



MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE LA CIUDAD DE AMBATO (ECUADOR) MEDIANTE COPERT 4

Autor: D. John Jairo Ceballos Marcillo
Tutor: D. Francisco Vicente Tinaut Fluixá

Valladolid, 2 Febrero de 2016

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica
Paseo del Cauce 59
47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209
47151 Boecillo (Valladolid)
España



RESUMEN

El objetivo general de este TFM es analizar y simular el consumo de combustible y emisiones de la flota de vehículos de transporte público a partir de información de circulación bajo configuraciones de relieve y orografía específica de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, en la República de Ecuador, mediante la utilización del Software COPERT 4

Para alcanzar ese objetivo el presente Trabajo Fin de Máster (TFM) pretende hacer una revisión de comprensión metodológica del modelo empleado por el software COPERT 4 para simulación de consumo de combustible y emisiones contaminantes (gaseosas, material particulado, compuestos de carbón, metales pesados) para autobuses tipo, bajo patrones de manejo urbano, diferenciados de acuerdo a diferentes legislaciones de control de tipo Euro presentes en la flota de transporte público de la ciudad de Ambato, en la República de Ecuador.

Inicialmente, el estudio parte del señalamiento de un caso modelo inicial, donde se aplica el cálculo informático para un vehículo en un recorrido de un kilómetro, con lo que se lograría el entendimiento inicial requerido del sistema, así como la evolución de su comportamiento expuesto a variaciones de varios parámetros de afección, como la variación de la inclinación de la pendiente, la cantidad de carga soportada y el cambio de la velocidad media del recorrido.

Posterior al caso modelo inicial, se procede a la realización del ajuste de la metodología para aplicarlo al caso específico de la ciudad de Ambato, cuya estructura está compuesta por dos enfoques principales: una configuración de recorrido plano sin aplicación de la orografía característica de la urbe, y una conformación que incluya la orografía irregular partiendo de porcentajes de afección dentro del recorrido tipo que satisfaga los requerimientos característicos de un circuito general de transporte público local.

A lo largo del proyecto se van detallando todos los valores de entrada, tanto de información propia del combustible, de tipo meteorológica, así como recorrido y población de la flota, velocidad media del recorrido, y demás configuraciones válidas dentro de las estimaciones propias de autobuses diésel. Al mantener esta estructura, el presente proyecto puede ser considerado de forma indirecta como un manual de desarrollo para aplicación en investigaciones posteriores de similares características.

Se concluye el desarrollo con la presentación de proyecciones de emisión en escenarios hipotéticos de actualización o reforma completa de la flota hacia tecnologías con aplicación de legislaciones de control con una mayor eficiencia, pudiendo así apoyar la toma de decisiones políticas iniciales por parte de los gobiernos locales hacia la transformación de la matriz de transporte eficiente y con menor índice de contaminación medioambiental.

PALABRAS CLAVE: COPERT, Transporte Público, Consumo de Combustible, Emisiones Contaminantes.

SIMULATION OF FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS OF THE PUBLIC TRANSPORTATION FLEET IN AMBATO (ECUADOR) WITH COPERT 4.

ABSTRACT

The overall objective of this TFM is to analyze and simulate fuel consumption and emissions of the fleet of public transport vehicles from information on specific configurations of relief and topography of the city of Ambato, Tungurahua Province, Republic of Ecuador, by using the Software COPERT 4

In order to achieve that objective, this Master's Thesis seeks to do a methodological comprehension revision of the model used by COPERT 4 software for the simulation of fuel consumption and emissions (gaseous, particulate matter, carbon compounds and heavy metals) of typical buses under urban driving patterns, as well as different Euro type emissions control standards allocated inside the public transportation fleet from Ambato, Republic of Ecuador.

At the beginning, the investigation starts from the assignment of an initial model case that represents the earliest computer calculations for only one vehicle at one kilometer of road. This initial model case is necessary in order to the required COPERT system comprehension, as well as the understanding of the assorted behavior experimented from the change of road inclination, vehicle supported passenger load and the average range of velocity for the vehicle.

From this initial procedure, the investigation proceeds to the methodological adjustment of the COPERT model to apply in the specific case of Ambato. This second chapter structure is composed from two main perspectives: one plain road configuration analysis without the influence of the typical urban topography, and another configuration that includes this irregular relief obtained from affection percentages of road inclination, satisfying the main requirements of the local public transportation circuit.

