelo cuenta con valores predeterminados o por defecto; sin embargo, estos valores representan un “promedio nacional” (para Estados Unidos en el caso de la versión original y para México en el caso de MOBILE6-México), por lo que es necesario incorporar al modelo información estimada localmente a fin de que las condiciones del sitio para el que se quiere generar el inventario de emisiones queden reflejadas en los factores de emisión producidos por el modelo.

Una lista de algunos de los parámetros de entrada demandados por MOBILE6 son mostrados a continuación. Como mínimo, el usuario debe proveer datos para el año calendario, temperatura ambiental máxima y mínima, volatilidad del combustible y por supuesto sobre flota y actividad vehicular.

- Año calendario vehicular y año modelo
- Mes
- Temperatura ambiental horaria, o en su defecto máxima y mínima

- Altitud
- Humedad relativa
- Día (lunes a viernes o fin de semana)
- Características del combustible (e.g. presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, etc.)
- Distribución de la flota vehicular por clase
- Fracciones de ventas de diesel por clase
- Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vía
- Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía
- Distribución de la longitud de promedio de los viajes
- Número de arranques por día y tipo de vehículo, distribuido por hora
- Tiempo de reposo del vehículo
- Descripción del programa de inspección y mantenimiento

### **2.1.3 MODELO MOVES (USA)**

Para atender las nuevas necesidades de análisis, la oficina de transporte y calidad del aire (OTAQ), de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, está desarrollando un sistema de modelación de emisiones vehiculares llamado Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES), que consiste en una base de datos escrito en Java con MySQL (base de datos relacional de dominio público). Es de plataforma múltiple y puede correr en una computadora de escritorio moderna así como en paralelo en múltiples equipos. Este nuevo sistema permitirá estimar las emisiones, tanto de los vehículos que circulan en carretera como de los vehículos fuera de ruta, para un amplio rango de contaminantes, y permitirá múltiples escalas de análisis, las cuales van desde intersecciones hasta la estimación de un inventario nacional. Cuando esté totalmente terminado, MOVES servirá como reemplazo de los modelos MOBILE6 y NONROAD.

Este nuevo sistema no será necesariamente un solo modelo, sino que abarcará las herramientas, los algoritmos, los datos y los conocimientos necesarios para su uso en todos los análisis de emisiones de fuentes vehiculares asociados al desarrollo de regulaciones, normas, inventarios y proyecciones, tanto regionales como nacionales. Su propósito es facilitar el desarrollo de inventarios de emisiones de fuentes móviles y la evaluación de políticas con mayor resolución y menor incertidumbre que MOBILE6.

Una consideración importante a destacar es el hecho de que la versión actualmente disponible al público, MOVES2004, es un modelo que estima únicamente emisiones de gases de efecto invernadero y el análisis del ciclo de vida del combustible, cálculos que se basan en información generada exclusivamente para los Estados Unidos de Norteamérica, por lo que únicamente calcula emisiones para este país, ya sea a nivel de condados, estados o país.

#### **Categorías vehiculares**

Las emisiones provenientes de vehículos automotores están directamente relacionadas con la actividad y la caracterización vehicular. En MOVES el principal criterio de caracterización es el uso del vehículo y sobre esta base, la flota vehicular en circulación, se clasifica en 13 categorías (Tabla 2.6). Sin embargo, dado que el modelo

estima las emisiones tomando 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, en su diseño se implementó el concepto de “subcategorías de fuente” (o “Source bin” en inglés). Concepto bajo el cual los vehículos, dentro de cada categoría de uso, son agrupados a partir de criterios tales como: tipo de combustible, tecnología del motor, año modelo y peso del vehículo cargado. La Tabla 2.7 muestra algunos de los parámetros, dentro de cada criterio, que se emplean en la definición de las categorías de fuente o bins.

**Tabla 2.6 Categorías vehiculares en MOVES**

<b>Categorías</b>	<b>Descripción</b>
Vehículos de pasajeros	Automóviles 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	Minivan, 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
Motor Home	Vehículo de motor construido sobre un chasis de camión 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	

Bajo este esquema de caracterización de la flota vehicular, una categoría de fuente o bin es una combinación única de valores. Por ejemplo, todos los vehículos a gasolina con motores de combustión interna convencional, modelos 1993 a 1998, peso del vehículo cargado de entre 2,501 y 3,000 libras y un tamaño de motor menor a dos litros podrían definir una sola categoría de fuente o bin. En general, esta característica de conformar subcategorías o bins le otorga flexibilidad a MOVES para modelar diferentes mezclas de tecnologías vehiculares.



**Tabla 2.7 Elementos considerados en la definición de subcategorías de fuente o bins en la caracterización de la flota vehicular en MOVES**

Tipo de combustible	Tecnología del motor	Peso del vehículo cargado (libras)	Tamaño del motor (litros)	Clase	Grupo de año modelo*
Gasolina	Combustión interna	<500 (motocicletas)	<2.0	Motocicleta	1972 y ant.
Diesel	convencional	500-700 (motocicletas)	2.1-2.5	LDV	1973
Gas Natural Comprimido – GNC	Combustión interna	>700	2.6-3.0	LDT	1974
Gas Licuado de Petróleo - GLP	avanzada	≤2000	3.1-3.5	HDG	1975
Híbrido con combustión interna	Híbrido con combustión interna	2001-2500	3.5-4.0	PBV ≤14000 lbs	.
Etanol	avanzada	2501-3000	4.1-4.5	HDG	.
Metanol	Celda de combustible	3001-3500	4.5-5.0	PBV >14000 lbs	1999
Hidrógeno gaseoso	Eléctrico	3501-4000	>5.0	LHDD	2000
Hidrogeno liquido		4001-4500		MHDD	2001-2010
Electricidad		4501-5000		HHDD	2011-2020
		26,001-33,000		Autobuses urbanos	2021 y post.
		33,001-40,000			
		40,001-50,000			
		50,001-60,000			
		60,001-80,000			
		80,001-100,000			
		100,001-130,000			
		≥130,001			

\* Estos grupos de año modelo corresponden a los que se utilizan para estimar las emisiones de metano y óxido nítrico. Para estimar el consumo de energía y las emisiones para otros contaminantes los grupos de año modelo son diferentes.

### Tipos de fuentes modeladas

A diferencia de MOBILE6, que sólo considera la generación de factores de emisión para vehículos que circulan en carretera, MOVES esta siendo diseñado para estimar las emisiones provenientes tanto de los vehículos que circulan en carretera como de los vehículos fuera de ruta. Esta estimación considera tanto las emisiones provenientes por el escape como las evaporativas, además de las emisiones de partículas por el desgaste de los frenos, desgaste de las llantas, etc.

### Tipos de contaminantes

La primera versión de MOVES, conocida como MOVES4 o MOVES2004, únicamente estima emisiones de óxido nítrico, metano y dióxido de carbono, también conocidos como gases efecto invernadero, en función del consumo de combustible por tipo de vehículo.

La versión de MOVES2006 añade al MOVES2004 la opción de estimar emisiones de contaminantes criterio: hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y material particulado. En MOVES2007, se incluye la estimación de contaminantes tóxicos, amoniaco, y dióxido de azufre, donde éste último contaminante es estimado en función del contenido de azufre en los combustibles, y el resto de los contaminantes

mediante factores de emisión generados por el MOBILE6 (Tabla 2.8). Sin embargo, estas versiones no se encuentran disponibles para los usuarios en este momento. En la actualidad sólo esta disponible al usuario la versión MOVES4, mediante el cual solo se estiman emisiones de gases efecto invernadero, a nivel condado, estado o nación, exclusivamente para Estados Unidos de América. La versión MOVES2008 incluirá fuentes no-carretera, tales como aviones, locomotoras y embarcaciones, así como la actualización de las bases de datos de fuentes móviles carreteras. Es importante destacar que MOVES, es capaz de estimar las emisiones para estos contaminantes por hora del día, día de la semana, o mes, para fechas desde 1999 hasta 2050.

**Tabla 2.8 Contaminantes considerados en las diferentes versiones de MOVES**

Contaminantes			Descripción
MOVES2004*	MOVES2006	MOVES2007	
N <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
	HC	HC	Hidrocarburos
	CO	CO	Monóxido de carbono
	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
	PM	PM	Partículas
		SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
		NH <sub>3</sub>	Amoniaco
		Contaminantes tóxicos	

\* Versión actualmente disponible al público

### Insumos generales

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 los 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 corta de los parámetros de entrada demandados por MOVES son mostrados a continuación.

- Año calendario base
- Mes
- Temperatura ambiental
- Humedad relativa
- Formulación del combustible (e.g. presión de vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenantes, etc.)
- Población vehicular por tipo y año modelo para el año base (de acuerdo con los Cuadros 5-4 y 5-5)
- Crecimiento promedio de la flota vehicular del año base al año de análisis. Esto sólo aplica si el año base es un año futuro.
- Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo, tipo de vía, año modelo y hora del día.
- Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía
- Distribución del número de arranques del vehículo, por tipo de vehículo, año modelo y hora del día

- Tiempo de reposo del vehículo, por tipo de vehículo, año modelo y hora del día
- Descripción del programa de inspección y mantenimiento

#### **2.1.4 IVE (USA)**

El modelo internacional de emisiones vehiculares es un programa en lenguaje JAVA 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, que permite la estimación de las emisiones de contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero provenientes de vehículos en circulación.

El concepto de desarrollo del modelo IVE fue la de proveer a países en vías de desarrollo con una herramienta de estimación rápida del inventario de emisiones de vehículos en circulación, con el que además las autoridades pueden evaluar estrategias de control y planeación de transporte.

Considerando la falta de experiencia y de datos suficientes en algunos países en vías de desarrollo, para usar de manera apropiada los modelos de emisiones más complejos, IVE fue diseñado para ser:

- Flexible en su uso
- Adaptable a cualquier país
- Fácil de entender y usar
- Demandar pocos insumos
- Utilizar mediciones de campo
- Generar resultados “consistentes” con MOBILE6.

De acuerdo con los resultados de un análisis comparativo de los resultados generados con diferentes modelos empleados en la estimación de emisiones de fuentes móviles, el modelo IVE estima resultados  $\pm 10\%$  diferentes respecto a las estimaciones a partir del uso de los factores de emisión obtenidos con MOBILE6: Hasta el momento, IVE ha sido utilizado para generar el inventario de emisiones de fuentes móviles en ciudades como: Shangai y Beijing (China), Pune (India), Sao Paulo (Brasil), Lima (Perú), Santiago (Chile), Nairobi (Kenia), Almaty (Kazajstán) y Los Ángeles (Estados Unidos).

#### **Categorías vehiculares**

IVE es un modelo que estima las emisiones generadas por vehículos de pasajeros, motocicletas, camiones y autobuses. En lo particular contempla un total de 1372 categorías vehiculares, las cuales son definidas con base en los criterios indicados en la Tabla 2.9. De acuerdo a este esquema de caracterización de la flota vehicular, al igual que en MOVES, una categoría vehicular es una combinación única de valores. Por ejemplo, una categoría vehicular podría quedar definida por todos los vehículos ligeros (con peso bruto vehicular inferior a 2,268 kilogramos), 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. De manera similar a lo que ocurre con MOVES, 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.

**Tabla 2.9 Criterios para definir las categorías vehiculares en IVE**

Tipo de combustible	Tamaño del motor (litros)	Alimentación del combustible	Kilometraje acumulado	Tecnología de control de emisiones	Sistema de recuperación de vapores
Gasolina Diesel Gas Natural Comprimido GNC Gas Licuado de Petróleo GLP Etanol	Para vehículos de pasajeros y camiones ligeros: < 1.5 1.5 - 3.0 > 3.0 Motocicletas	Carburador Inyección central o monopunto Inyección múltiple	Menos de 79,000 km Entre 80,000 y 161,000 km Más de 161,000 km	Convertidor catalítico de dos vías Con Convertidor catalítico de tres vías . . Vehículos de baja emisión EURO I, II, III, IV y V	Sin control Válvula de ventilación positiva Válvula de ventilación positiva y control en el tanque de combustible Control de evaporativas

La Tabla 2.10 muestra un breve listado de las categorías vehiculares consideradas por IVE.

**Tabla 2.10 Ejemplo de algunas categorías vehiculares en IVE**

Categorías	Descripción
Automóvil/Camión ligero a gasolina; ligero	Son vehículos de pasajeros y camiones, a gasolina, de peso ligero ( $PBV \leq 2268$ kg), con un tamaño de motor menor a 1.5 litros
Automóvil/Camión ligero a gasolina; mediano	Son vehículos de pasajeros y camiones, a gasolina, de peso medio ( $2993\text{kg} > PBV > 2268$ kg), con un tamaño de motor menor a 3 litros
Automóvil/Camión ligero a gasolina; pesado	Son vehículos de pasajeros y camiones, a gasolina, pesados ( $4082\text{kg} > PBV > 2993$ kg), con un tamaño de motor mayor a 3 litros
Automóvil/Camión ligero a diesel; ligero	Son vehículos de pasajeros y camiones, a diesel, de peso ligero ( $PBV \leq 2268$ kg), con un tamaño de motor menor a 1.5 litros
Automóvil/Camión ligero a diesel; mediano	Son vehículos de pasajeros y camiones, a diesel, de peso medio ( $2993\text{kg} > PBV > 2268$ kg), con un tamaño de motor menor a 3 litros
Automóvil/Camión ligero a diesel pesado	Son vehículos de pasajeros y camiones, a diesel, pesados ( $4082\text{kg} > PBV > 2993$ kg), con un tamaño de motor mayor a 3 litros

## Tipos de fuentes modeladas

IVE sólo considera la estimación de las emisiones generadas por los vehículos que circulan en carretera. Esta estimación considera tanto las emisiones provenientes por el escape como las evaporativas.

## Tipos de contaminantes

El modelo IVE estima las emisiones tanto de contaminantes criterio como de contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero. El listado detallado de las especies químicas para las cuales IVE es capaz de estimar las emisiones para las diferentes categorías vehiculares es mostrado en el Tabla 2.11.

*Tabla 2.11 Contaminantes considerados en IVE*

Contaminante	Descripción
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CO	Monóxido de carbono
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
PM	Partículas
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
BENZ	Benceno
BUTA	1,3-Butadieno
ALD	Aldehídos

## Insumos generales

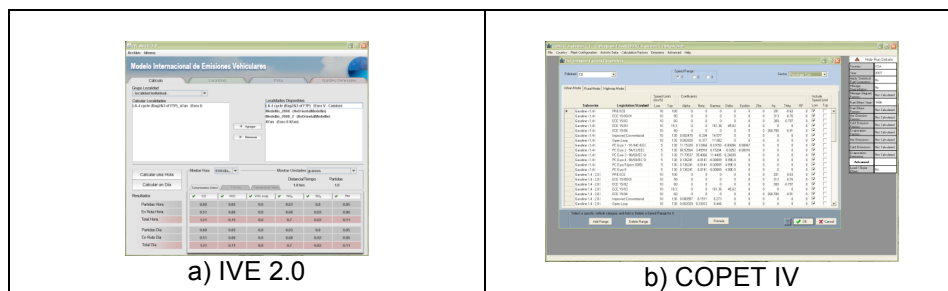
Para estimar el inventario de emisiones para la región de interés, tomando en cuenta los tipos de contaminantes y categorías vehiculares señaladas en las secciones anteriores, IVE demanda que le sean suministrados los insumos que se muestran a continuación.

- Temperatura ambiental
- Humedad relativa
- Altitud
- Información sobre características de la gasolina (e.g., azufre, plomo, benceno y oxigenantes)
- Información sobre características de diesel (e.g., azufre)
- Tipo de programa de inspección y mantenimiento
- Uso del aire acondicionado
- Distribución de la flota vehicular por tecnología
- Desglose detallado de actividad (KRV) por categoría vehicular
- Número de arranques, por día y categoría vehicular, y tiempo entre arranques consecutivos

- Factores de emisión para cada tecnología bajo las condiciones locales de operación.

### 2.1.5 Comparación entre modelos internacionales

En los apartados anteriores se deja en claro que cada modelo de emisiones vehiculares sigue su propia metodología, independientemente de que la teoría es muy similar en cada uno de ellos. De manera de demostrar esta diferencia se realizó una comparación de resultados entre los modelos COPERT IV e IVE 2.0 para una flota similar de vehículos. El modelo COPERT IV utiliza factores de emisión dependientes de la velocidad media del vehículo, dichos factores se obtienen realizando una aproximación estadística sobre valores medidos donde la variable predictiva es la velocidad media del vehículo. El modelo de emisiones IVE utiliza valores medidos pero la aproximación estadística se realiza utilizando como variable predictiva la Potencia Especifica Vehicular (Ver apartado 2.2)[7].



*Figura 2.1 Modelos Comparados*

### Parámetros para estimación en ambos modelos

La comparación de diferentes modelos de emisiones no es trivial, al utilizar diferentes metodologías se deben elegir los parámetros correctos de manera de comparar vehículos similares bajo condiciones similares. A continuación se listan los aspectos que deben tener similitud para realizar una comparación fiable.

- Categorías vehiculares
- Patrones de conducción
- Calidad de combustible
- Nivel de deterioro de los vehículos
- Variables geográficas y climáticas (Altura, humedad, temperatura, etc.)

#### Categorías vehiculares

El modelo IVE posee 1374 categorías validas mientras que COPERT IV posee 219, de esta manera para diferentes categorías del modelo IVE solo existe una categoría valida en el modelo COPERT IV. En la Tabla 2.12 se muestran las equivalencias utilizadas entre los dos modelos y la composición de cada flota comparada.

## Patrones de conducción

El modelo de emisiones IVE, debido a su característica de modelar sus emisiones utilizando la metodología de Potencia Especifica Vehicular, es capaz de modelar diferentes patrones de conducción. El modelo COPERT IV solo permite definir una velocidad media para estimar el factor de emisión. En esta comparación se utilizó en el caso del modelo IVE el patrón de conducción del ciclo LA4 (bolsas 2 y 3), este ciclo posee una velocidad media de 31.8 km/h. En el caso del modelo COPERT IV se estimaron los factores de emisión a la velocidad media del ciclo LA4 (31.8 km/h). De esta manera se asume que el patrón de conducción en COPERT IV es similar al del ciclo LA4.

## Calidad de Combustible

Ambos modelos pueden realizar correcciones por combustible y otras variables, para las ciudades modeladas se utilizaron las mismas características de combustible en ambos modelos.

## Nivel de deterioro

En el modelo IVE el deterioro de los vehículos aparece como nuevas categorías dependiendo de los kilómetros recorridos, sin embargo el modelo COPERT IV presenta el deterioro como un factor de corrección sin entregar mayor información. En el caso de esta comparación el modelo COPERT IV fue utilizado sin deterioro.

## Variables Geográficas y Climáticas

El modelo IVE tiene la capacidad de corregir por la Altura a la cual el vehículo opera, además de poder corregir por humedad y temperatura ambiente. El modelo COPERT IV posee la capacidad de corregir por variables climáticas pero no por la altura. En este caso se normalizaron ambos modelos en sus variables climáticas y el IVE se modeló a nivel del mar ( $H = 0$ ).

## Resultados de estimación

La comparación de estimación de emisiones para ambos modelos se realizó utilizando tres flotas con la misma composición que las flotas medidas en cada ciudad. Esta decisión responde a la capacidad de poder comparar estos resultados con los resultados medidos más adelante en este documento. La flota que presenta una mayor variedad de categorías corresponde a las flota de Sao Paulo mientras que la flota de México D.F. es la que presenta una menor variedad de categorías.

En la tabla siguiente se muestran las correlación de categorías entre ambos modelos y la composición de las flotas analizadas.

**Tabla 2.12 Correlaciones de Categorías y Composición**

	IVE 2.0		COPERT IV		%
	Cód.	Descripción	Cód.	Descripción	
<b>SANTIAGO PESADOS</b>	1073	Truck/Bus Diesel Light Pre-Chamber Inject. None None >161K km	1162	Rigid <=7,5 t Conventional	18%
	1079	Truck/Bus Diesel Heavy Pre-Chamber Inject. None None >161K km	1190	Rigid 20 - 26 t Conventional	9%
	1121	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro I None >161K km	1177	Rigid 12 - 14 t HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	18%
	1127	Truck/Bus Diesel Light FI Euro II None >161K km	1164	Rigid <=7,5 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	27%
	1134	Truck/Bus Diesel Light FI Euro III None <79K km	1165	Rigid <=7,5 t HD Euro III - 2000 Standards	18%
	1137	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro III None <79K km	1179	Rigid 12 - 14 t HD Euro III - 2000 Standards	9%
<b>Total Santiago Pesados</b>					<b>100%</b>
<b>MEXICO D.F. PESADOS</b>	1076	Truck/Bus Diesel Medium Pre-Chamber Inject. None None >161K km	1176	Rigid 12 - 14 t Conventional	10%
	1079	Truck/Bus Diesel Heavy Pre-Chamber Inject. None None >161K km	1190	Rigid 20 - 26 t Conventional	60%
	1088	Truck/Bus Diesel Heavy Direct Injection Improved None >161K km	1191	Rigid 20 - 26 t HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	10%
	1095	Truck/Bus Diesel Heavy Direct Injection EGR+Improv None <79K km	1192	Rigid 20 - 26 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	20%
<b>Total México D.F. Pesados</b>					<b>100%</b>
<b>SAO PAULO PESADOS</b>	1076	Truck/Bus Diesel Medium Pre-Chamber Inject. None None >161K km	1176	Rigid 12 - 14 t Conventional	4%
	1079	Truck/Bus Diesel Heavy Pre-Chamber Inject. None None >161K km	1190	Rigid 20 - 26 t Conventional	4%
	1121	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro I None >161K km	1177	Rigid 12 - 14 t HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	4%
	1124	Truck/Bus Diesel Heavy FI Euro I None >161K km	1191	Rigid 20 - 26 t HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	17%
	1128	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro II None <79K km	1178	Rigid 12 - 14 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	13%
	1129	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro II None 80-161K km	1178	Rigid 12 - 14 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	13%
	1130	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro II None >161K km	1178	Rigid 12 - 14 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	8%
	1132	Truck/Bus Diesel Heavy FI Euro II None 80-161K km	1192	Rigid 20 - 26 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	13%
	1133	Truck/Bus Diesel Heavy FI Euro II None >161K km	1192	Rigid 20 - 26 t HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	17%
	1137	Truck/Bus Diesel Medium FI Euro III None <79K km	1179	Rigid 12 - 14 t HD Euro III - 2000 Standards	4%
	1140	Truck/Bus Diesel Heavy FI Euro III None <79K km	1179	Rigid 12 - 14 t HD Euro III - 2000 Standards	4%
<b>Total Sao Paulo Pesados</b>					<b>100%</b>

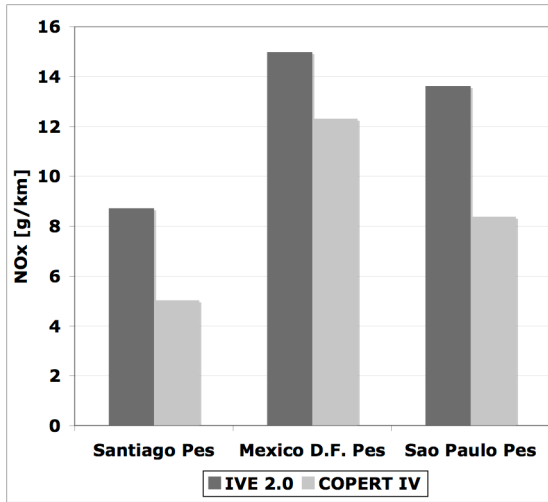
Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla y gráficamente en la Figura 2.2. Se observa que los resultados del modelo IVE 2.0 son más altos que los del modelo COPERT IV para ambos contaminantes.

Los patrones de conducción utilizados en ambos modelos pueden explicar este tipo de diferencias. En el modelo IVE 2.0 se utiliza el patrón de conducción del ciclo FTP 75 utilizado para homologación en USA y el modelo COPERT IV utiliza patrones de conducción europeos medidos en ruta, se puede asumir que el ciclo FTP 75 es más agresivo que el ciclo europeo para la velocidad media cercana a los 30 km/h.

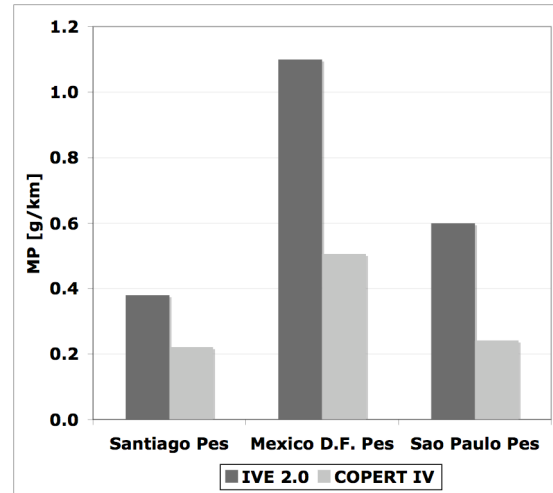


**Tabla 2.13 Resultado de emisiones de MP y NOx**

Cont.	Modelo	Santiago Pesados	México D.F. Pesados	Sao Paulo Pesados
NOX [g/km]	IVE 2.0	8.72	14.99	13.63
	COPERT IV	5.03	12.32	8.38
MP [g/km]	IVE 2.0	0.38	1.10	0.60
	COPERT IV	0.22	0.51	0.24



a) Comparación de emisiones para NOx modelos IVE 2.0 y COPERT IV



b) Comparación de emisiones para MP modelos IVE 2.0 y COPERT IV

**Figura 2.2 Comparación de emisiones entre los modelos IVE 2.0 y COPERT IV**

## **2.2 Potencia Especifica Vehicular**

La principal dificultad de realizar mediciones en ruta corresponde a la normalización del ciclo de conducción utilizado. Es prácticamente imposible realizar el mismo ciclo cuando el vehículo está sometido a las condiciones de tráfico normal. Una opción sería realizar las pruebas en un circuito cerrado, difíciles de encontrar y que por lo demás incrementarían los costos de la campaña.

Es por lo anterior que para comparar los resultados de emisiones en distintas locaciones y bajo distintas condiciones se utiliza la metodología de Potencia Especifica Vehicular. La metodología de Potencia Especifica Vehicular permite normalizar las emisiones obtenidas bajo diferentes patrones de conducción llevándolos a un ciclo único donde es posible comparar las emisiones.

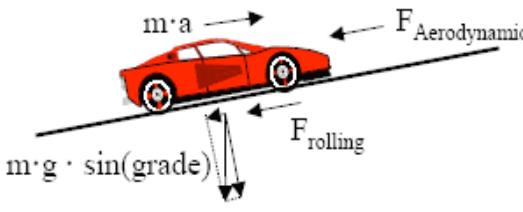
A continuación se explica, en primer lugar, lo básico de la teoría de la Potencia Especifica Vehicular desarrollada por Luís Jiménez en su trabajo de tesis y, en segundo lugar, la adaptación de esta metodología dentro el modelo IVE.

### **2.2.1 Teoría de la Potencia Especifica Vehicular**

La Potencia Especifica Vehicular o Vehicle Specific Power (VSP) corresponde a la energía requerida para operar el vehículo por unidad de peso en unidades de kilowatt por tonelada. La VSP incluye la resistencia a la rodadura, la resistencia al aire, la energía cinética para acelerar el vehículo y el efecto de la pendiente.

Esta variable es considerada como la mejor unidad para estimar emisiones vehiculares, según los modelos internacionales más recientes de estimación de emisiones (IVE y MOVES). Su desarrollo teórico se encuentra ampliamente reportado en la literatura especializada, destacándose el trabajo de tesis de José Luís Jiménez [7].

El diagrama siguiente muestra esquemáticamente todos los términos considerados por Jiménez en la determinación del parámetro VSP, donde se identifican las fuerzas cinética, potencial, de rodadura, aerodinámica y por fricción interna del vehículo en desplazamiento. Estas fuerzas se combinan para generar la ecuación propuesta por Jiménez utilizada en los modelos IVE y MOVES.



$$VSP = \frac{\text{Power}}{\text{Mass}} = \frac{\frac{d}{dt}(E_{\text{Kinetic}} + E_{\text{Potential}}) + F_{\text{Rolling}} \cdot v + F_{\text{Aerodynamic}} \cdot v + F_{\text{internal friction}} \cdot v}{m} =$$

$$\approx v \cdot a \cdot (1 + \epsilon_i) + g \cdot \text{grade} \cdot v + g \cdot C_R \cdot v + \frac{1}{2} \rho_a C_D \frac{A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v + C_{if} \cdot v$$

*Figura 2.3 Ecuación de VSP según Jiménez*

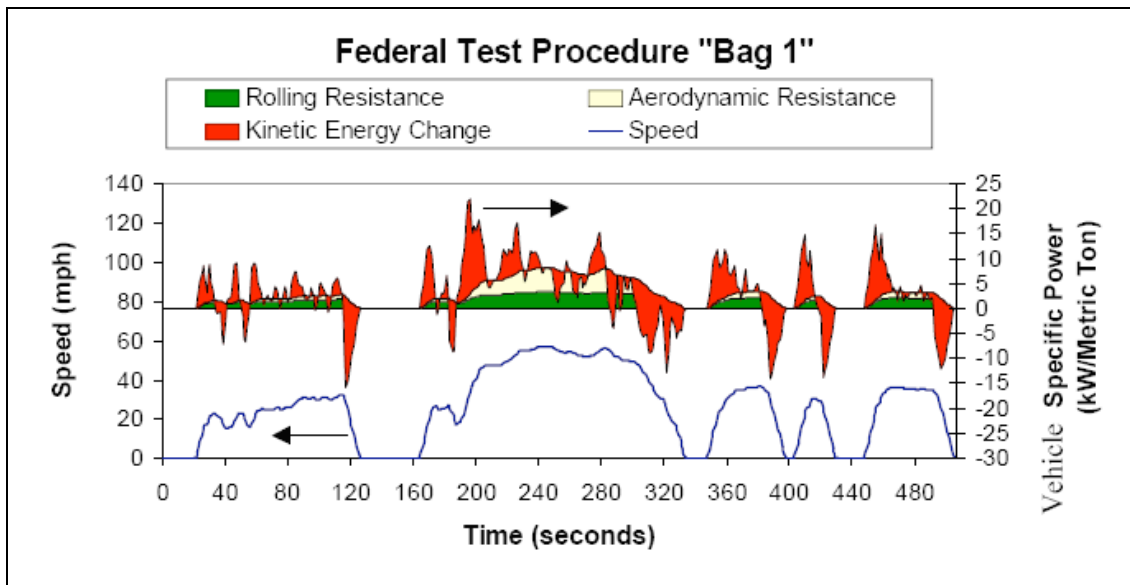
## 2.2.2 Metodología IVE de Potencia Especifica Vehicular

La metodología utilizada en el modelo IVE se basa en la teoría de VSP de Jiménez, el IVE organiza los VSP en “Bins” y aparece la variable denominada “Stress” del motor. En el presente trabajo de Tesis esta es la metodología utilizada para el análisis de los resultados de cada una de las mediciones. A continuación se describe la metodología IVE basada en la VSP.

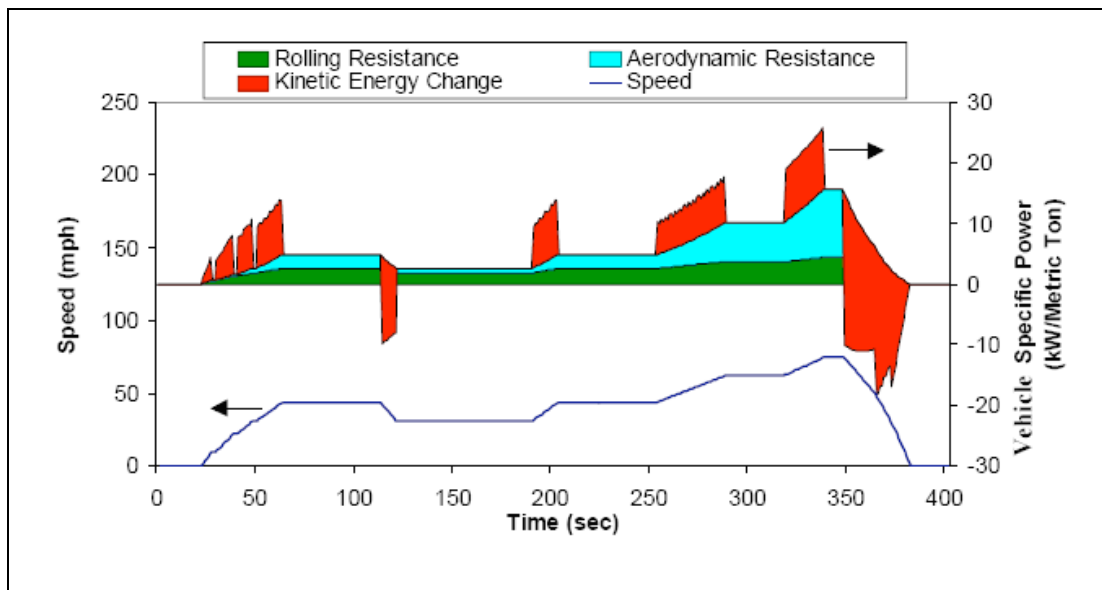
La ecuación utilizada en el modelo IVE es la siguiente:

$$VSP \left( \frac{kW}{Ton} = \frac{W}{kg} = \frac{m^2}{s^3} \right) = v \left[ 1.1 \cdot a + 9.81 \cdot \sin(\tan^{-1}(\text{grade})) + 0.132 \right] + 0.000302 \cdot v^3 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $v$  es la velocidad instantánea del vehículo en m/s,  $a$  es la aceleración en  $m/s^2$ , y  $\text{grade}$  es la distancia vertical dividida por el largo de la pendiente entre dos segundos consecutivos. Ejemplos de los VSP instantáneos obtenidos para dos ciclos internacionales de referencia se muestran en las figuras siguientes:



**Figura 2.4** Distribución de consumos energéticos Ciclo FTP Fase 1



**Figura 2.5** Distribución energética Ciclo Europeo ECE2

El modelo IVE divide la VSP en 20 niveles de operación, llamados “bins”, y a su vez divide la operación del motor en 3 niveles de esfuerzo o “Stress”, para un total de 60 bins. Normalmente la operación de los vehículos se encontrará en los primeros 20 niveles de operación. La separación de VSP según los 20 niveles o bins del modelo IVE se indica en la tabla siguiente.

**Tabla 2.14 Potencia Específica Vehicular agrupada en 20 niveles de operación**

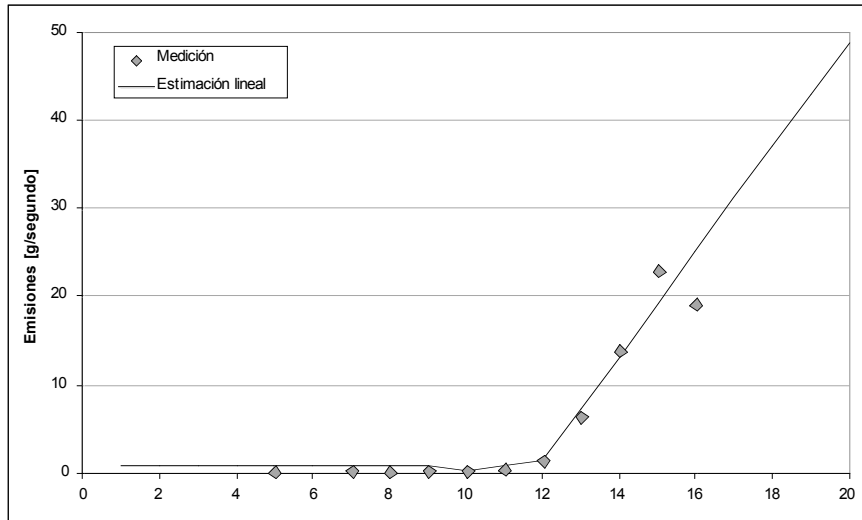
Nivel (bin)	VSP (kW/Ton)	
	Valor inferior	Valor superior
0	-80,0	-44,0
1	-44,0	-39,9
2	-39,9	-35,8
3	-35,8	-31,7
4	-31,7	-27,6
5	-27,6	-23,4
6	-23,4	-19,3
7	-19,3	-15,2
8	-15,2	-11,1
9	-11,1	-7,0
10	-7,0	-2,9
11	-2,9	1,2
12	1,2	5,3
13	5,3	9,4
14	9,4	13,6
15	13,6	17,7
16	17,7	21,8
17	21,8	25,9
18	25,9	30,0
19	30,0	100

Un segundo parámetro utilizado en el modelo IVE es denominado *Stress*, el cual es principalmente influido por las revoluciones por minuto estimadas para el motor, y en segundo lugar por la carga aplicada sobre el vehículo en los últimos 15 segundos de conducción al momento de efectuar el cálculo. La Tabla 2.15 muestra los tres niveles de estrés considerados en IVE.

**Tabla 2.15 Límites considerados para el estrés del motor**

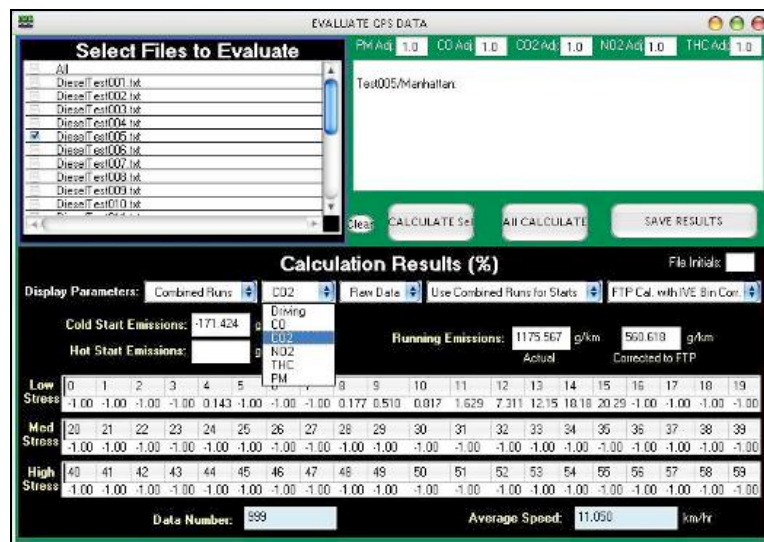
Nivel (bin)	Estrés del motor (adimensional)	
	Límite inferior	Límite superior
0 a 19	-1.6	3.1
20 a 39	3.1	7.8
40 a 59	7.8	12.6

La Figura 2.6 muestra los resultados de emisiones en base a VSP para CO<sub>2</sub> en un bus Euro 3, los niveles o bins 0 a 10 representan los casos donde el vehículo desacelera (0 corresponde a la mayor tasa de desaceleración). Los niveles 12 a 19 representan los casos en que el vehículo está acelerando (19 es el caso de mayor aceleración). El nivel 11 corresponde a las inmediaciones de operación en ralentí, donde la velocidad y la aceleración son muy pequeñas o nulas. Se observa que los mayores niveles de emisión aparecen en los niveles más altos de potencia, donde el motor se encuentra más exigido. Esta situación se repite para la mayoría de los contaminantes considerados en la presente investigación.



**Figura 2.6 Emisiones en bins de VSP para CO2**

El procesamiento y análisis de los resultados obtenidos en la campaña de medición de emisiones en ruta se efectúa aplicando la metodología IVE, a través de un programa especialmente diseñado para estos propósitos, cuya interfase de utilización se muestra en la figura siguiente. En la parte superior izquierda se listan los archivos seleccionados para el análisis, las celdas centrales ofrecen al usuario escoger las diversas alternativas de procesamiento (en este caso se ha seleccionado CO<sub>2</sub>), y la parte inferior muestra los resultados del análisis según niveles de operación o bins desde 0 a 59. El programa se puede obtener en la siguiente dirección de internet: [www.issrc.org/modeling/extras](http://www.issrc.org/modeling/extras).



**Figura 2.7 Programa de procesamiento de VSP**

La aplicación de éste software permite asociar los distintos bins de VSP recolectados para cada categoría vehicular a niveles de emisión por contaminante en gramos por kilómetro. De esta forma es posible estimar las emisiones de cualquier ciclo de conducción si son conocidos sus niveles o bins de VSP.

### **3 Metodología General**

En el presente capítulo se describen las metodologías utilizadas en este trabajo de Tesis de manera de cumplir con los objetivos propuestos en el Capítulo 1. La primera de ellas corresponde a la planificación de las campañas experimentales, donde se describen los equipos, las necesidades de los circuitos y las flotas objetivo de vehículos a medir. La segunda corresponde a la campaña experimental, donde se describe el procedimiento de instalación de equipos, la medición en ruta y finalmente el procesamiento y análisis de la información.

#### **3.1 Mediciones en ruta (Planificación)**

Tradicionalmente, para determinar estándares de emisión de motores utilizados en vehículos pesados se aplica un procedimiento estándar sobre el motor en un banco de pruebas dotado de dinamómetro. Este tipo de procedimiento genera valores de emisión en g/kWh (sistema métrico) ó lb/bhph (sistema imperial). Los ensayos con dinamómetro de chasis permiten investigar factores de emisión bajo condiciones específicas y controladas de operación y muestreo, con información muy detallada para vehículos individuales, con alto grado de precisión y repetibilidad entre ensayos. Sin embargo, debido al alto costo y tiempo requerido por cada ensayo, solo una muestra limitada de vehículos puede ser incluida en los programas de medición utilizando esta metodología.