Through the whole development of this project are detailed all the input data from fuel characteristics, meteorological information, along with the fleet population, mean mileage, road average velocity and other diesel bus configurations. With this structure the master's thesis can be used as a guidebook for the development of subsequent investigations with similar features.

In the final chapter the future hypothetical effects of emissions in two different scenarios are presented: the update of one half of the fleet or the complete change of the entire fleet to technologies with highest efficiency control standards, providing the starting support for initial political decisions from local governments towards the transformation of a superb transportation matrix with less environment contamination levels.

KEYWORDS: COPERT, Public Transportation, Fuel Consumption, Pollution Emissions.

SIMULACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE LA CIUDAD DE AMBATO (ECUADOR) MEDIANTE COPERT 4

RESUMEN EJECUTIVO

El **objetivo general de este TFM** es analizar y simular el consumo de combustible y emisiones de la flota de vehículos de transporte público a partir de información de circulación bajo configuraciones de relieve y orografía específica de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, en la República de Ecuador, mediante la utilización del Software COPERT 4.

En primer lugar se hace una revisión de comprensión metodológica del modelo empleado por el software COPERT 4 para simulación de consumo de combustible y emisiones contaminantes (gaseosas, material particulado, compuestos de carbón, metales pesados) para autobuses tipo, bajo patrones de manejo urbano, diferenciados de acuerdo a diferentes legislaciones de control de tipo Euro presentes en la flota de transporte público de la ciudad de Ambato.

Se presentan una serie de antecedentes y justificación de la necesidad prioritaria de realización de la simulación del consumo de combustible y emisiones de vehículos de transporte público de Ambato, en base a la finalidad de dar un soporte inicial a la realización de una serie de políticas de control y regulación a nivel local que propongan una agenda ambiental de manejo por parte del Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Ambato (GADMA), cuyos ejes estratégicos son:

- Reducción de la contaminación ambiental.
- Consolidación de la autoridad para la prevención y el control de la contaminación y fortalecimiento de la institucionalidad ambiental.
- Fomento de la educación ambiental y la participación ciudadana.
- Reducción de las emisiones contaminantes, de fuentes estáticas y móviles.
- Optimización de las capacidades de conformación en políticas ambientales.
- Información y registros estimados de evolución de los sistemas originarios de la contaminación.

COPERT 4, es una herramienta informática de utilidad práctica dentro del sector del transporte en carretera, ya que permite el **cálculo del consumo de combustible y las emisiones de CO₂** asociadas, y el cálculo **de emisiones de todos los contaminantes regulados** (CO, NO_x, COV y PM) emitidos por diferentes categorías de vehículos (coches de pasajeros, vehículos ligeros y pesados, ciclomotores y motocicletas) además de estimar las **emisiones de otros compuestos** como CH₄, N₂O, NH₃, SO₂, metales pesados, HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y COP (contaminantes orgánicos persistentes).

El programa informático COPERT 4 parte de un enfoque de tipología “top-down”, el mismo que ofrece un volumen general de consumos o emisiones para todo el conjunto de la actividad del transporte o para alguno de sus modos, dados mediante regresiones en la que las variables se alimentan de estadísticas ya elaboradas. Con base en la premisa anterior, el software estima el total de emisiones mediante la combinación de información técnica específica (ej. Factores de emisión) conjuntamente con los datos de actividad de la flota de transporte (ej. Total de kilómetros recorridos).

COPERT 4 específicamente en el campo de previsión de estimaciones para el sector de autobuses toma en cuenta una serie de categorías de estratificación específica de las flotas:

- Según **tipo de combustible** (Diésel, CNG, Biodiésel)
- Según **forma estructural** (Midi <= 15 tons, estándar 15 tons, articulados > 15 tons, entre otros)
- Según **tipo de tecnología de control de emisiones** (convencional, Euro I, II, III, IV, V, VI).

Para la estimación de emisiones COPERT además utiliza una **formulación de patrones de conducción dependiente de la velocidad**, desarrollado de forma empírica a través de análisis y comprobación estadística e múltiples tests reales mundiales bajo diferentes condiciones de manejo.

Estos patrones de conducción son tres: conducción urbana (velocidad < 50 km/h), conducción rural (velocidad entre 50 – 100 km/h) y conducción en autopista (100 – 120 km/h).