Debido a estas limitaciones, es necesario evaluar alternativas de medición, con menor costo por vehículo, manteniendo niveles de precisión adecuados. Los factores de emisión obtenidos deben ser representativos de las condiciones existentes en la ciudad y deben ser definidos de manera tal que puedan ser utilizados en el cálculo de inventarios de emisión de fuentes móviles.

Existen métodos alternativos que han sido planteados internacionalmente para determinar factores de emisión de gases y partículas en vehículos motorizados. En este trabajo se utilizará una metodología de mediciones en ruta (mediciones a bordo de los vehículos) utilizando instrumental portátil. Esta metodología contempla los aspectos listados a continuación:

- Provisión de equipos portátiles para medición de gases y partículas,
- Definición de circuitos de medición, y finalmente
- Definición de una muestra representativa de vehículos.

A continuación se explica en detalle, en que consiste cada uno de estos aspectos.

### 3.1.1 Equipos portátiles de medición

La metodología de muestreo directo de emisiones en ruta utiliza un montaje portátil de analizadores y sistemas de medición de material particulado, los cuales pueden ser transportados en el mismo vehículo bajo análisis, con capacidad de medición en tiempo real. Los analizadores de gases pueden ser de distintos tipos, pero de preferencia se consideran los sistemas tradicionales utilizados en laboratorio, tales como detector de ionización de llama (FID) para hidrocarburos, analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR) para monóxido y dióxido de carbono, y analizador ultravioleta no dispersivo (NDUV) o de luminiscencia química (CHLM) para óxidos de nitrógeno. De preferencia se deben usar este tipo de analizadores en lugar de sensores electroquímicos, siendo estos últimos más económicos pero de menor precisión y corta vida útil.





Con respecto a la medición de material particulado, la regulación internacional ha estado basada exclusivamente en el método gravimétrico con filtros, que resulta en una medición acumulativa de la emisión másica correspondiente al ciclo completo de conducción. Como sistemas alternativos, recientemente se han reportado instrumentos con capacidad de medición en tiempo real que ofrecen información segundo a segundo de concentración másica de partículas, basados en la detección eléctrica de las partículas, mediante etapas de carga y posterior clasificación por tamaño e inercia.

Paralelamente a la medición en tiempo real de gases y partículas, el vehículo debe tener sensores de posición (GPS) y condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). Esto, junto a la medición de flujo en el escape, permite efectuar las correcciones necesarias debidas a las condiciones existentes en la zona de medición, así como convertir las mediciones volumétricas en mediciones másicas por unidad de distancia recorrida (gramos/kilómetro).

Experiencias similares utilizando estos equipos han sido desarrolladas entre ISSRC y organizaciones locales en Estambul, Turquía (Municipalidad de Estambul, Nov-2006); Beijing, China (Tsinghua University, Jul-2007) y Xi'an, China (Tsinghua University, Abr-2008).



**Tabla 3.1 Equipos portátiles para medición de gases y partículas**

Nombre comercial	Aplicación	Descripción, dimensiones, peso Dirección Internet proveedor	Imagen
SEMTECH-D	Vehículos diesel, livianos, medianos y pesados con y sin DPF	Combinación de detector de ionización de llama (FID) con analizadores infrarrojo y ultravioleta no dispersivo (NDIR y NDUV). Estos métodos permiten medición simultánea para THC, CO, CO <sub>2</sub> , NO y NO <sub>2</sub> en tiempo real, con línea de muestreo a 190°C. Diseño robusto capaz de soportar los golpes y vibraciones existentes en mediciones en terreno. Acoplado con el sistema de medición de gases de escape, GPS y computador a bordo, es posible medir emisiones directamente en g/m (o g/km), g/kg fuel o g/bhp-hr. Dimensiones (mm): 355(H)x432(W)x549(D); peso: 35,4 kg <a href="http://www.sensors-inc.com/semtechd.htm">http://www.sensors-inc.com/semtechd.htm</a>	
DMM-230	Vehículos diesel livianos, medianos y pesados	Dekati Mass Monitor (DMM) es un instrumento para mediciones en tiempo real de emisiones vehiculares de material particulado, en el rango 0.03 - 1.5 µm. El principio de operación está basado en cuatro etapas: carga de partículas, medición de densidad, clasificación por tamaño usando impactadores inerciales (6), y detección eléctrica de partículas cargadas. Incluye software especializado. Dimensiones (mm): 300(H)x560(W)x420(D); peso: 50 kg <a href="http://dekati.com/dmm.shtml">http://dekati.com/dmm.shtml</a>	
DI-1000	Vehículos diesel livianos, medianos y pesados	Dekati Diluter permite realizar muestreo bajo condiciones de alta concentración, temperatura, humedad, y por periodos prolongados de tiempo. Este sistema de dilución permite mantener una tasa de dilución constante (nominal 1:8). Elimina condensación y nucleación de compuestos volátiles y permite obtener una muestra seca de aerosoles. Específicamente diseñado para ser usado en mediciones vehiculares en el tubo de escape y unidades Dekati (ELPI y DMM-230). <a href="http://dekati.com/diluter.shtml">http://dekati.com/diluter.shtml</a>	
SEMTECH-EFM	Vehículos diesel, livianos, medianos y pesados	Permite el análisis de flujo de gases de escape en ruta y en tiempo real. Dispositivo robusto y compacto que mide directamente flujo total en el escape de un vehículo en forma continua mientras este se encuentra en operación. En combinación con los sistemas analíticos SEMTECH-D y -G, es posible medir emisiones mäsicas instantáneas. Existen varios modelos para distintas cilindradas de motor y configuraciones de escape, los cuales están disponibles para el presente estudio. <a href="http://www.sensors-inc.com/efm.htm">http://www.sensors-inc.com/efm.htm</a>	

### 3.1.2 Circuitos recorridos por los vehículos

La medición de emisiones en ruta con equipos portátiles contempla que cada uno de los vehículos de la muestra recorra un circuito similar. Este circuito debe incluir diferentes características que logren exigir el motor de manera tal que se utilice en la mayor cantidad de niveles de potencia posibles.

No es necesario definir circuitos que cumplan con requisitos de representatividad de las condiciones de conducción existentes en cada Región. Los circuitos experimentales a determinar en esta parte del estudio buscan más bien cubrir un amplio rango de niveles de operación del vehículo, expresados a través de la Potencia Específica instantánea

desarrollada por el motor (combinación de velocidad, aceleración e inercia del vehículo), la que se asocia a niveles instantáneos de emisión para cada contaminante. Una vez establecidos estos niveles de emisión por nivel de potencia, es posible determinar la emisión de un ciclo de conducción cualquiera, a partir de su curva velocidad-tiempo.

### **3.1.3 Flotas medidas por ciudad**

Cada campaña experimental se limita a un máximo de 40 vehículos medidos en dos semanas, esta limitante viene dada por los costos de cada estudio y la disponibilidad del equipo técnico. El objetivo es medir una muestra representativa de la flota local de vehículos diesel.

La constitución de la flota experimental se hizo reclutando vehículos de usuarios particulares e institucionales, invitándolos a participar en el programa, para lo cual facilitaban sus vehículos por 5 horas aproximadamente. Se ofreció como incentivo para tal participación la suma aproximada de USD \$200 por día, considerados en el presupuesto de cada estudio.

Los criterios a utilizar en la constitución de la muestra fueron, para cada una de las campañas: lectura de odómetro, estado general de mantención, marca, modelo y año de fabricación. Estos criterios se definieron con el objetivo de constituir una muestra proporcionalmente representativa en relación a la conformación del parque vehicular total de la localidad.

No fueron aceptados vehículos que presentaban problemas mecánicos evidentes, ya sea por que ponen en riesgo al conductor y sus ocupantes, o bien porque dificulten o alteren la medición de gases de escape.

## **3.2 Mediciones en ruta (Campaña Experimental)**

Los vehículos diesel presentan una amplia variedad de configuraciones de chasis y sistemas de escape, lo cual dificulta el procedimiento de medición de emisiones con equipamiento portátil. Pese a estas dificultades, se aplicó un protocolo común a todos los vehículos y las diferentes configuraciones fueron abordadas mediante una clasificación por tipos de vehículo. El procedimiento de medición se presenta en los siguientes puntos.

### **3.2.1 Instalación de equipos**

La instalación de equipos consta de dos partes principales, por un lado se debe instalar el sistema de canalización de gases de escape y en segunda instancia se deben instalar los equipos analizadores tanto de partículas como de gases.

El sistema de canalización de gases de escape corresponde a dirigir los gases de escape del vehículo a través de un tubo metálico donde se mide el flujo de gases de escape y su temperatura, a su vez en este tubo se recogen las muestras para la medición de gases y de particulado.

Los equipos analizadores corresponden a los ya descritos (Semtech-D y Dekati DMM230), estos equipos deben ir acompañados de un generador eléctrico, bomba de vacío, baterías y un computador portátil. Los camiones fueron cargados con bolsas de arena, simulando el 50% de su capacidad máxima de carga.



*Figura 3.1 Sistema de canalización de gases*



*Figura 3.2 Equipos analizadores*

### **3.2.2 Medición de emisiones con equipos portátiles**

Una vez finalizada la instalación se procede a la etapa de medición, en la cual se realiza el recorrido establecido y se monitorean los instrumentos de manera de corregir posibles errores que puedan surgir durante la prueba. Los camiones llevan tres personas a bordo: el conductor, un copiloto que indica la ruta, y un encargado de monitorear permanentemente los equipos a través de dos computadores que despliegan todas las variables en forma instantánea (ver Figura 3.3).

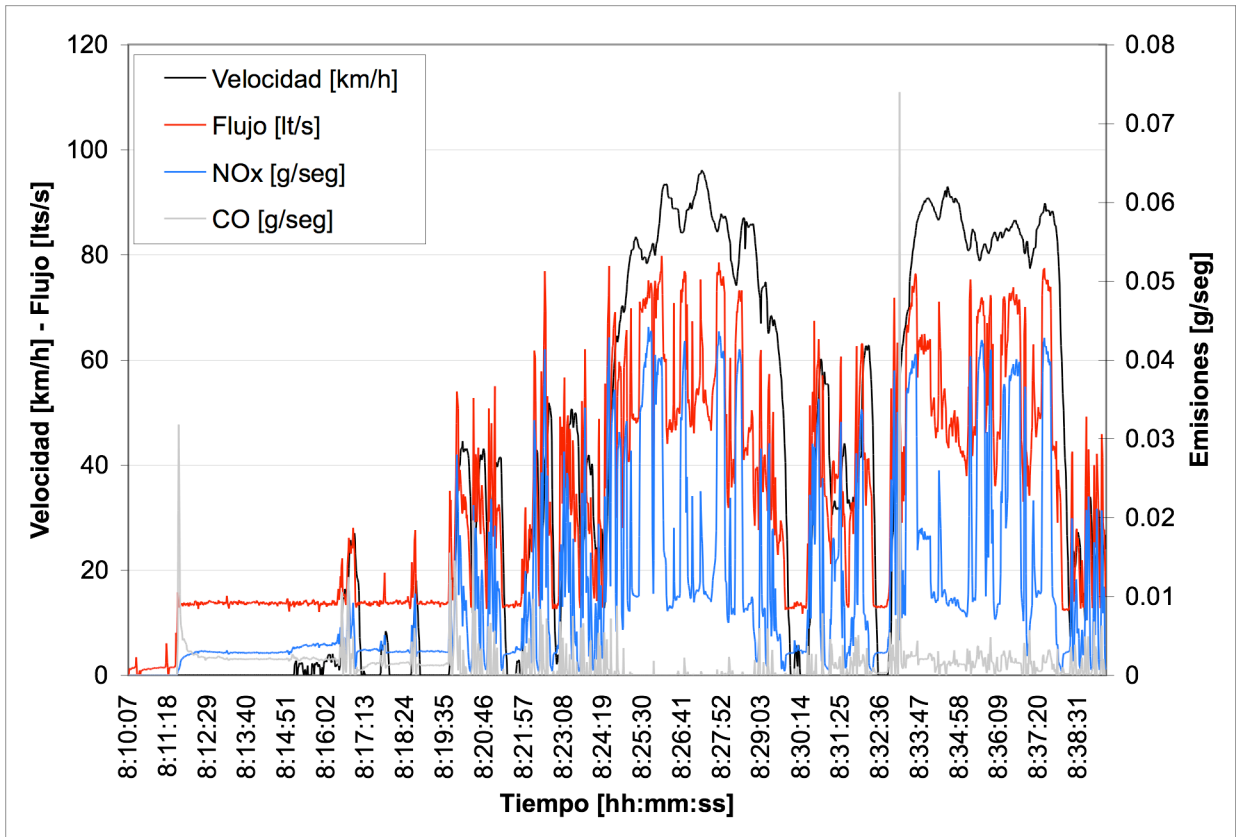


*Figura 3.3 Medición de emisiones Sao Paulo (izq.) y Santiago (der.)*

### **3.2.3 Procesamiento y análisis de datos obtenidos.**

Una vez finalizada la campaña de ensayos en ruta se procede al procesamiento y análisis de los resultados obtenidos para cada una de las categorías vehiculares consideradas. Este procesamiento se ejecuta a través de la metodología específica que se detalla a continuación.

- Correcciones por variables ambientales: los equipos analizadores utilizados corrigen automáticamente las concentraciones de gases considerando los valores instantáneos de humedad relativa, temperatura y presión atmosférica, según estándares internacionales,
- Alineación de tiempo: corresponde a sincronizar los instantes de inicio de cada instrumento de manera que se eliminen las diferencias existentes entre ellos (analizadores, medición de flujo, velocidad del vehículo) (Figura 3.4),
- Tasa de emisión Start/Running: separación de emisiones por partida en frío (start emissions) y con motor en caliente (running emissions),
- Emisiones directas: análisis de las emisiones directamente obtenidas bajo las condiciones de conducción existentes en el estudio,
- Emisiones corregidas: análisis de las emisiones considerando distintos ciclos de conducción, con distintas velocidades medias,
- Análisis individual: determinación de emisiones por vehículo individual,
- Análisis grupal: determinación de emisiones por tecnología o categoría vehicular,
- Análisis por antigüedad: determinación de emisiones según año modelo del vehículo,
- Análisis por velocidad media: determinación de emisiones por tecnología según distintas velocidades medias de operación.



*Figura 3.4 Alineación de datos segundo a segundo*

## 4 Resultados de emisiones

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos en las cuatro campañas de medición realizadas, en Ciudad de México (*México D.F. Pesados*), Santiago de Chile (*Santiago Livianos y Santiago Pesados*) y en Sao Paulo (*Sao Paulo Pesados*). Los resultados en detalle se presentan en el Anexo A.

En las tres ciudades se realizaron tres campañas de medición de vehículos pesados, en las cuales se midieron camiones (livianos, medianos y pesados) y buses, en los casos de Sao Paulo y Ciudad de México. En Santiago de Chile se realizó además una campaña de medición de vehículos livianos diesel, los cuales fueron comparados con los pesados. Los resultados se analizan bajo diferentes aspectos de manera de obtener una total comprensión de los mismos.

Para obtener resultados comparables se aplica la metodología de VSP utilizada en el modelo IVE de emisiones vehiculares, ampliamente descrita en el Capítulo 2. Esta metodología permite comparar mediciones realizadas bajo diferentes condiciones (por ejemplo: distinto ciclo de conducción) llevando los resultados de emisiones a una distribución por energía que permite recrear cualquier ciclo de conducción. El ciclo que se utiliza como comparación corresponde al ciclo FTP 75.

En el punto 4.1 se analiza la capacidad de predecir las emisiones de la metodología VSP y se muestra el resultado de emisiones por ciudad por VSP. Utilizando los promedios de VSP por los vehículos de cada ciudad se comparan en el punto 4.2 los resultados normalizados al ciclo FTP 75, y finalmente en el punto 4.3 se muestran los resultados promedio para cada campaña, resultados que eventualmente pueden ser comparados con otros modelos o servir para cálculos simplificados de emisiones.

### 4.1 Emisiones por VSP

Uno de los propósitos de este trabajo es determinar la variación de las emisiones bajo diferentes condiciones de conducción. Estas condiciones se pueden representar por los bins de conducción del IVE. El modelo IVE divide el rango de las situaciones de conducción en 20 condiciones de demanda de energía (*Bins*) y tres situaciones de estrés del motor (*Stress*). En cada gráfico se muestran los resultados por ciudad.

#### 4.1.1 Análisis de VSP versus velocidad y aceleración como variables predictivas.

La relación entre las emisiones y las variables de conducción tales como velocidad, aceleración y potencia específica han sido estudiadas por varios autores en el pasado [8,9,10,11]. Sin embargo, la potencia específica o VSP se presenta como el parámetro que mejor predice las emisiones cuando se poseen datos segundo a segundo de emisiones y de parámetros de conducción.

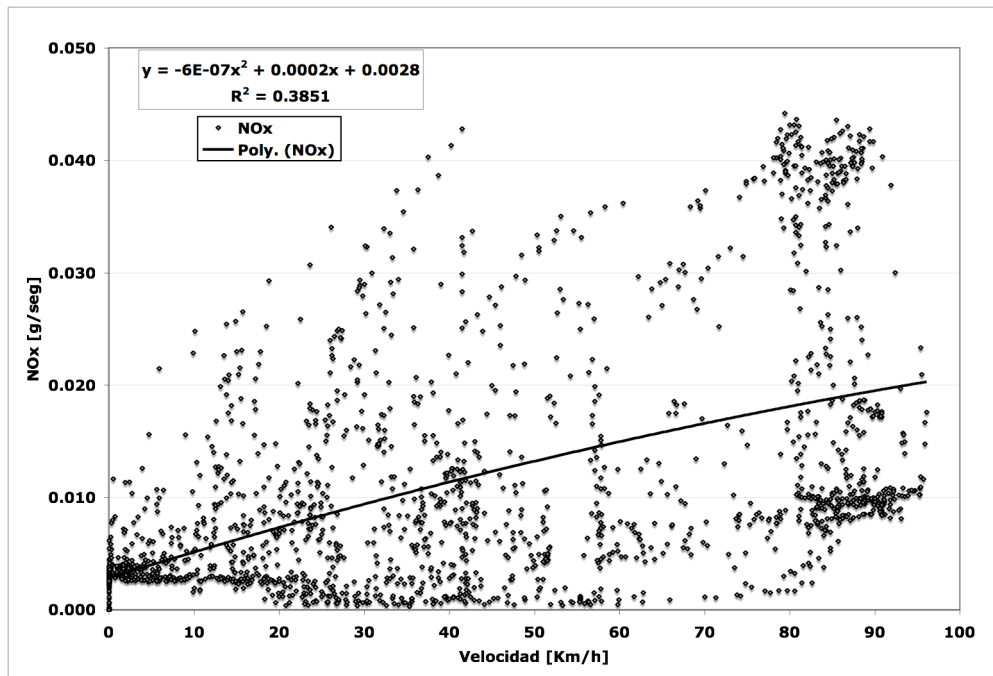
Para respaldar esta afirmación, a continuación se presenta el análisis de un camión liviano Kia Frontier II 2.5, año 2006, medido en Santiago de Chile. El análisis incluye la relación de las emisiones con la velocidad, con la aceleración y por último con la Potencia Específica Vehicular VSP.

Los resultados se muestran en la figuras a continuación, en la Figura 4.1 se observa una alta dispersión de las emisiones en todo el rango velocidad, realizando una aproximación por línea de tendencia polinomial de orden 2 se obtiene un  $R^2$  de 0.39.

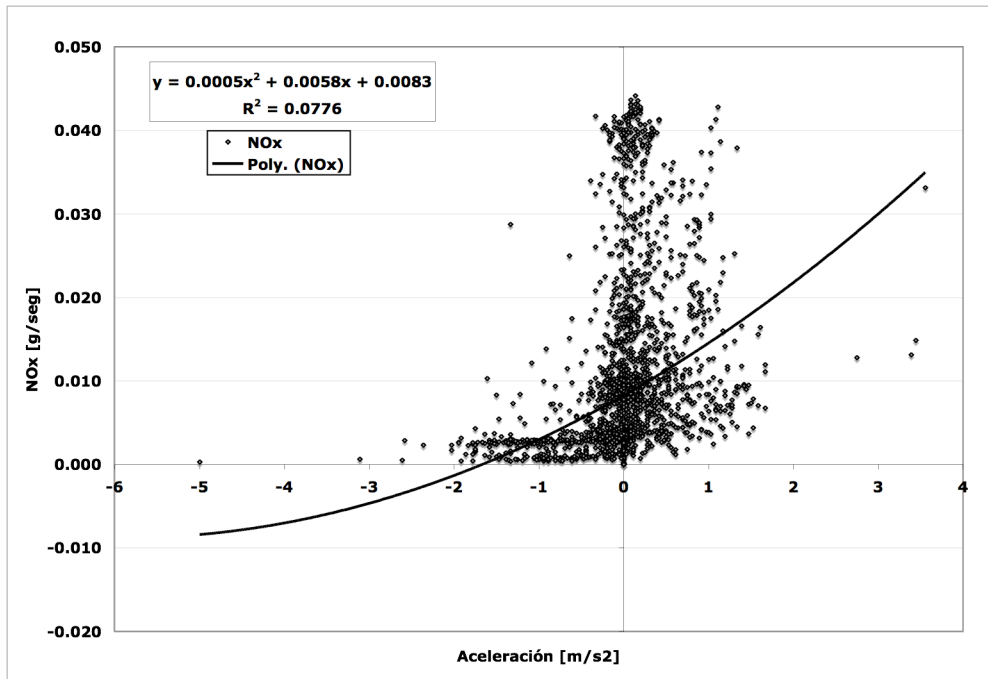
La Figura 4.2 muestra la relación entre las emisiones de  $\text{NO}_x$  y la aceleración. Utilizando una aproximación polinomial de orden 2 se obtiene un valor bajo de  $R^2$  de 0.08. Observando la Figura se observa además que existe poca relación entre las emisiones y la aceleración.

Finalmente, en la Figura 4.3 se muestra la relación entre las emisiones y la Potencia Específica VSP. En este caso se utilizó la misma aproximación polinomial de orden 2 que en los casos anteriores, obteniéndose un  $R^2$  de 0.41. Sin embargo, se observa que el resultado de emisiones tiene una dispersión menor que en los casos anteriores.

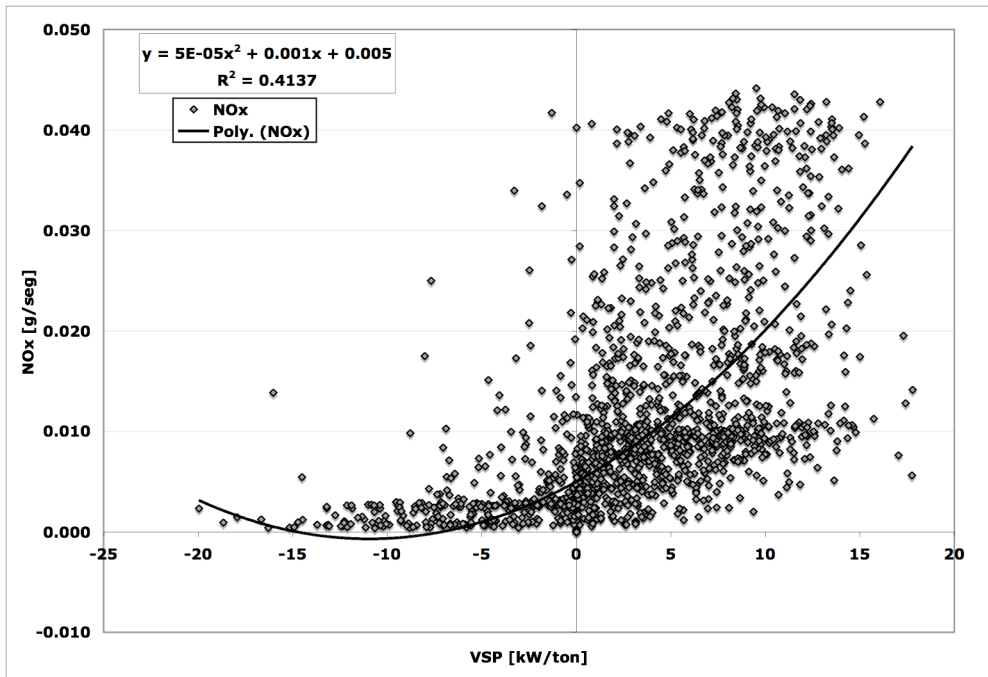
Considerando que los  $R^2$  de la relación Emisiones versus Velocidad y Potencia Específica VSP son similares en valor, se realizó un último análisis donde se comparan las emisiones de  $\text{CO}_2$  del mismo vehículo en un gráfico de superficie.



*Figura 4.1 Emisiones de NOx versus Velocidad*



*Figura 4.2 Emisiones de NOx versus Aceleración*

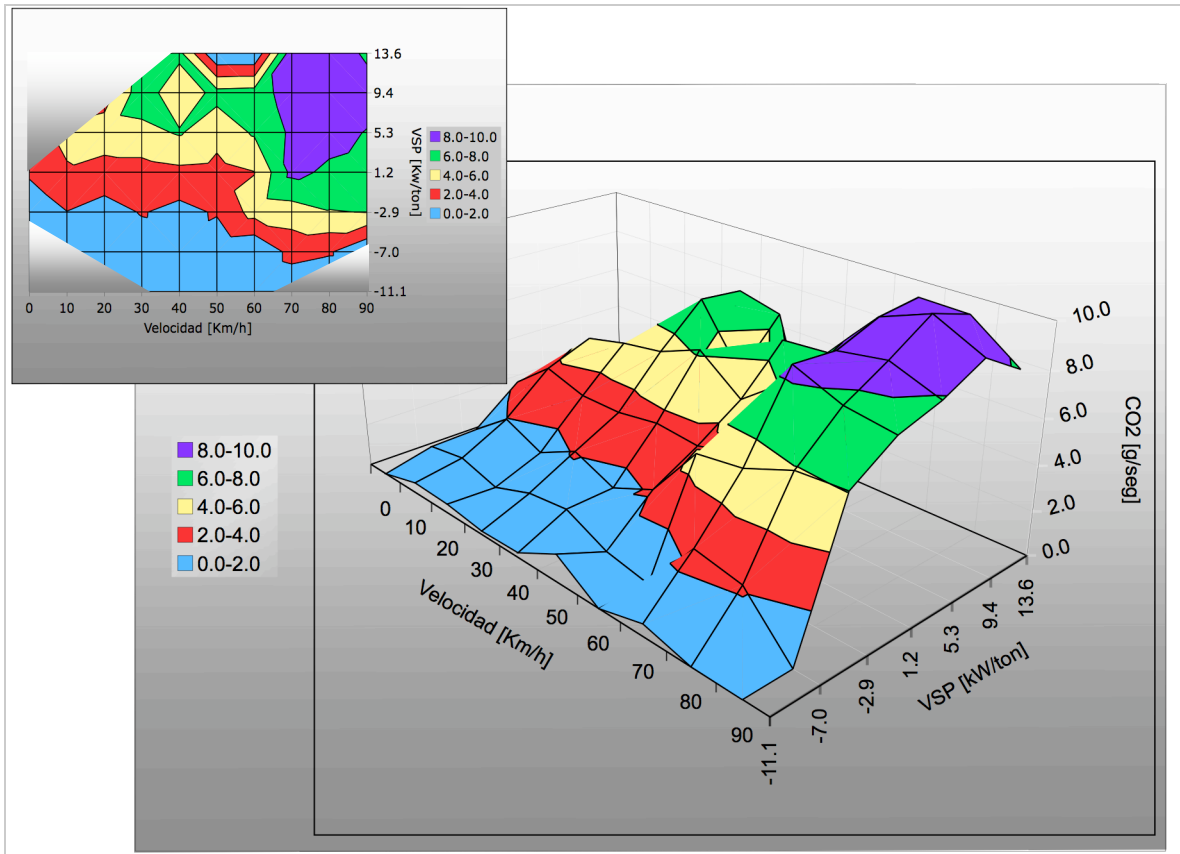


*Figura 4.3 Emisiones de NOx versus VSP*

La Figura 4.4 muestra la relación de las emisiones de CO<sub>2</sub> versus Velocidad y VSP, el eje x corresponde a la velocidad, el eje y a la Potencia Especifica VSP y el eje z a las emisiones de CO<sub>2</sub>. En la esquina superior izquierda se muestra el mismo gráfico visto desde arriba. Se observa que las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto de la velocidad no presentan una tendencia marcada sin embargo, a medida que la VSP aumenta se



produce en todo el rango un tendencia clara de aumento de las emisiones. Este gráfico viene a confirmar que la Potencia Específica Vehicular VSP es la mejor herramienta para predecir las emisiones de un vehículo.



*Figura 4.4 Relación de emisiones de CO<sub>2</sub> versus Velocidad y VSP*

#### 4.1.2 Análisis de VSP por campaña

Según lo analizado en el punto 4.1.1 la Potencia Específica Vehicular VSP es la variable que mejor describe las emisiones de un vehículo. Por lo tanto, se utiliza esta variable para comparar las emisiones de cada una de las campañas en primera instancia. Este tipo de análisis permitirá discernir en que tipo de situaciones “energéticas” del vehículo se presentan las mayores diferencia de emisiones en cada ciudad. Los resultados obtenidos en cada una de las 4 campañas realizadas se expresan en emisiones en gramos por segundo versus VSP, utilizando la metodología descrita en el Capítulo 3.

Por último, los resultados en VSP permitirán comparar las emisiones llevando cada uno de las mediciones a un mismo ciclo de conducción, en este caso el ciclo FTP 75. Esto se analiza en profundidad en el punto 4.2 del presente Capítulo.

Los gráficos siguientes muestran las emisiones de los contaminantes criterio para cada una de las campañas, estos resultados corresponden al promedio de todos los

vehículos. El eje x corresponde a los 20 *Bins* de VSP por cada uno de los 3 *Bins* de *Stress* del motor, en total 60 *Bins*, ambos conceptos fueron descritos en el Capítulo 2. El eje y corresponde a las emisiones en gramos por segundo de cada contaminante.

La Figura 4.5 muestra el porcentaje de conducción en cada campaña, esta variable pone de manifiesto que un gran porcentaje de la conducción en zonas urbanas se realiza en ralentí, correspondiente al rango de VSP entre -2.89 kW/ton y 1.22 kW/ton en el nivel -1.6 – 3.1 de *Stress*. La campaña con menor porcentaje de ralentí fue la *Santiago Pesados* con un 40%, y la con mayor porcentaje fue *México D.F. Pesados* con un 60% de ralentí.

En las Figuras 4.6 a 4.10 se observa la tendencia antes expuesta de emisiones por VSP, las emisiones aumentan a medida que el valor de VSP pasa a positivo, y esto se repite para los tres niveles de *Stress*. En cada uno de los gráficos se observa que las emisiones de *México D.F. Pesados* son más altas que las de las otras campañas. A su vez las emisiones de *Santiago Livianos* presenta las más bajas. Este resultado se mantiene para las emisiones de CO<sub>2</sub> (Figura 4.7) lo que significa que los vehículos medidos en México presentan un mayor consumo de combustible y son de tamaño mayor que el resto (lo contrario ocurre con los *Santiago Livianos*). En el caso de los NO<sub>x</sub> (Figura 4.8) se observa que a partir del nivel de VSP de 21.78 en el nivel de *Stress* -1.6 – 3.1 las emisiones de NO<sub>x</sub> bajan en casi todas las campañas, este fenómeno se puede deber a que los vehículos entran en un modo de enriquecimiento de combustible que reduce las emisiones de NO<sub>x</sub> en situación de alta demanda de potencia. En el caso de los HC y el MP se observa la misma tendencia.