Una vez tomadas en cuenta características de la flota, forma estructural, tipo de tecnología de control de emisión, además de los patrones de conducción anteriormente mencionados, COPERT establece el cálculo final mediante la suma de tres fuentes distintas de emisiones: aquellas obtenidas cuando el motor se encuentra en una fase térmica estabilizada (hot emisión), aquellas recabadas durante la fase de calentamiento del sistema (cold emissions) y finalmente las obtenidas por evaporación del combustible (fuel evaporative emissions) según se indica en la siguiente ecuación:

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD} + E_{EVAP}$$

Cabe resaltar que, para el cálculo de emisiones en el grupo de autobuses, así como en la agrupación de vehículos de carga pesada tanto gasolina como diésel, COPERT 4 toma en cuenta principalmente el **cálculo de las emisiones en caliente**, cuyos factores de emisión provienen de la extrapolación de resultados obtenidos para los vehículos de menor tamaño, diferenciando solamente para los tres patrones de conducción: urbano, rural y en autovía.

Desde un punto de vista práctico utilitario, el estudio parte del señalamiento de **un caso modelo**, donde se aplica el cálculo informático para **un vehículo en un recorrido de un kilómetro**, con lo que se lograría el entendimiento inicial requerido del sistema, así como la evolución de su comportamiento expuesto a variaciones de varios parámetros de afección, como la variación de la inclinación de la **pendiente**, la **carga de pasajeros** soportada y la **velocidad media del recorrido**.

Posterior al caso modelo inicial, se procede a la realización del ajuste de la metodología para aplicarlo al **caso específico de la ciudad de Ambato**, cuya estructura está compuesta por dos enfoques principales: una **primera configuración ideal** de recorrido plano sin aplicación de la orografía característica de la urbe, y una **configuración real** que incluya la orografía irregular partiendo de porcentajes de afección dentro del recorrido tipo que satisfaga los requerimientos característicos de un circuito general de transporte público local en tres años específicos (2000, 2007 y 2015).

A lo largo del proyecto se van detallando todos los valores de entrada, tanto de información propia del combustible, de tipo meteorológica, así como recorrido y población de la flota, velocidad media del recorrido, y demás configuraciones válidas dentro de las estimaciones propias de autobuses diésel. Al mantener esta estructura, el presente proyecto puede ser considerado de forma indirecta como un manual de desarrollo para aplicación en investigaciones posteriores de similares características.

Al existir una diferencia de unidades dentro de cada cooperativa de transporte urbano en la ciudad de Ambato, los **resultados de la simulación** en el caso específico solamente indican la **evolución del consumo de combustible, las emisiones gaseosas, de material particulado, de carbón y metálico a la atmósfera en el rango temporal (2000, 2007 y 2015)**, diferenciando por un lado cómo sería este comportamiento de estimaciones si la ciudad tuviera una superficie plana con respecto a la configuración orográfica irregular real.

Se concluye el desarrollo con la presentación de proyecciones de emisión en **escenarios hipotéticos de actualización o reforma completa de la flota** hacia tecnologías con aplicación de legislaciones de control con una mayor eficiencia, pudiendo así apoyar la toma de decisiones políticas iniciales por parte de los gobiernos locales hacia la transformación de la matriz de transporte eficiente y con menor índice de contaminación medioambiental.

Esta proyección, según la metodología empleada por COPERT, del consumo de combustible y emisiones en **escenarios hipotéticos, de flota potencial 50% Euro II – 50% Euro III o flota potencial 100% Euro III**, demuestran que si bien es cierto el **consumo de combustible (FC)** y la **emisión de CO₂ aumentan**, las estimaciones de otras emisiones (CO, VOC, NMVOC, CH₄, NO_x, NO, N₂O, material particulado, de carbón y metálico) presentan una **reducción favorable** que, teóricamente, apoyarían la toma de decisiones política hacia la actualización o renovación de la flota de transporte público en la ciudad de Ambato.

FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS SIMULATION OF THE PUBLIC TRANSPORTATION FLEET FROM AMBATO (ECUADOR) WITH COPERT 4.