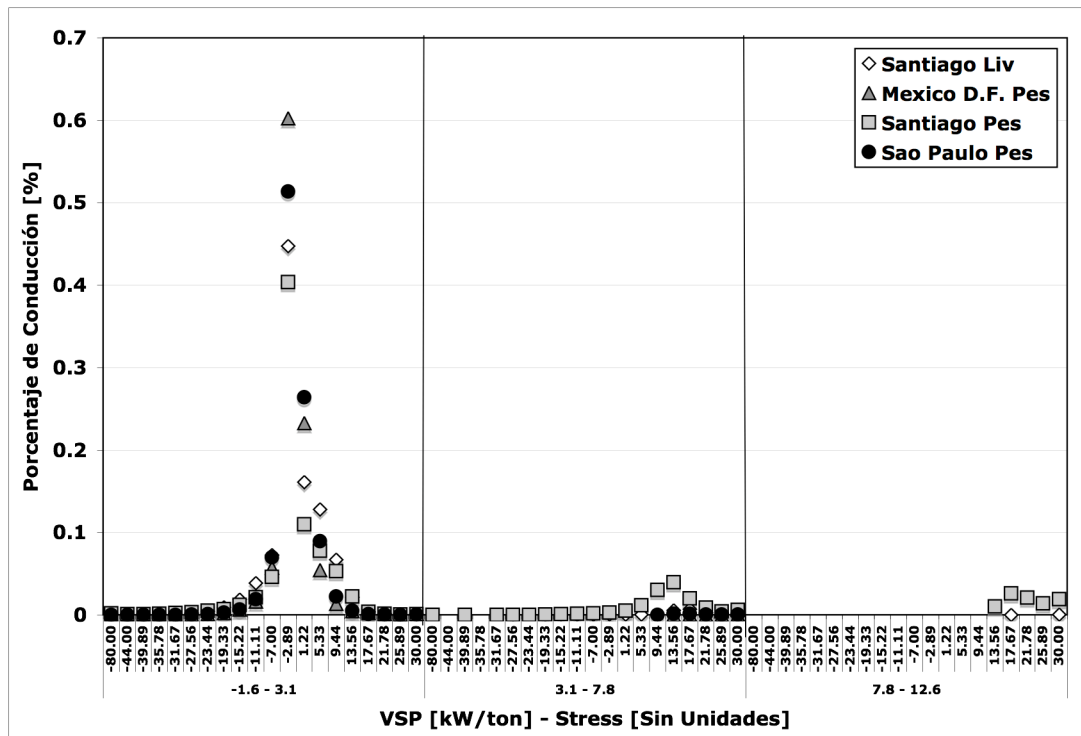


Figura 4.5 Porcentaje de conducción según VSP – Stress por campaña

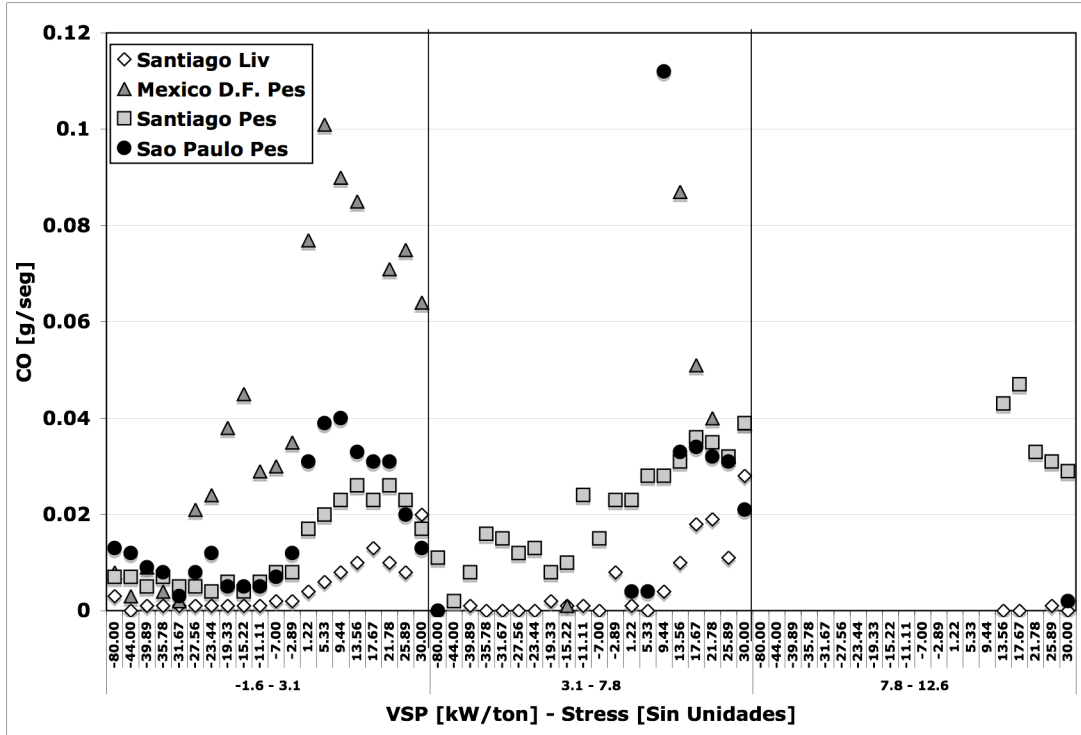


Figura 4.6 Emisiones de CO según VSP – Stress por campaña

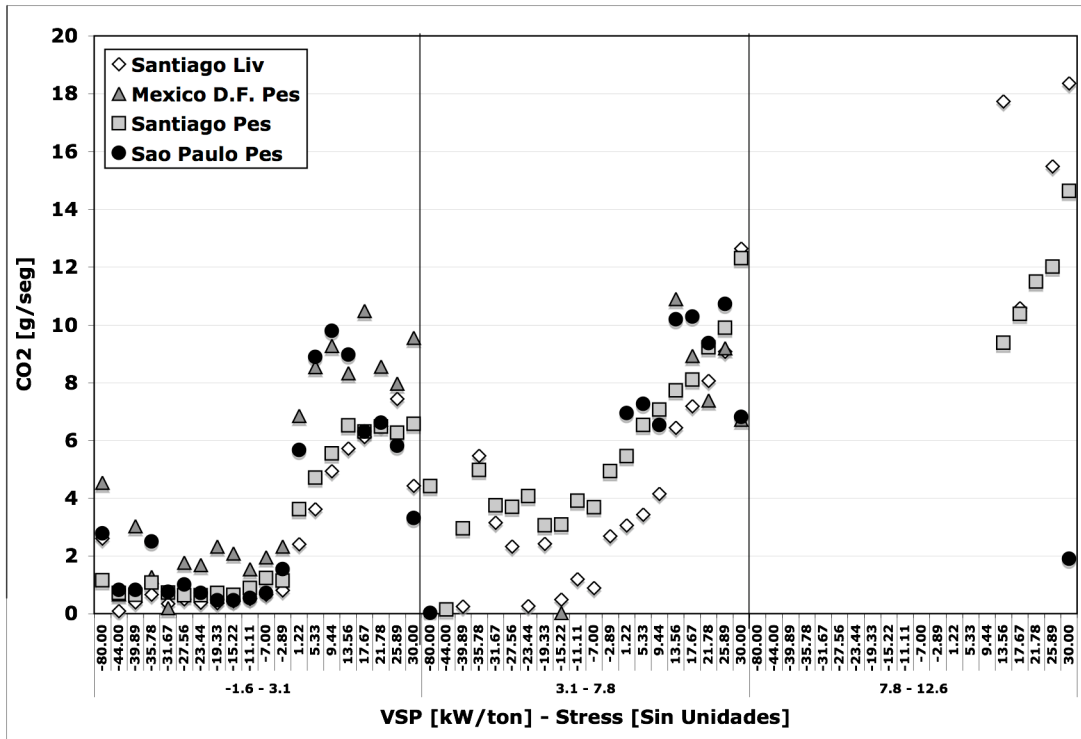


Figura 4.7 Emisiones de CO<sub>2</sub> según VSP – Stress por campaña

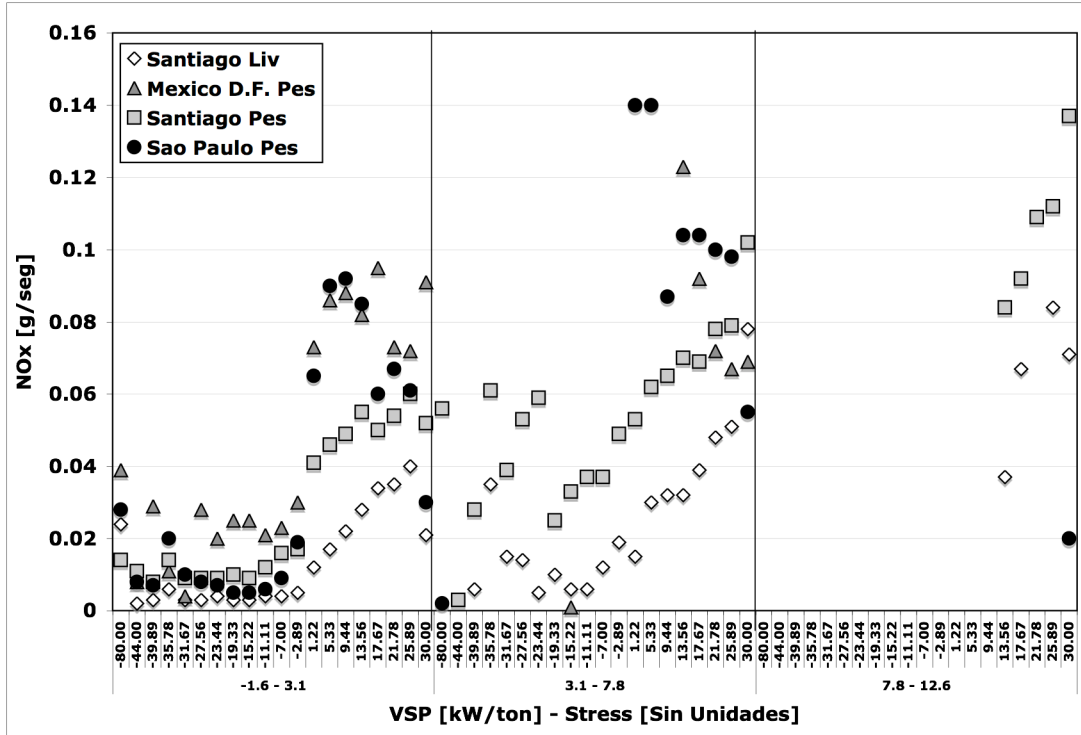


Figura 4.8 Emisiones de NO<sub>x</sub> según VSP – Stress por campaña

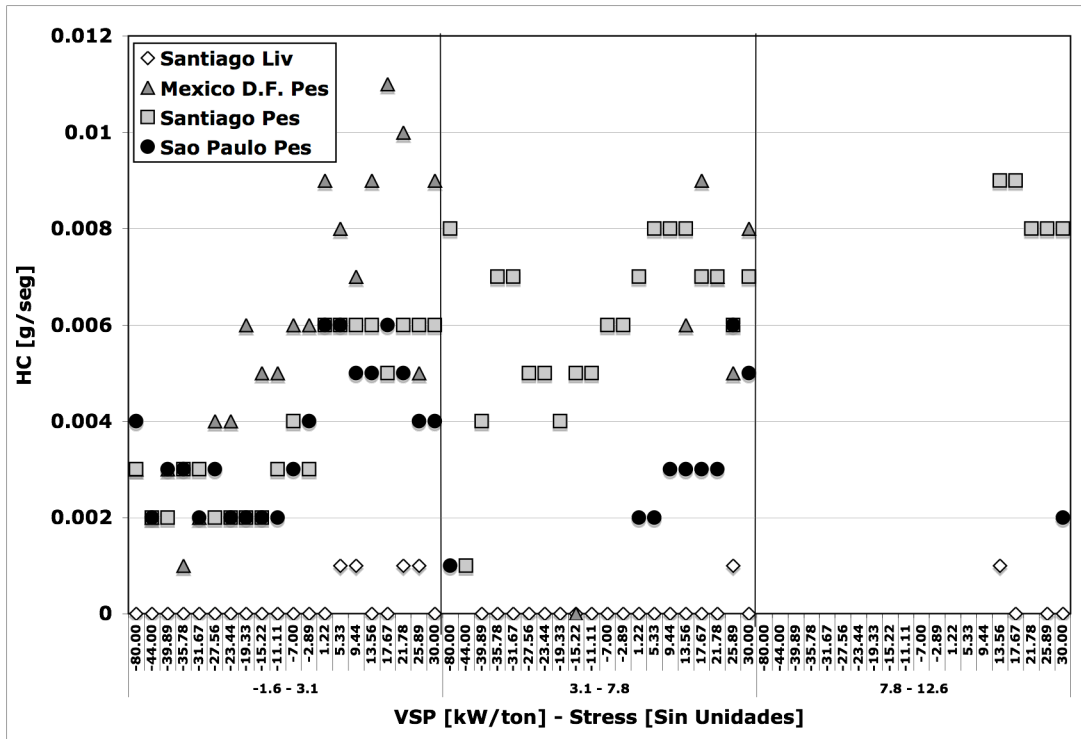


Figura 4.9 Emisiones de HC según VSP – Stress por campaña

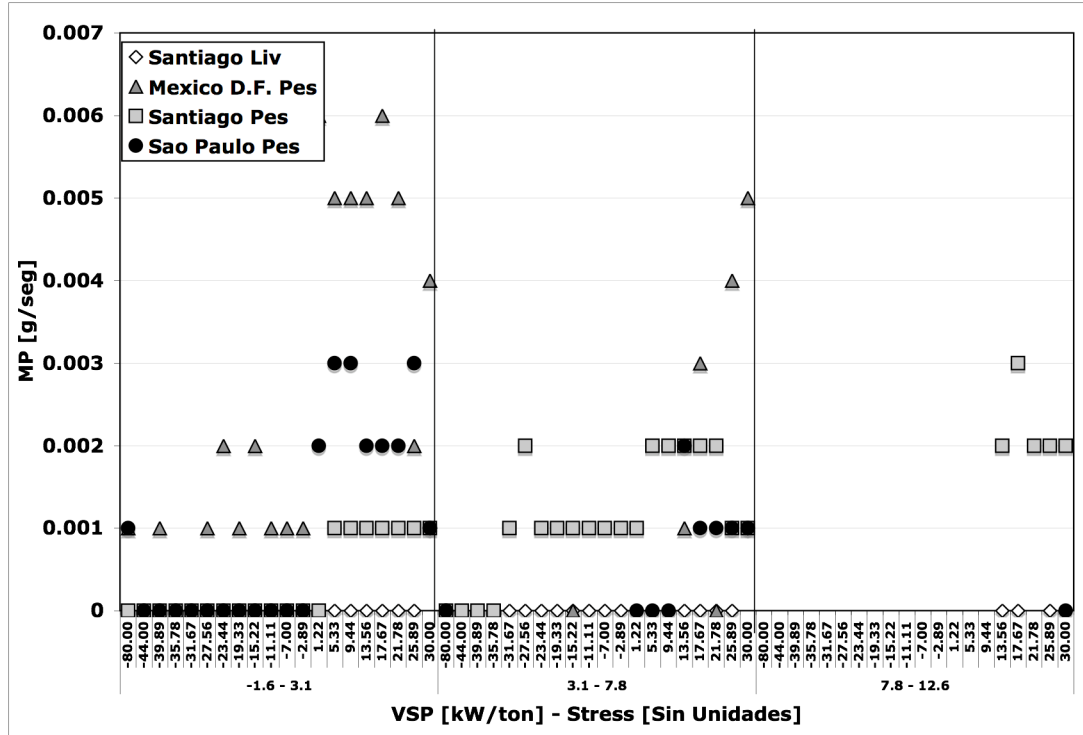


Figura 4.10 Emisiones de MP según VSP – Stress por campaña

## 4.2 Resultados de emisiones en gramos kilómetro por campaña

La teoría de VSP es una metodología relativamente nueva, por lo tanto tradicionalmente no hay formas de comparar estos resultados con otras fuentes tales como modelos de emisiones (Capítulo 2), normas de emisión, etc. De manera de obtener resultados en gramos por kilómetro se utiliza el patrón de VSP para cada vehículo en el ciclo de conducción FTP 75, de manera de obtener resultados comparables. Esta metodología se describe en el punto 2.2.

Las campañas de *México D.F. Pesados*, *Santiago Pesados* y *Sao Paulo Pesados* fueron divididas en dos categorías: 1) livianos y 2) pesados. La campaña *Santiago Livianos*, como su nombre lo indica, solo se trata de vehículos livianos diesel.

De manera de dejar en claro esta desagregación se presenta la siguiente nomenclatura utilizada en las Figuras siguientes.

**Tabla 4.1 Nomenclatura de las categorías por campaña**

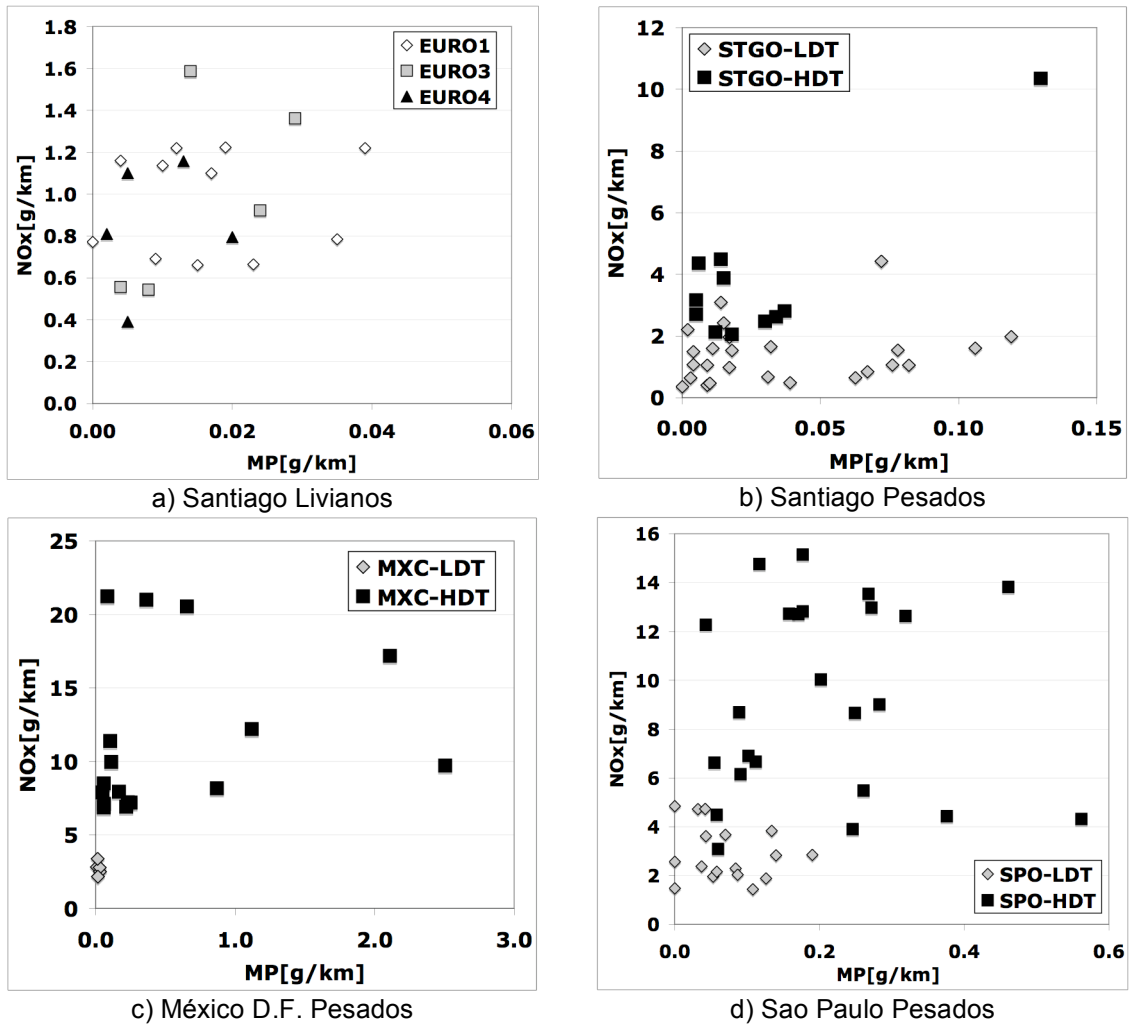
Campaña	Livianos	Pesados
Santiago Livianos	STGO-LD	N/C
Santiago Pesados	STGO-LDT	STGO-HDT
México D.F. Pesados	MXC-LDT	MXC-HDT
Sao Paulo Pesados	SPO-LDT	SPO-HDT

N/C: No corresponde

### 4.2.1 Distribución de emisiones en gramos por kilómetro por campaña (NO<sub>x</sub> vs. MP)

La primera aproximación para obtener una total comprensión de los resultados por campaña corresponde a conocer la distribución de los resultados de las emisiones de cada una de las campañas. El análisis NO<sub>x</sub> vs. MP es el que corresponde a vehículos diesel debido a que estos son los contaminantes predominantes en este tipo de tecnología.

Observando la Figura 4.11 se puede concluir acerca de la dispersión en cada una de las 4 campañas. La campaña *Santiago Livianos* es la única que está desagregada por norma, para los vehículos medidos no se observa una tendencia marcada a medida que la norma se hace más estricta. En el resto de las figuras se observa que en *Santiago Pesados* algunos de los camiones livianos emitieron más emisiones de MP que los pesados pero en NO<sub>x</sub> los pesados emiten más. En *México D.F. Pesados* se observa que los camiones livianos corresponden a vehículos muy limpios, en efecto los livianos medidos en México eran vehículos nuevos. En el caso de *Sao Paulo Pesados*, la dispersión de los resultados es mayor, los camiones pesados emiten significativamente más que los livianos, en efecto en Sao Paulo se midió la flota más diversa desde el punto de vista tecnológico y de tamaños.



**Figura 4.11** Distribución de emisiones de NO<sub>x</sub> vs. MP para cada campaña

En la Figura 4.12 se observan todas las campañas en el mismo gráfico, esta figura muestra la clara diferencia de emisiones entre los vehículos medidos en Santiago, los de Sao Paulo y México D.F. Las emisiones de NO<sub>x</sub> son hasta 4 veces mayores en la categoría *México D.F. Pesados* respecto a *Santiago Pesados*, y hasta 3 veces respecto a *Sao Paulo Pesados*, relación que se mantiene para MP.

Es importante destacar que las emisiones de vehículos diesel en Santiago son más bajas tanto en NO<sub>x</sub> como en MP, este resultado es interesante debido a que ambos contaminantes son medidos con equipos distintos (Semtech-D y DMM-240).

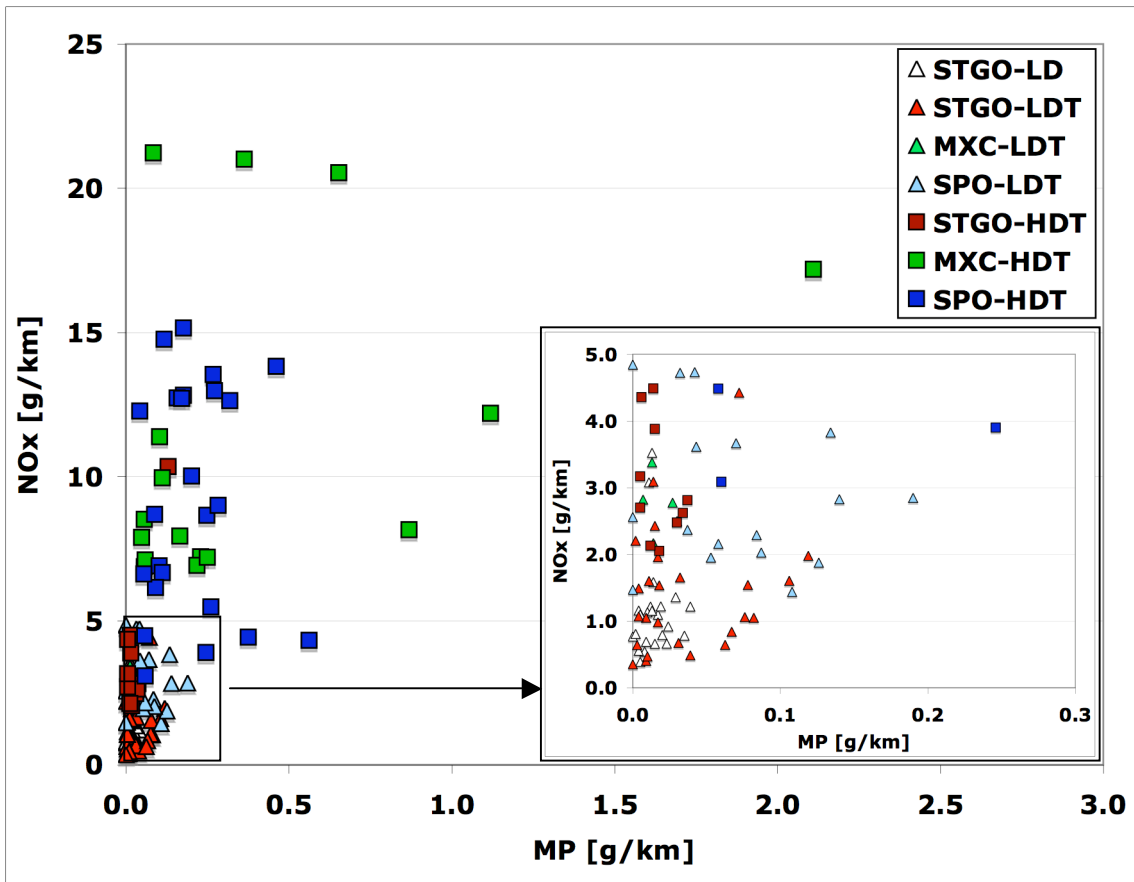


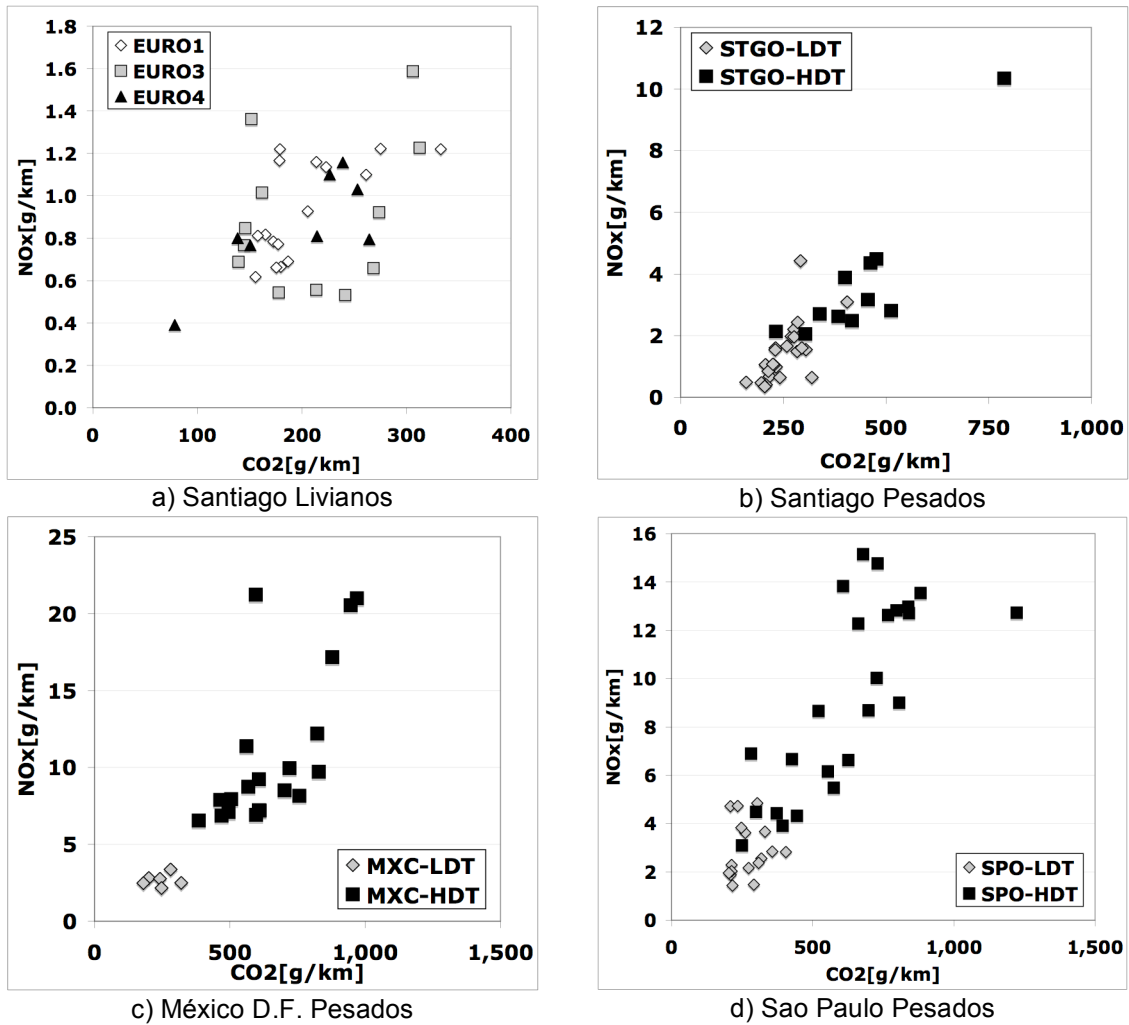
Figura 4.12 Distribución de emisiones de  $NO_x$  vs.  $MP$  para todos los vehículos

#### 4.2.2 Distribución de emisiones en gramos por kilómetro por campaña ( $NO_x$ vs. $CO_2$ )

El segundo análisis que se debe hacer corresponde a las emisiones  $NO_x$  vs.  $CO_2$ . Este análisis entrega conclusiones acerca del tamaño de la flota medida, esto debido a que las emisiones de  $CO_2$  son directamente proporcionales al consumo de combustible.

Nuevamente, las emisiones de *Santiago Livianos* están divididas en categorías tecnológicas. Una vez más no se aprecia una diferencia marcada con la norma de emisión. En el caso de *Santiago Pesados* no se aprecia una gran diferencia entre las emisiones de  $CO_2$  de los camiones livianos vs. los camiones pesados. En el caso de *México D.F. Pesados* ocurre lo contrario, siendo *Sao Paulo Pesados* el término medio en cuanto a emisiones de  $CO_2$ .





**Figura 4.13** Distribución de emisiones de NO<sub>x</sub> vs. CO<sub>2</sub> para cada campaña

En la Figura 4.14 se observa que las flotas de México D.F. y Sao Paulo emiten más CO<sub>2</sub> y por lo tanto son flotas de mayor tamaño que las de Santiago en el caso de Pesados. Esta realidad se corresponde con el hecho de que las flotas de México D.F. y Sao Paulo emitan más NO<sub>x</sub> y MP que la flota de Santiago. Es importante mantener esto en consideración a la hora de concluir que ciudad posee la flota más contaminante.

En cuanto a la flota de Livianos, obviamente la flota *Santiago Livianos* (triángulos blancos en el cuadro de la Figura 4.15) aparece como la de menos emisiones tanto en CO<sub>2</sub> como en NO<sub>x</sub>.

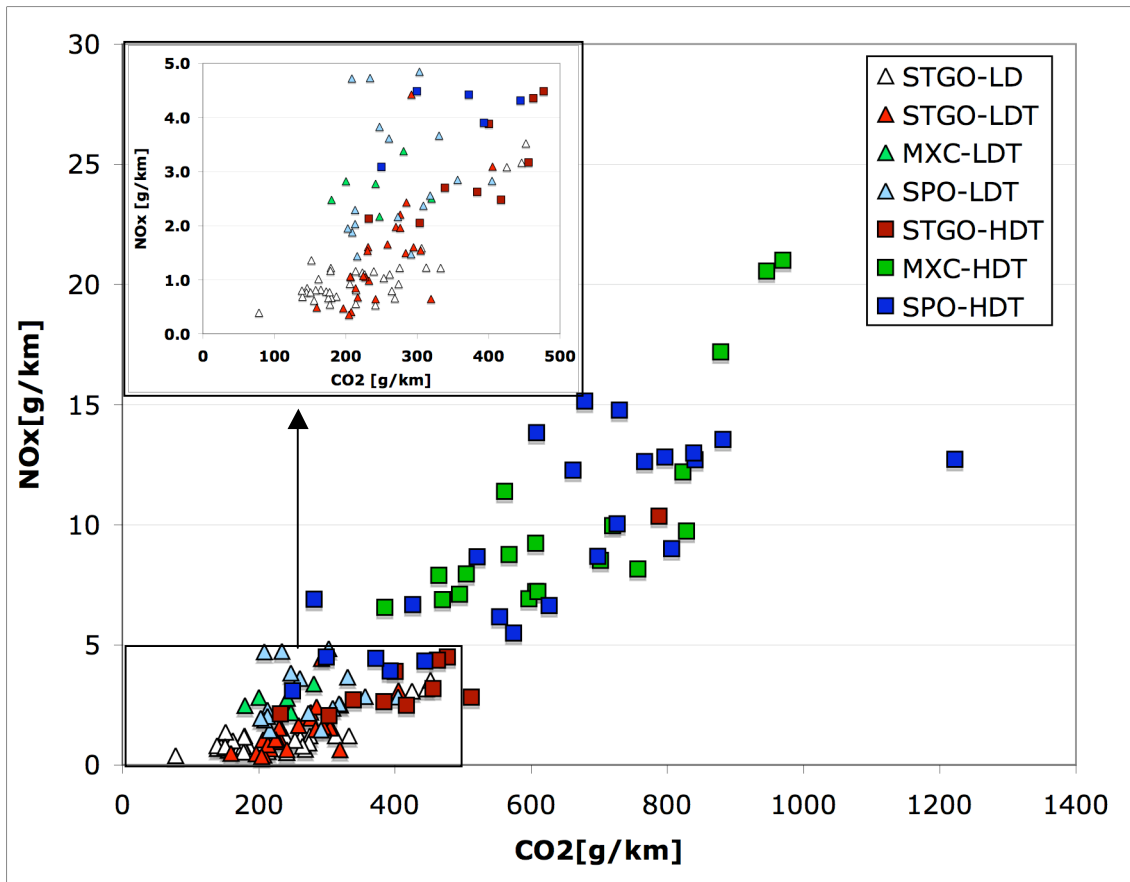


Figura 4.14 Distribución de emisiones de  $NO_x$  vs.  $CO_2$  para todos los vehículos

### 4.2.3 Resultados promedio por campaña

Finalmente, agrupando los resultados de cada ciudad por tamaño, Livianos y Pesados, se obtiene la Tabla 4.2. En ella se aprecian los resultados promedio en gramos kilómetro, información que puede ser comparada con modelos de emisiones.

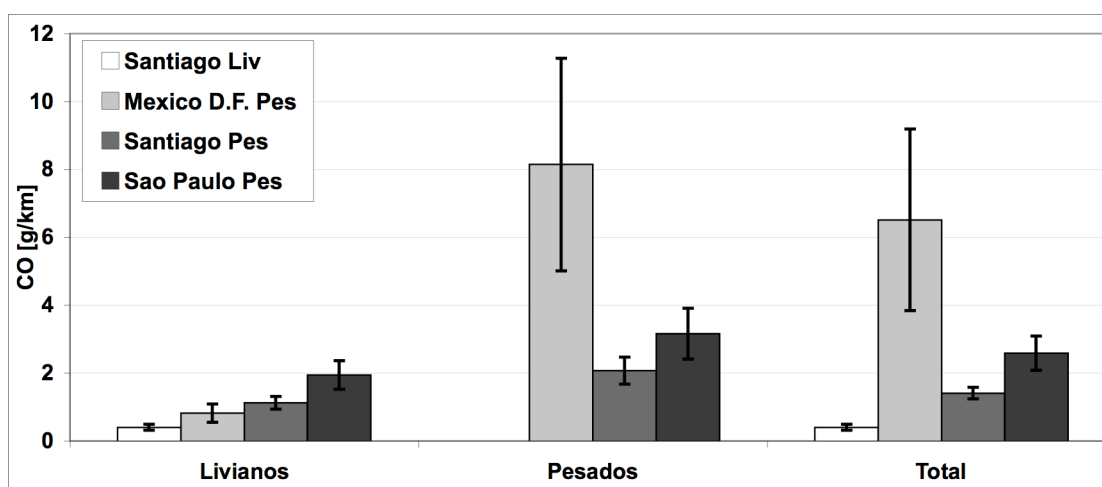
Se observa en la Tabla que *México D.F. Pesados* es la campaña que presenta las emisiones más altas en todos los contaminantes cuando se considera la flota Total. En el lado opuesto se encuentra la campaña *Santiago Livianos* como era de esperar.

Si se analizan los resultados por tamaño de vehículos, en Livianos *Sao Paulo Pesados* aparece como la campaña con más altas emisiones en todos los contaminantes excepto para HC donde *Santiago Pesados* es la más alta. En la categoría *Pesados México D.F. Pesados* presenta las mayores emisiones en CO, HC y MP, mientras que *Sao Paulo Pesados* lo hace para  $CO_2$  y  $NO_x$ .

**Tabla 4.2 Resultados promedio por campaña**

Cont.	Cat.	Promedio de emisiones				Intervalo de Confianza al 90%			
		Stgo Liv	Mxc Pes	Stgo Pes	SP Pes	Stgo Liv	Mxc Pes	Stgo Pes	SP Pes
CO [g/km]	Liv	0.40	0.82	1.12	1.94	0.09	0.27	0.19	0.42
	Pes.	-	8.14	2.07	3.16	-	3.14	0.40	0.75
	Total	0.40	6.52	1.41	2.59	0.09	2.68	0.17	0.50
CO <sub>2</sub> [g/km]	Liv.	221.36	265.53	232.11	283.74	22.85	42.24	17.59	25.50
	Pes.	-	619.45	405.20	674.15	-	64.58	78.30	79.94
	Total	221.36	539.94	285.11	484.27	22.85	76.89	34.50	65.92
NO <sub>x</sub> [g/km]	Liv.	1.10	2.25	2.22	2.76	0.18	0.34	0.32	0.48
	Pes.	-	6.94	5.14	7.53	-	1.94	1.28	1.38
	Total	1.10	5.91	3.13	5.30	0.18	1.87	0.52	1.16
HC [g/km]	Liv.	0.04	0.08	0.41	0.24	0.02	0.04	0.10	0.03
	Pes.	-	0.98	0.65	0.80	-	0.35	0.23	0.16
	Total	0.04	0.78	0.48	0.55	0.02	0.31	0.10	0.12
MP [g/km]	Liv.	0.01	0.02	0.04	0.07	0.003	0.01	0.01	0.02
	Pes.	-	0.49	0.04	0.23	-	0.29	0.02	0.05
	Total	0.01	0.38	0.04	0.15	0.003	0.23	0.01	0.03

A continuación se presentan los resultados gráficamente, cada uno de los gráficos se muestra con los intervalos de confianza al 90% para los resultados promedio. Se observa que *México D.F. Pesados* presenta la mayor dispersión en la flota Total de todos los contaminantes medidos, lo que se condice con la gran dispersión en los resultados de dicha campaña. Es importante destacar que las emisiones de CO<sub>2</sub> para ambas campañas en Santiago son del orden del 50% - 60% de las emisiones de *México D.F. Pesados*. Esto se explica porque la flota de camiones medidos en Santiago correspondía a un número exacto de camiones Livianos, Medianos y Pesados, mientras que en México D.F. y Sao Paulo la flota no fue tan bien elegida, encontrándonos en promedio con un gran número de camiones Pesados.


**Figura 4.15 Emisiones promedio de CO por campaña**

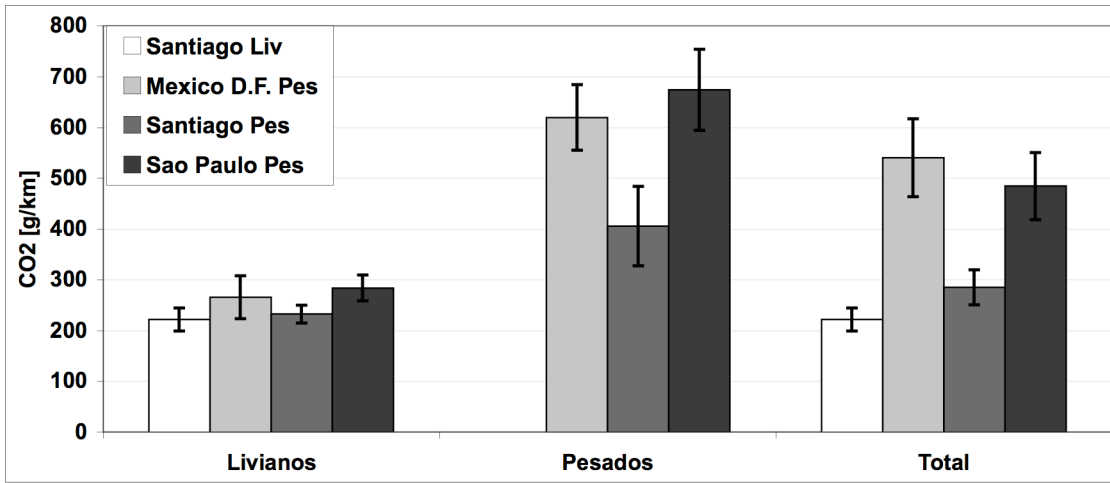


Figura 4.16 Emisiones promedio de CO<sub>2</sub> por campaña

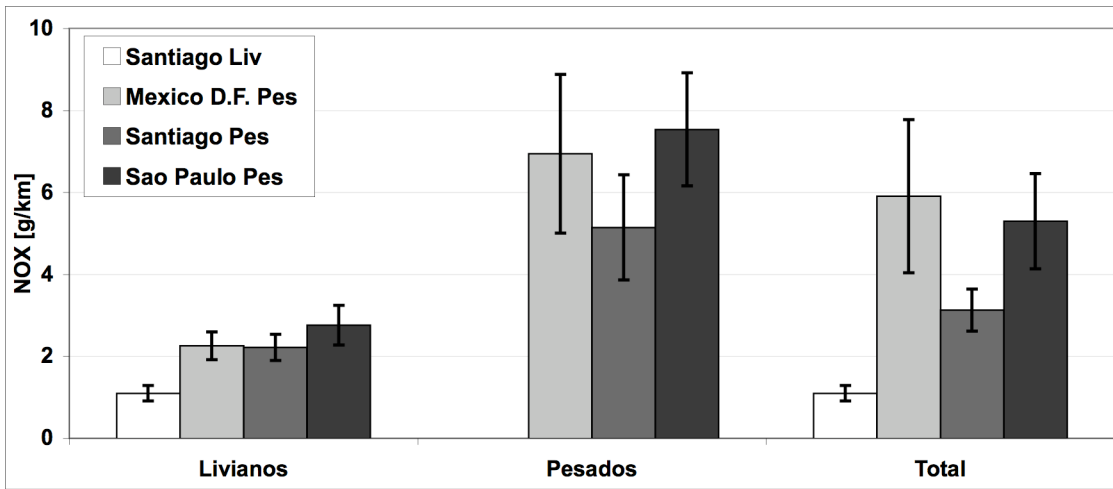


Figura 4.17 Emisiones promedio de NO<sub>x</sub> por campaña

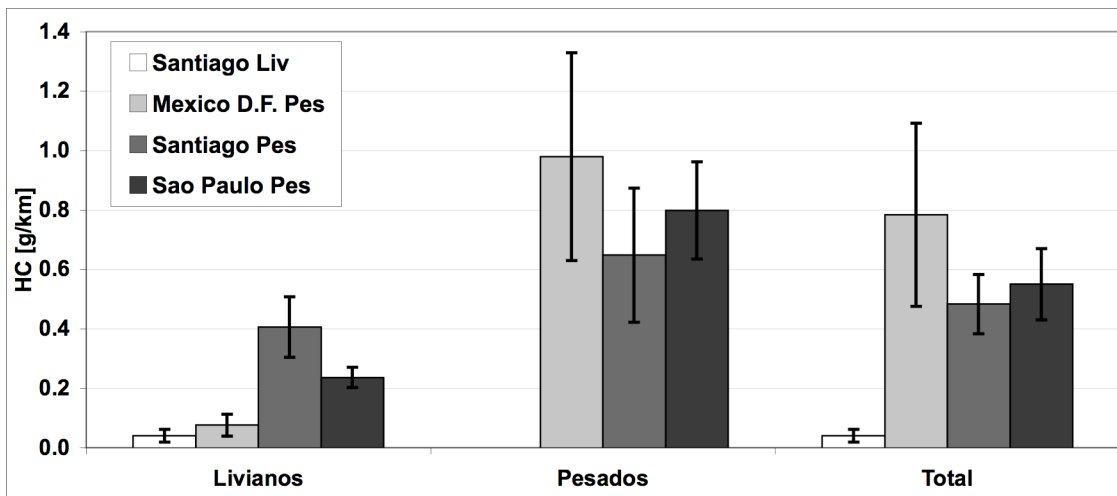
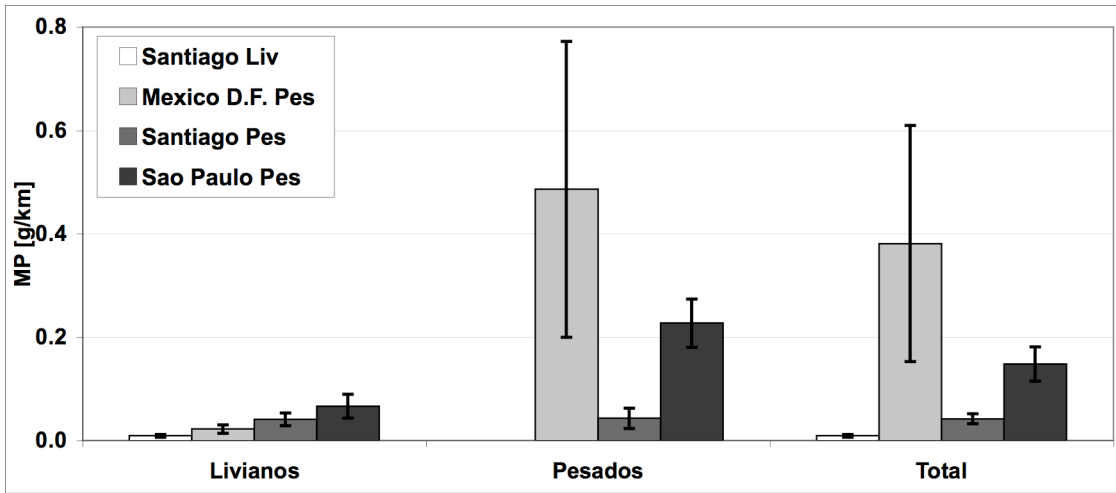


Figura 4.18 Emisiones promedio de HC por campaña



*Figura 4.19 Emisiones promedio de MP por campaña*

## 5 Conclusiones

En el último Capítulo se realiza una conclusión general del trabajo realizado. En el punto 5.1 se discuten las actividades realizadas, obteniéndose la conclusión principal del trabajo, en el punto 5.2 se realiza una comparación de los resultados en gramos kilómetro de este trabajo con resultados obtenidos en otros países fuera de Latinoamérica. Por último, en el punto 5.3 se realizan sugerencias para llevar a cabo una campaña de medición de emisiones exitosa.

### 5.1 Conclusiones y Discusión

#### Discusión

En este trabajo de Tesis se realizaron exitosamente mediciones a 143 vehículos diesel siguiendo una metodología a bordo con equipos de medición portátiles en tres ciudades de Latinoamérica. Los resultados obtenidos en una base segundo a segundo fueron analizados con la metodología de Potencia Específica Vehicular (VSP).

La metodología de Potencia Específica Vehicular permite medir vehículos bajo diferentes condiciones de operación y después comparar los resultados con un ciclo genérico. Esto hace posible medir vehículos en Ruta, es decir se pueden medir vehículos en un circuito urbano sin la necesidad de tener que rehacer el mismo ciclo cada vez, procedimiento tradicional en dinamómetro.

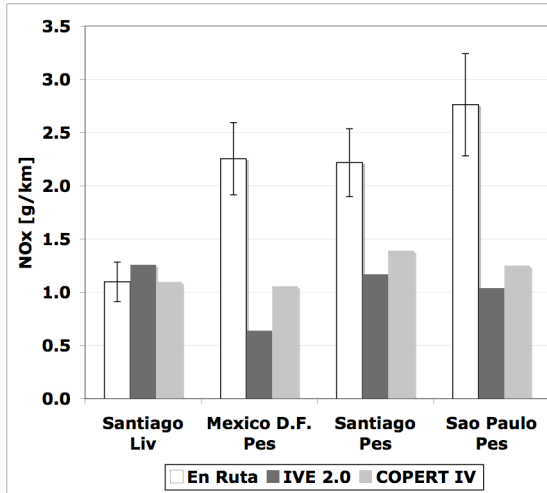
La capacidad de realizar mediciones de vehículos en un circuito urbano permite medir una gran número de vehículos al día comparado con el método de dinamómetro de chasis. Además, el presente método permite reducir en un gran porcentaje los costos asociados a la operación de un laboratorio de emisiones.

Por otro lado, en este trabajo de Tesis se realiza una recopilación de los principales antecedentes de los modelos internacionales más usados en Latinoamérica. Este análisis concluye con una comparación de modelos, comparación no trivial debido a las diferentes metodologías, la cual arrojó que existen divergencias entre ellos. Este hecho deja de manifiesto la necesidad de realizar mediciones a nivel local para realizar mejores inventarios de emisiones para una localidad determinada.

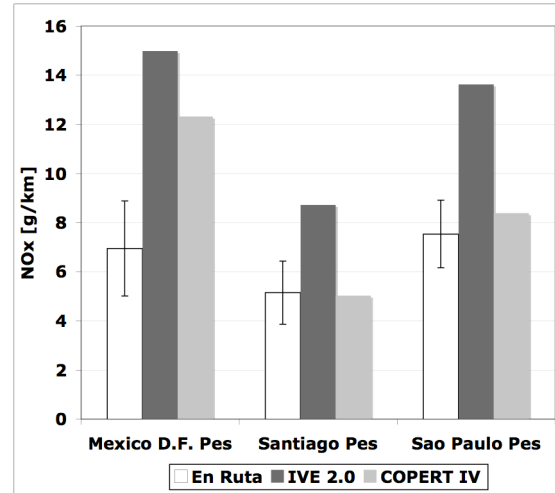
#### Mediciones comparadas con modelos de estimación de emisiones

La Figura 5.1 muestra la comparación de los valores en gramos kilómetro de  $\text{NO}_x$  y MP entre los resultados medidos y los valores estimados por los modelos de emisiones COPERT IV e IVE 2.0 para las flotas analizadas en este trabajo. Se observa que los resultados mantienen el orden de magnitud, sin embargo queda de manifiesto que los valores medidos presentan diferencias respecto de los modelos utilizados. Al analizar los resultados de  $\text{NO}_x$  en la Figura 5.1 a) se observa que ambos modelos tienden a subestimar las emisiones para la categoría livianos, en la Figura b) se observa que el

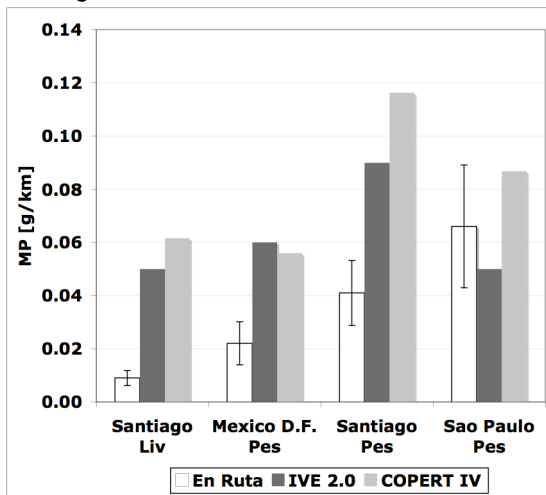
modelo COPERT IV se aproxima a las mediciones. En el caso del MP, para la Figura 5.1 c) se observa que ambos modelos sobrestiman las emisiones para tres de las cuatro campañas categoría livianos y por último en la Figura d) se observa nuevamente que el modelo COPERT IV realiza una estimación cercana al resultado de las mediciones mientras el modelo IVE 2.0 tiende a sobrestimar las emisiones.