EXECUTIVE ABSTRACT

The **overall objective of this TFM** is to analyze and simulate fuel consumption and emissions of the fleet of public transport vehicles from information on specific configurations of relief and topography of the city of Ambato, Tungurahua Province, Republic of Ecuador, by using the Software COPERT 4

In order to achieve that objective, this Master's Thesis seeks to do a methodological comprehension revision of the actual model used by COPERT 4 software for the simulation of fuel consumption and emissions (gaseous, particulate matter, carbon compounds and heavy metals) of typical buses under urban driving patterns, as well as different Euro type emissions control standards allocated inside the public transportation fleet from Ambato, Republic of Ecuador.

Preliminarily to the proposed comprehensive discernment, as preamble is introduced several previous investigations and important reasons for the fulfillment of the fuel consumption and emissions simulation of the public transportation fleet from Ambato (Ecuador), based on the central city need to establish specifically this investigation for an initial support in making major control and local regulation policies for environmental management by Ambato central government. GADMA strategic aims are:

- Environmental contamination reduction.
- Consolidation of the authority for contamination control and prevention. Strengthening of the environmental institutionalism.
- Environmental education development and citizen participation.
- Polluting emissions reduction from static and dynamic sources.
- Optimization of the capabilities into the conformation of environmental policies.
- Information and estimated evolution records of the primary contamination systems.

COPERT 4 under this concept is a computer program for investigation into the road transport sectors. It allows the **calculation of fuel consumption and the associated CO₂ emission**, of almost all **regulated pollutants** (CO, NO_x, COV, y PM) send out by different vehicle categories (passenger cars, light duty and high duty vehicles, motorcycles and mopeds), as well as **other emissions** composed of CH₄, N₂O, NH₃, SO₂, heavy metals, PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons) and POPs (Persistent organic pollutants).

The software COPERT 4 was developed under a "top-down" approach, offering a general volume of consumption or emissions data for the entire group of transport activities, or instead for some of their modes, making relationships between independent variables and registered statistics. Therefore, this software calculates the total emissions through the combination of specific technical information (e.g. Emissions Factor) along with transportation fleet's activities data (e.g. Mean fleet mileage).

COPERT 4 especially for busses sector divides the fleet information according to:

- **Fuel type** (diesel, CNG, Biodiesel).
- **Structural development** (midi <=15 tons, standard 15 tons, articulated, and others)
- **Emission control standards** (conventional, Euro I, II, III, IV, V, VI).

For emissions calculation COPERT besides uses some special formulas from **velocity dependent driving patterns** developed empirically, through the analysis and statistical verification of multiple real world tests under different driving conditions. These driving conditions are: urban driving (velocity < 50 km/h), rural driving (velocity between 50 – 100 km/h) and highway driving (100 – 120 km/h).

In addition of the fleet characteristics, structural development, emissions control standards and driving condition patterns, COPERT 4 establish the final calculation by the addition of emissions from three different sources: hot emissions, cold emissions and fuel evaporative emissions, according to this equation:

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD} + E_{EVAP}$$

From results obtained, the **emissions calculation for buses** as well that for heavy duty vehicles in COPERT are based principally on **hot emissions**, which factors came from extrapolation values obtained from results in less size vehicles, distinguishing the three driving patterns mentioned before: urban, rural and highway driving conditions.

From a practical point of view, the investigation starts from the assignment of an **initial model case** that represents the earliest computer calculations **for only one vehicle at one kilometer of road**. This initial model case is necessary in order to the required COPERT system comprehension, as well as the understanding of the assorted behavior experimented from the change of **road inclination**, vehicle supported **passenger load** and the **average range of velocity** of the vehicle.

After this initial procedure, the investigation proceeds to the methodological adjustment of the COPERT model to apply in the **specific case of Ambato**. This second chapter structure is composed from two main perspectives: **one plain road ideal configuration analysis** without the influence of the typical urban orography, and **another real configuration** that includes this irregular relief obtained from affection percentages of road inclination, satisfying the main requirements of the local public transportation circuit in three specific years (2000, 2007 and 2015).

Through the whole development of this project are detailed all the input data from fuel characteristics, meteorological information, along with the fleet population, mean mileage, road average velocity and other diesel busses configurations. With this structure the master's thesis can be used as a guidebook for the development of subsequent investigations with similar features.

Due to the existence of different number of busses into each public transport companies from Ambato, the **results obtained** from the specific case only indicates the **time evolution of fuel consumption, gaseous emissions, particulate matter, metal and carbon emissions** into the atmosphere in 2000, 2007 and 2015, distinguishing at one aside how would be this behavior if the city was plane in relation to the real irregular orographic configuration.