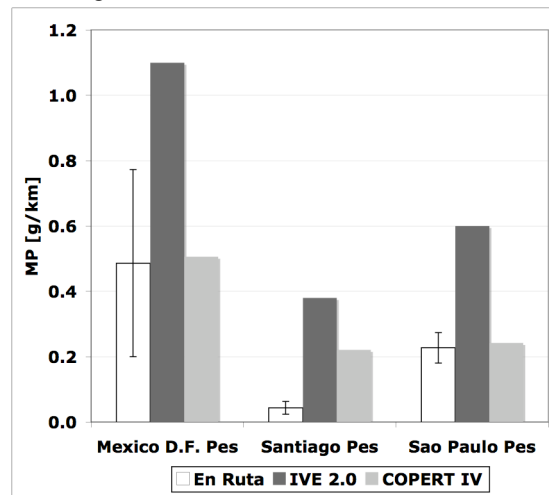
a) Comparación de emisiones de NO<sub>x</sub> en Ruta Categoría Livianos con modelos de emisiones



b) Comparación de emisiones de NO<sub>x</sub> en Ruta Categoría Pesados con modelos de emisiones



c) Comparación de emisiones de MP en Ruta Categoría Livianos con modelos de emisiones



d) Comparación de emisiones de MP en Ruta Categoría Livianos con modelos de emisiones

**Figura 5.1 Comparación de emisiones en Ruta con modelos IVE 2.0 (USA) y COPERT IV (Europa)**

Al realizar una comparación en porcentaje entre los resultados obtenidos bajo los diferentes métodos para las distintas ciudades se observa que en el caso de NO<sub>x</sub> para la categoría livianos el modelo IVE 2.0 subestima las emisiones hasta en un 72% mientras que el modelo COPERT IV las subestima hasta en un 55%. En el caso de la categoría pesados para NO<sub>x</sub> las emisiones son sobrestimadas por el modelo IVE 2.0 hasta en un 216% mientras que el modelo COPERT IV las sobrestima en un 177% como máximo. Las tendencias por lo tanto en NO<sub>x</sub> son a subestimar en la categoría livianos y a sobrestimar en la de pesados. En el caso de MP las emisiones son

sobrestimadas hasta en un 556% por el modelo IVE 2.0 y hasta un 684% por el modelo COPERT IV en la categoría livianos. En el caso de la categoría pesados el modelo IVE 2.0 sobrestima las emisiones en un máximo de 884% y el modelo COPERT IV hasta en un 514%. El resto de los resultados se muestran en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Comparación de emisiones en Ruta con modelos IVE 2.0 (USA) y COPERT IV (Europa) en porcentaje respecto a las emisiones en ruta**

Cont.	Cat.	Medición - Modelo	Stgo Livianos	Mxc Pesados	Stgo Pesados	SP Pesados
NOX	Livianos	En Ruta	100%	100%	100%	100%
		IVE 2.0	115%	28%	53%	38%
		COPERT IV	100%	47%	63%	45%
	Pesados	En Ruta	N/C	100%	100%	100%
		IVE 2.0	N/C	216%	170%	181%
		COPERT IV	N/C	177%	98%	111%
MP	Livianos	En Ruta	100%	100%	100%	100%
		IVE 2.0	556%	273%	220%	76%
		COPERT IV	684%	255%	284%	131%
	Pesados	En Ruta	N/C	100%	100%	100%
		IVE 2.0	N/C	226%	884%	264%
		COPERT IV	N/C	104%	514%	106%

N/C: No corresponde

## Conclusión Principal

La conclusión de mayor importancia obtenida en este trabajo de Tesis corresponde a la aplicación de la metodología de Potencia Especifica Vehicular, la capacidad de realizar mediciones bajo diferentes situaciones de operación y aun así poder comparar los resultados es una poderosa herramienta a la hora de realizar campañas de medición de emisiones.

La Figura 5.2, que representa las emisiones de NO<sub>x</sub> según VSP y Stress del motor, corresponde a un ejemplo de la principal conclusión de este trabajo de Tesis. Esta Figura presenta los resultados de emisiones según la Potencia Especifica de los vehículos analizados. Este tipo de resultados corresponde a la “huella digital” de las emisiones de una flota de vehículos, permitiendo reproducir y por lo tanto estimar las emisiones para diferentes condiciones de operación.

Las tendencias que se muestran en la Figura 2.1 corresponden a resultados medidos en terreno, dependiendo de la campaña analizada las curvas dentro del modelo de emisiones IVE mantienen la misma forma pero puede variar en la pendiente y en magnitud.





*Figura 5.2 Emisiones de NO<sub>x</sub> según VSP – Stress por campaña*

## Resumen

Finalmente, cabe destacar que se realizaron las siguientes tareas:

- Se midieron con éxito 143 vehículos diesel en México D.F. (27 vehículos Pesados), Santiago (38 vehículos Livianos y 38 vehículos Pesados) y en Sao Paulo (40 vehículos Pesados).
- Los resultados se analizaron utilizando la metodología de Potencia Especifica Vehicular.
- Se compararon los resultados obtenidos en las 4 campañas con modelos de emisión internacionales.

Las principales conclusiones son:

- Es posible realizar campañas de medición de emisiones utilizando metodología a Bordo en Latinoamérica prescindiendo de un dinamómetro de chasis y por lo tanto a menor costo.
- Es posible obtener una buena correlación entre una variable medible con métodos no invasivos (GPS) y las emisiones de un vehículo.
- La comparación entre modelos de emisiones y de los modelos con los resultados medidos arroja que los factores de emisión obtenidos presentan variaciones importantes, se concluye que existe la necesidad de realizar campañas de emisión a nivel local.

- La metodología de Potencia Especifica Vehicular se valida como herramienta para una mejor estimación de emisiones vehiculares.

## 5.2 Comparación resultados en Latinoamérica con otras ciudades del mundo

La investigación analizada en el presente trabajo de Tesis se enmarca bajo el constante desarrollo del modelo de emisiones IVE. El proyecto IVE esta enfocado a la estimación de emisiones en países en vías de desarrollo a nivel mundial. A la fecha, se han realizado, a parte de las 3 campañas analizadas en este estudio, otras tres campañas de vehículos diesel, dos de ellas en China (Beijing 2007 y Xi'an 2008) y una en Turquía (Estambul 2006).

En la Figura 5.3 se muestran los resultados de las flotas medidas en las 7 campañas llevadas a cabo por el equipo IVE. Se observa que para todos los contaminantes la campaña de México D.F. presenta las mayores emisiones excepto para NO<sub>x</sub>, donde la campaña de Xi'an presenta un promedio mayor, mientras que la campaña Santiago LD (*Light Duty*) presenta las menores.

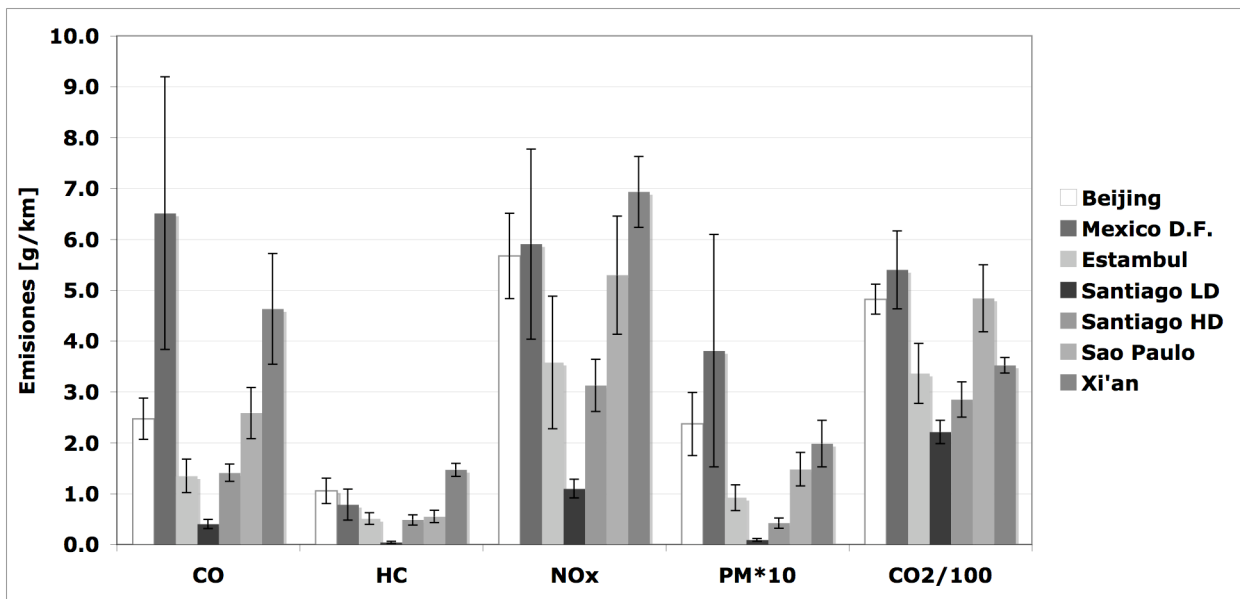


Figura 5.3 Comparación de emisiones de campañas IVE a nivel mundial

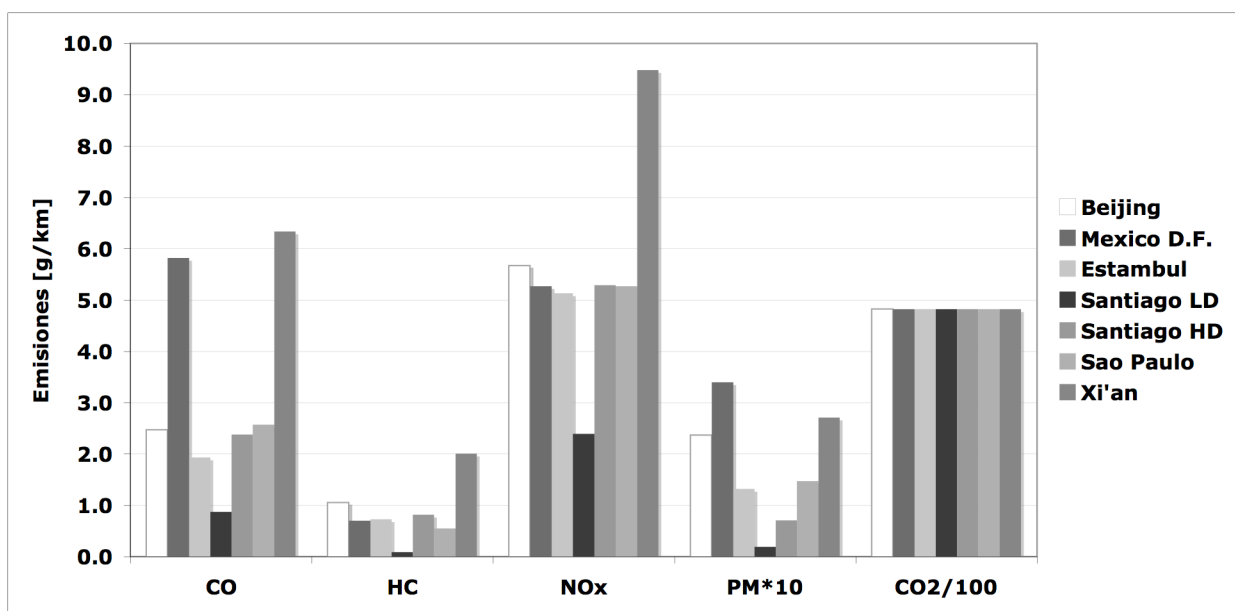
Se debe destacar que este resultado es cierto para las emisiones de CO<sub>2</sub>, como se ha mencionado antes en este trabajo, las emisiones de CO<sub>2</sub> están directamente relacionadas con el consumo de combustible, por lo tanto queda de manifiesto que los vehículos medidos en México D.F. son en promedio mayores en tamaño que en el resto de las campañas.

En la Figura 5.4 se presenta el mismo gráfico pero normalizado, es decir se normalizan las emisiones suponiendo que por cada unidad de combustible quemado o bien cada unidad de CO<sub>2</sub> emitido se emite la misma relación de la Figura 5.3 entre CO<sub>2</sub> y cada

contaminante para cada campaña. Se utilizan en este caso las emisiones de CO<sub>2</sub> de Beijing como referencia.

El resultado de esta normalización muestra que Xi'an es la campaña con mayores emisiones promedio para todos los contaminantes, excepto para MP, donde México D.F. es la campaña que más emite. Las emisiones de CO y de NO<sub>x</sub> se aproximan unas con otras (excepto por Xi'an y México D.F. en CO) demostrando que en las localidades no hay grandes diferencias entre estos contaminantes.

La campaña de vehículos diesel livianos de Santiago se mantiene como la que menos emite en cada uno de los contaminantes, esta conclusión demuestra que las bajas emisiones de estos vehículos no solo se deben al tamaño sino también a la tecnología. En esta campaña se midieron vehículos con tecnologías Euro 3 y Euro 4 con diesel con contenido de azufre menor a 50 ppm.



*Figura 5.4 Comparación de emisiones de campañas IVE a nivel mundial (normalizadas por CO<sub>2</sub>)*

### 5.3 Sugerencias para realizar una campaña de emisiones

Este trabajo de Tesis pretende promover la realización de campañas de medición de emisiones, con el objetivo de generar mejores inventarios de emisiones en Latinoamérica.

Una campaña de emisiones debe tomar en consideración los siguientes puntos.

- Recursos humanos: Se debe considerar un equipo humano con los conocimientos necesarios para llevar a cabo cada parte del proceso. Desde el

manejo de los equipos, la preparación de la campaña hasta el encargado de la búsqueda de los vehículos a medir.

- Recursos Técnicos: Se deben considerar los equipos apropiados para la medición, considerando las categorías a medir, tamaños de motor, diámetros de tubo de escape, carga, contaminantes a medir, etc.
- Recursos económicos: Se deben considerar en el presupuesto todos los costos, traslado de equipos, gases de calibración, centro de operaciones, arriendo de vehículos, pago de honorarios, imponderables, etc.
- Tiempo requerido: Se debe considerar el tiempo necesario para la preparación de la campaña, traslado de equipos y contacto con instituciones locales. Por otro lado se debe considerar el tiempo requerido para medir la muestra deseada dependiendo de la capacidad del equipo humano y técnico, y de los recursos económicos.
- Procedimiento: Se debe diseñar un procedimiento adecuado para el tipo de campaña deseada, considerando tiempo de instalación de equipos, vehículos a medir por día, tiempos de traslados y comidas. A su vez se debe realizar un chequeo continuo de los resultados así como una calibración periódica de los equipos.
- Análisis: Se debe realizar un análisis segundo a segundo de los resultados medidos, así como una alineación de cada uno de los resultados medidos de manera que cada instrumento indique el valor correcto en cada segundo.
- Validación: Se debe realizar una validación de los resultados utilizando la literatura así como resultados obtenidos anteriormente por otros estudios con diferentes equipos.
- Aplicación y Difusión: Una vez obtenidos los resultados por categoría vehicular estos deben ser utilizados en modelos de emisiones de manera de obtener resultados más acordes a la realidad en los inventarios de emisión locales, y una vez realizados se deben difundir de manera que puedan ser utilizados en estudios posteriores.

"This work was carried out with the aid of a grant from the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN II 2017 which is supported by the US National Science Foundation (Grant GEO-0452325)"

## 6 Bibliografía

- [1] EPA (Environmental Protection Agency) (2003). *“User’s guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2. Mobile Source Emission Factor Model”*. EPA420-R-03-010.
- [2] EPA (Environmental Protection Agency) (2005). *“A Roadmap to MOVES2004”*. EPA Report EPA420-S-05-002.
- [3] ISSRC (International Sustainable Systems Research Center) (2008). *“IVE Model users Manual”*. Version 1.2. [www.issrc.org](http://www.issrc.org).
- [4] COPERT III (2000), *“Computer Programme to Calculate Emissions From Transport, Methodology and Emission Factors”*, Draft Report – v2.0, Leonidas Ntziachristos and Zissis Samaras.
- [5] INFRAS (2004), *“Handbuch Emissionsfaktoren Des Strassenverkehrs 2.1, Dokumentation”*, Umwelt Bundes Amt.
- [6] Sectra (2002), *“Actualización del modelo de cálculo de emisiones vehiculares”*, Informe Final, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.
- [7] José Luis Jiménez-Palacios (1999), *“Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing”*, Massachusetts Institute of Technology.
- [8] Todd, M., M. Barth and J. Norbeck (1995). "The Variation of Remote Sensing Emission Measurements with Respect to Vehicle Speed and Acceleration." Fifth CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, California.
- [9] Sjödin, Å., J. Mellqvist and M. Wallin, Lenner, M. (1996). "Recent Developments and Applications of Remote Sensing in Sweden - A European On-Road Fleet Example." Sixth CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, California.
- [10] Popp, P. J., G. A. Bishop and D. H. Stedman (1998a). "On-Road Remote Sensing of Automobile Emissions in the Chicago Area: Year 1." Department of Chemistry and Biochemistry, University of Denver, Report to the Coordinating Research Council CRC E-23-4, Denver, Colorado.
- [11] Walsh, P. A. and C. Kite (1998). "The Influence of Speed and Acceleration on RSD Measurements." Eighth CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, California.

## ANEXO A

Tabla 1. Santiago Livianos

	CO		CO2		NO		THC		PM		
	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	
	0.5	0.4	256.0	222.2	1.29	1.08	0.07	0.06	0.02	0.01	
Overall Mean	39	39	39	39	39	39	28	28	23	23	
Vehicle Number	0	0	96	85	1	1	0	0	0	0	
Standard Deviation	24%	24%	10%	10%	17%	17%	43%	41%	24%	25%	
90% Confidence Interval											
Test	Model	use2	yr	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP
TestStgoLDD001	CHEVROLET COMBO	Euro 1	2000	0.474	0.424	184.789	172.546	0.819	0.785	0.061	0.054
TestStgoLDD002	KIA BESTA	Euro 1	1996	0.551	0.642	297.468	332.741	1.166	1.220	0.257	0.342
TestStgoLDD003	NISSAN L200 KATANA	Euro 4	2007	0.216	0.171	306.941	264.448	1.014	0.795	0.018	0.015
TestStgoLDD004	RENAULT TRAFFIC	Euro 1	1997	0.613	0.521	261.747	223.074	1.187	1.136	0.095	0.074
TestStgoLDD005	MERCEDES BENZ MB140D	Euro 1	1998	0.841	0.765	289.774	261.314	1.161	1.100	0.182	0.154
TestStgoLDD006	CHEVROLET CORSA	Euro 1	2002	0.236	0.219	195.966	186.766	0.752	0.691	0.067	0.061
TestStgoLDD007	CITROEN C1	Euro 4	2007	0.250	0.184	106.534	78.324	0.550	0.391	S/I	S/I
TestStgoLDD008	FIAT STRADA	Euro 3	2005	0.323	0.246	234.537	177.816	0.668	0.544	0.088	0.061
TestStgoLDD009	SUZUKI RUGBY	Euro 1	2001	0.674	0.553	205.374	177.189	0.891	0.772	0.154	0.124
TestStgoLDD010	KIA BESTA	Euro 3	2004	0.066	0.058	331.210	306.114	1.763	1.587	0.004	0.004
TestStgoLDD011	KIA BESTA	Euro 3	2003	0.148	0.130	343.716	312.560	1.453	1.227	0.007	0.007
TestStgoLDD012	RENAULT TRAFFIC	Euro 1	1998	1.179	0.696	308.602	178.410	1.576	1.167	0.457	0.222
TestStgoLDD013	CITROEN C3	Euro 3	2005	0.294	0.197	168.674	145.815	1.263	0.847	0.006	0.006
TestStgoLDD014	CHEVROLET SILVERADO	Euro 1	1994	1.421	1.100	502.261	446.138	3.697	3.167	0.051	0.043
TestStgoLDD015	CHEVROLET F CHEVY	Euro 1	2004	0.248	0.210	181.805	155.560	0.723	0.618	0.084	0.067
TestStgoLDD016	SSANGYONG ACTYON	Euro 4	2007	0.150	0.089	272.792	239.144	1.442	1.158	0.017	0.015
TestStgoLDD017	CITROEN XSARA	Euro 1	2004	0.008	0.010	214.678	213.789	1.118	1.160	0.007	0.007
TestStgoLDD018	CHEVROLET COMBO	Euro 3	2006	0.835	0.855	179.601	151.691	1.690	1.362	0.012	0.010
TestStgoLDD019	CHEVROLET CORSA	Euro 1	2002	0.725	0.635	196.060	178.962	1.443	1.220	0.132	0.118
TestStgoLDD020	FIAT STRADA	Euro 1	2002	0.434	0.368	197.252	179.715	0.731	0.665	0.052	0.045
TestStgoLDD021	HYUNDAI GALLOPER	Euro 1	2000	0.957	0.779	333.814	275.238	1.395	1.223	0.133	0.100
TestStgoLDD022	DODGE RAM	Euro 3	2006	1.304	1.037	441.814	425.293	3.411	3.083	S/I	S/I
TestStgoLDD023	SUZUKI VITARA	Euro 1	2001	1.002	0.975	214.270	205.601	0.878	0.927	S/I	S/I
TestStgoLDD024	RENAULT CLIO	Euro 3	2005	0.208	0.154	180.501	144.793	1.004	0.767	0.009	0.007
TestStgoLDD025	CITROEN C3	Euro 4	2006	0.295	0.208	195.177	138.532	1.049	0.801	0.020	0.013
TestStgoLDD026	PEUGEOT BOXER	Euro 4	2006	0.098	0.082	257.844	226.455	1.334	1.101	0.053	0.045
TestStgoLDD027	PEUGEOT 206	Euro 3	2005	0.099	0.075	157.076	139.233	0.910	0.688	0.001	0.001
TestStgoLDD028	PEUGEOT 206	Euro 4	2006	0.118	0.075	169.457	150.506	1.099	0.767	0.001	0.001
TestStgoLDD029	SUZUKI XL7	Euro 4	2006	0.099	0.080	257.579	214.386	0.965	0.810	0.008	0.006
TestStgoLDD030	HYUNDAI ACCENT	Euro 1	2004	0.197	0.185	179.686	164.975	0.798	0.818	0.010	0.009
TestStgoLDD031	TOYOTA HILUX	Euro 4	2007	0.411	0.347	272.739	253.021	1.228	1.031	S/I	S/I
TestStgoLDD032	SSANGYONG KORANDO	Euro 3	2006	0.272	0.215	278.692	241.501	0.663	0.532	0.035	0.029
TestStgoLDD033	KIA BESTA	Euro 3	2004	1.402	1.128	314.344	273.956	1.162	0.922	S/I	S/I
TestStgoLDD034	MAZDA B2500	Euro 3	2005	0.018	0.014	332.255	268.525	0.845	0.659	S/I	S/I
TestStgoLDD035	HYUNDAI ACCENT	Euro 3	2005	0.191	0.131	208.695	161.853	1.490	1.015	S/I	S/I
TestStgoLDD036	CHEVROLET CORSA	Euro 1	2003	0.077	0.064	208.435	175.402	0.765	0.662	S/I	S/I
TestStgoLDD037	CITROEN BERLINGO	Euro 3	2006	0.028	0.027	236.406	213.810	0.679	0.556	S/I	S/I
TestStgoLDD038	PEUGEOT 206	Euro 1	2003	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
TestStgoLDD039	PEUGEOT 206	Euro 1	2004	0.086	0.068	175.995	157.708	1.061	0.812	S/I	S/I
TestStgoLDD040	DODGE RAM	Euro 4	2006	1.017	0.737	589.511	452.017	4.459	3.523	S/I	S/I



Tabla 2. México D.F. Pesados

	CO		CO2		NO		THC		PM	
	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km
Overall Mean	14.0	7.4	806.9	560.0	11.42	8.91	1.47	0.93	0.63	0.41
Vehicle Number	26	26	25	26	26	26	25	26	22	22
Standard Deviation	19	8	357	230	12	6	1	1	1	1
90% Confidence Interval	44%	35%	15%	13%	34%	20%	33%	32%	54%	58%

Test	Model	sz2	yr	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP
1	Dina Rabon	Truck	1977	5.095	3.433	580.683	385.149	6.436	6.556	2.727	1.423	S/I	S/I
2	Nissan frontier	Light Duty Truck	2006	1.047	0.890	233.173	200.183	2.284	2.823	0.137	0.094	0.008	0.007
3	Ford	Truck	1983	87.308	10.760	S/I	595.900	63.575	21.232	1.387	3.264	0.681	0.084
4	MBZ	Bus	1994	10.360	6.427	875.858	606.828	8.774	7.220	1.387	0.817	0.375	0.230
5	MBZ	Bus	1995	22.458	11.542	1093.193	568.039	11.757	8.753	2.154	0.879	S/I	S/I
6	International	Bus	2004	4.770	3.847	874.573	701.748	9.268	8.510	0.333	0.246	0.071	0.057
7	MBZ	Light Duty Truck	2005	0.742	0.601	398.289	320.064	2.685	2.502	0.105	0.076	0.038	0.030
8	MBZ	Bus	1995	4.094	3.103	746.372	607.010	10.442	9.226	1.071	0.815	S/I	S/I
9	Freightliner	Truck	2003	6.690	3.935	721.637	464.415	8.959	7.883	0.671	0.351	0.082	0.048
11	Nissan frontier	Light Duty Truck	2006	1.951	1.286	351.449	241.691	3.451	2.777	0.225	0.133	0.043	0.027
12	Nissan frontier	Light Duty Truck	2006	0.671	0.399	308.967	179.949	3.110	2.481	0.232	0.110	S/I	S/I
13	MBZ	Light Duty Truck	2004	0.884	0.737	347.058	280.920	3.261	3.380	0.087	0.061	0.015	0.013
14	Navistar	Truck	1998	4.920	3.167	1051.114	719.882	11.643	9.963	0.731	0.435	0.173	0.112
15	MBZ	Bus	1992	47.584	30.947	1496.821	969.652	24.353	21.008	4.847	2.592	0.560	0.363
16	Freightliner	Truck	2004	4.939	3.253	676.719	469.732	7.458	6.874	0.508	0.299	0.087	0.057
17	MBZ	Light Duty Truck	2005	0.670	0.456	306.561	247.221	2.483	2.171	0.007	0.005	0.020	0.014
18	MBZ	Truck	1992	5.699	3.196	795.378	505.095	10.174	7.943	1.785	0.964	0.294	0.166
19	MBZ	Bus	1992	8.483	5.485	883.117	561.001	11.407	11.384	1.678	0.823	0.158	0.103
20	Dodge-Cummins	Truck	1997	18.964	12.829	1188.746	828.235	11.155	9.725	2.709	1.658	3.678	2.505
21	Perkins	Truck	1994	19.267	13.914	1245.926	878.307	18.046	17.181	3.994	2.404	2.921	2.110
22	MBZ	Truck	1994	26.021	18.736	1026.814	757.130	8.643	8.162	1.406	0.883	1.196	0.869
23	FL60	Truck	2003	5.832	4.021	700.501	494.981	8.493	7.109	0.491	0.305	0.087	0.060
24	Perkins	Truck	1993	31.809	19.395	1301.192	823.104	15.528	12.199	1.048	0.581	1.843	1.119
25	Ford	Truck	1974	33.278	23.245	1330.828	946.151	18.077	20.545	5.263	2.809	0.946	0.653
26	Cummins	Truck	1991	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
27	MBZ	Truck	1992	5.953	3.526	891.084	597.040	8.317	6.922	1.543	0.864	0.367	0.218
10a	MBZ	Truck	1992	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
10b	MBZ	Truck	1992	4.786	3.959	746.152	610.387	7.149	7.207	1.709	1.214	0.305	0.250

Tabla 3. Santiago Pesados

	CO		CO2		NO		THC		PM	
	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km	Actual gm/km	FTP gm/km
OverallMean	1.3	0.8	308.8	306.5	3.13	2.12	0.40	0.45	0.05	0.03
Vehicle Number	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Standard Deviation	1	1	130	123	2	2	0	0	0	0
90% Confidence Interval	21%	22%	12%	11%	20%	24%	22%	21%	27%	29%

Test	Model	use	yr	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP
TestStgHDD001	Isuzu NKR	Euro 0	1993	1.546	1.191	211.498	232.399	1.341	0.985	0.539	0.694	0.022	0.017
TestStgHDD002	Mercedes Benz L 1420	Euro 2	1997	1.380	0.467	482.201	462.607	7.375	4.358	0.435	0.484	0.017	0.006
TestStgHDD003	Ford Cargo 814	Euro 2	1998	1.082	0.583	292.356	291.936	6.512	4.425	0.216	0.237	0.135	0.072
TestStgHDD004	Chevrolet NKR 69	Euro 2	2002	0.529	0.237	251.736	241.591	1.138	0.642	0.064	0.072	0.006	0.003
TestStgHDD005	Hyundai Porter AU	Euro 2	2002	1.047	0.489	207.569	207.469	0.671	0.406	0.045	0.051	0.019	0.009
TestStgHDD006	KIA Frontier super 2.7	Euro 2	2003	0.048	0.019	217.537	213.577	1.510	0.843	0.025	0.031	0.170	0.067
TestStgHDD007	Mercedes Benz OM 1728 ELECTR.	Euro 3	2005	1.076	0.332	366.651	338.780	4.277	2.702	0.095	0.093	0.018	0.005
TestStgHDD008	Chevrolet NPR 66	Euro 2	1998	1.355	1.323	245.849	258.434	1.788	1.657	0.826	0.875	0.032	0.032
TestStgHDD009	HINO Econo Diesel GD 172SA	Euro 0	1994	4.112	1.717	404.504	405.461	4.937	3.093	1.014	1.152	0.033	0.014
TestStgHDD010	KIA 3600	Euro 1	1996	1.231	1.001	259.527	276.032	3.143	2.205	0.358	0.433	0.002	0.002
TestStgHDD011	Mercedes Benz OM 1620-51	Euro 2	1997	2.255	1.275	418.763	417.289	3.816	2.480	0.777	0.883	0.055	0.030
TestStgHDD012	Hyundai MIGHTY	Euro 2	1997	0.791	0.714	216.075	230.348	2.015	1.538	0.588	0.706	0.020	0.018
TestStgHDD013	Chevrolet NPR	Euro 3	2000	0.880	0.357	301.788	283.811	2.592	1.493	0.363	0.392	0.009	0.004
TestStgHDD014	Toyota DYNA	Euro 0	1986	0.856	0.429	238.626	231.179	2.730	1.605	0.405	0.464	0.211	0.106
TestStgHDD015	Scania 124 LE	Euro 3	2006	0.478	0.171	237.373	232.272	3.431	2.130	0.320	0.349	0.034	0.012
TestStgHDD016	Mercedes Benz 1617 TOLVA	Euro 0	1996	0.828	0.414	316.141	303.641	3.389	2.053	0.619	0.678	0.035	0.018
TestStgHDD017	Chevrolet KODIAK 211	Euro 2	1998	4.461	1.701	383.907	383.813	3.999	2.624	0.420	0.459	0.089	0.034
TestStgHDD018	Mercedes Benz 2235	Euro 0	1988	2.456	2.566	791.404	788.054	10.608	10.351	1.433	1.562	0.125	0.130
TestStgHDD019	Isuzu NPR	Euro 0	1989	3.073	1.920	216.223	227.397	1.676	1.053	0.496	0.634	0.131	0.082
TestStgHDD020	Hyundai Porter H100	Euro 1	1997	1.071	0.920	200.222	216.583	0.878	0.676	0.145	0.177	0.036	0.031
TestStgHDD021	KIA TITAN K3500	Euro 0	1993	2.187	1.703	242.889	270.056	2.708	1.980	0.521	0.680	0.154	0.119
TestStgHDD022	Volkswagen 8120	Euro 3	1999	0.669	0.386	287.723	294.790	2.412	1.603	0.231	0.270	0.020	0.011
TestStgHDD023	KIA K3600S	Euro 1	1997	0.860	0.671	271.465	284.870	3.517	2.431	0.259	0.314	0.020	0.015
TestStgHDD024	KIA K2400	Euro 1	1996	0.793	0.578	204.406	206.861	1.578	1.052	0.220	0.251	0.012	0.009
TestStgHDD025	Hyundai Mighty HD 72	Euro 3	2005	0.720	0.294	241.951	224.516	1.907	1.071	0.238	0.251	0.010	0.004
TestStgHDD026	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil
TestStgHDD027	KIA K2400	Euro 1	1994	0.567	0.465	144.558	159.216	0.676	0.487	0.173	0.220	0.047	0.039
TestStgHDD028	KIA* Frontier II 2.5	Euro 3	2006	0.100	0.029	234.439	204.398	0.672	0.354	0.025	0.025	0.001	0.000
TestStgHDD029	Hyundai MIGHTY	Euro 1	1996	2.426	1.420	304.623	304.860	2.473	1.543	0.388	0.454	0.133	0.078
TestStgHDD030	Hyundai MIGHTY	Euro 1	1996	1.128	0.852	274.216	276.178	2.917	1.962	0.532	0.605	0.022	0.017
TestStgHDD031	Freightliner FL80	Euro 1	1997	1.458	0.730	527.275	512.242	4.561	2.812	0.688	0.749	0.074	0.037
TestStgHDD032	Mercedes Benz Tracto OM 2233	Euro 0	1987	1.665	0.635	409.283	400.391	6.034	3.883	0.987	1.043	0.040	0.015
TestStgHDD033	Volvo FH12	Euro 1	1997	1.825	0.671	517.855	477.014	6.972	4.487	0.330	0.316	0.038	0.014
TestStgHDD034	KIA PORTER 2.5	Euro 3	2005	0.037	0.011	196.883	196.374	0.767	0.472	0.025	0.029	0.035	0.010
TestStgHDD035	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil
TestStgHDD036	KIA K2400	Euro 1	1996	0.876	0.655	204.708	206.196	1.566	1.061	0.210	0.233	0.101	0.076
TestStgHDD037	KIA Frontier II 2.5	Euro 3	2006	0.182	0.213	294.613	319.204	0.621	0.646	0.033	0.043	0.053	0.063
TestStgHDD038	MAN	Euro 3	2006	0.823	0.235	501.690	455.777	5.396	3.170	0.372	0.365	0.016	0.005

Tabla 4. Sao Paulo Pesados

				CO		CO2		NO		THC		PM	
				Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP
				gm/km	gm/km	gm/km	gm/km	gm/km	gm/km	gm/km	gm/km	gm/km	gm/km
<b>Overall Mean</b>				<b>3.5</b>	<b>2.8</b>	<b>619.5</b>	<b>477.7</b>	<b>6.95</b>	<b>6.61</b>	<b>0.86</b>	<b>0.57</b>	<b>0.19</b>	<b>0.15</b>
<b>Vehicle Number</b>				41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
<b>Standard Deviation</b>				3	2	359	251	5	4	1	0	0	0
<b>90% Confidence Interval</b>				18%	18%	15%	13%	17%	17%	22%	20%	21%	22%

Test	Model	use2	yr	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP	Actual	FTP
1	MB OF1620	1	1995	3.606	2.758	1016.441	766.882	14.559	12.633	1.356	0.954	0.376	0.319
2	MB OF1721	2	1998	2.581	1.878	983.572	697.952	10.390	6.684	1.229	0.796	0.126	0.089
3	MB OF1721	2	2004	4.146	3.210	1124.920	841.056	13.443	12.707	1.045	0.695	0.224	0.171
4	SCANIA L94	2	2004	2.675	1.957	1711.362	1232.105	14.218	12.724	1.402	0.880	0.217	0.158
5	VW 17260 EOT	3	2004	6.487	5.123	1082.218	838.622	13.357	12.973	0.691	0.481	0.345	0.272
6	MB OF1620	2	1997	6.726	5.154	908.360	678.608	16.469	15.148	0.956	0.640	0.234	0.177
7	VW 172400T	2	2003	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
8	MB OF1721	2	1998	3.292	2.552	945.677	729.817	15.121	14.763	1.015	0.691	0.151	0.117
9	MB OF1620	1	1996	2.826	2.090	871.870	661.652	13.225	12.274	1.146	0.793	0.059	0.043
10	MB OF1722	3	2005	3.482	2.727	820.759	626.378	6.738	6.625	0.442	0.299	0.071	0.055
11	VW OD17210	2	2003	4.912	3.762	1088.489	806.537	8.913	9.003	0.829	0.523	0.373	0.283
12	MB OF1721	2	2000	13.130	10.525	901.156	726.544	10.176	10.026	0.153	0.114	0.253	0.202
13	VW 13150	2	2003	2.327	1.697	777.884	554.009	6.455	6.153	0.737	0.448	0.124	0.091
14	IVECO 5013	3	2005	1.794	1.389	343.268	260.464	3.744	3.616	0.383	0.252	0.056	0.043
15	GM 4HF1	3	2001	3.359	2.513	505.529	393.319	4.071	3.902	1.917	1.279	0.330	0.246
16	MB 710	2	2004	1.758	1.920	417.148	444.495	3.762	4.315	0.690	0.705	0.519	0.562
17	MB 710	2	2003	2.446	1.898	331.039	249.858	3.194	3.088	0.937	0.617	0.077	0.060
18	MB1214	1	1998	4.034	3.076	703.108	520.811	8.472	8.657	1.298	0.812	0.327	0.249
19	VW13150	2	2003	5.349	3.737	839.682	574.441	6.182	5.478	1.031	0.612	0.375	0.261
20	MB710	2	2001	4.541	3.476	479.328	372.235	4.044	4.424	2.177	1.369	0.487	0.376
21	IVECO 5013	3	2005	1.607	1.332	307.728	247.153	3.548	3.828	0.380	0.266	0.162	0.134
22	MB 715C	3	2004	4.429	3.463	434.551	330.450	3.589	3.669	0.477	0.312	0.089	0.070
23	MB710	2	2002	1.916	1.466	400.660	299.596	4.456	4.484	0.664	0.423	0.076	0.058
24	SCANIA93H	1	1997	10.349	7.547	1235.806	881.844	14.045	13.537	3.180	1.933	0.369	0.268
25	MB1214C	1	1997	2.458	1.888	562.457	426.561	6.647	6.661	1.060	0.692	0.146	0.112
26	ASIA AM715	0	1995	1.410	1.157	268.914	215.987	1.353	1.438	0.398	0.275	0.131	0.108
27	MB L1313	0	1975	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
28	FORD	0	1993	2.385	1.809	378.797	281.474	6.966	6.898	1.572	0.986	0.134	0.102
30	FIAT DUCATO	3	2005	2.352	1.829	308.029	233.780	4.713	4.734	0.575	0.375	0.054	0.042
31	MB 0500M	2	2003	4.516	3.426	1085.762	796.355	13.288	12.818	0.831	0.533	0.235	0.177
32	MB L1418	0	1990	8.087	6.011	838.978	607.841	13.880	13.823	3.459	2.119	0.623	0.461
33	MB 310D	1	1998	1.523	1.090	298.617	208.970	2.182	1.880	0.650	0.404	0.177	0.126
34	FIAT DUCATO	2	1998	0.924	0.627	293.239	208.467	5.320	4.724	0.391	0.233	0.047	0.032
35	CHEVROLET S10	1	1997	1.012	0.695	286.308	212.837	2.760	2.291	0.419	0.278	0.122	0.084
36	MB 311 CDI	3	2003	1.612	1.558	266.957	272.907	2.292	2.162	0.160	0.160	0.062	0.058
38	MB 180D	1	1996	0.963	0.908	312.133	291.371	1.387	1.473	0.203	0.174	0.000	0.000
39	MB 312D	1	2000	5.005	4.132	338.971	317.923	2.963	2.561	0.304	0.289	0.000	0.000
40	MB 310D	1	1998	2.845	2.199	359.051	303.051	6.173	4.847	0.157	0.131	0.000	0.000
29a	RENAULT DCI120	2	2005	3.534	3.096	247.507	212.843	2.151	2.031	0.327	0.267	0.100	0.087
29b	RENAULT DCI120	2	2005	1.705	1.923	185.404	202.741	1.570	1.954	0.193	0.200	0.048	0.053
37a	MB 310D	1	1997	2.556	2.795	350.751	404.720	2.745	2.829	0.170	0.206	0.129	0.140
37b	MB 310D	1	1997	2.014	1.464	375.881	308.498	3.089	2.371	0.159	0.130	0.052	0.037
37c	MB 310D	1	1997	2.390	1.942	411.483	356.492	3.262	2.848	0.174	0.145	0.235	0.190