In the final chapter the future hypothetical effects of emissions in **two different scenarios** are presented: the **update of one half of the fleet or the complete change of the entire fleet** to Euro III technologies with highest efficiency control standards, providing the starting support for initial political decisions from local governments towards the transformation of a superb transportation matrix with less environment contamination levels.

These future hypothetical effects according to the COPERT methodology show that, even **fuel consumption and CO₂ emissions increase, other pollutant emissions** (CO, VOC, NMVOC, CH₄, NO_x, NO, N₂O, PM, and metals) **experiment a favorable reduction** that theoretically, supports political decisions towards the update or entire renovation of the public transportation fleet from Ambato.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen de Agua Santa por haberme dado la oportunidad de haber vivido tan excelente experiencia académica en un país que se ha convertido en mi segundo hogar, España, con ese rincón tan especial y mágico, Valladolid.

A mis padres que, aún en presencia de momentos difíciles, supieron apoyarme y guiarme totalmente, sus consejos diarios y las alegrías compartidas van para ustedes papitos.

A mis hermanas, Jessica y Jazmín, a mis sobrinos y a toda mi familia que aún después del tiempo alejados me dieron el aliento necesario para llegar hasta donde he llegado.

A Francisco, que con paciencia y sabiduría me ha guiado por el mundo de la automoción a niveles investigativos nunca antes experimentados, abriéndome las puertas a un futuro lleno de oportunidades, pero también de enorme sacrificios.

Pero sobre todo a esa personita especial, Palmira, que desde que ha llegado a mi vida cambio los grises por una enorme paleta de colores, por ser mi compañera para recorrer el mundo, y porque gracias a su apoyo esta experiencia será la más especial de mi vida.

INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes y justificación.....	1
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Alcance y desarrollo del TFM.....	4
2.	DESARROLLO ESTRUCTURAL DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES.....	7
3.	METODOLOGÍA COPERT 4 PARA AUTOBUSES.....	11
3.1	Categorías de autobuses.....	11
3.2	Ciclos de conducción.....	12
3.3	Tipos de emisiones.....	13
3.4	Metodología empleada.....	14
3.4.1	Secuencia de cálculo de COPERT 4.....	15
3.4.2	Factores de emisión y tipos de agentes contaminantes.....	17
4.	INTRODUCCIÓN DE DATOS EN COPERT 4.....	19
4.1	Caso inicial modelo (1 vehículo – recorrido 1km).....	19
4.1.1	Selección de país y año.....	19
4.1.2	Información específica de la ciudad.....	20
4.1.3	Información técnica del combustible.....	21
4.1.4	Selección de vehículos para ingreso de actividad de la flota.....	23
4.1.5	Datos de entrada de la flota – Caso inicial modelo.....	23
4.1.6	Datos de entrada de velocidad de circulación.....	25
4.1.7	Emisiones de CO2 debido al aceite lubricante.....	26
4.1.8	Datos de selección de carga del vehículo y número de ejes.....	27
4.1.9	Datos de aplicación de pendiente en carretera.....	27
4.1.10	Relación de NO2 a NOx.....	28
4.1.11	Fracción de Carbono elemental y Carbono orgánico en PM.....	29
4.1.12	Parámetros de los factores de emisión en caliente.....	29
5.	CARACTERIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE COPERT EN CONDICIONES DE REFERENCIA.....	31
5.1	Resultados caso inicial modelo.....	32
5.1.1	Consumo de combustible y emisiones de CO2 a la atmósfera.....	32
5.1.2	Emisión de SO2.....	34
5.1.3	Emisiones de CO, VOC, NMVOC y CH4.....	35
5.1.4	Emisiones de materiales con nitrógeno.....	37
5.1.5	Emisiones de material particulado.....	38
5.1.6	Emisiones de compuestos de carbono.....	39

5.1.7	Emisión de metales a la atmósfera.	40
5.2	Casos de influencia en las estimaciones de emisión.	42
5.2.1	Cambios por influencia de la variación de la pendiente.	42
5.2.2	Cambios por influencia de la variación de la carga.	43
5.2.3	Cambios por influencia de la variación de la velocidad media de recorrido.	44
6.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON COPERT – CASO ESPECÍFICO CIUDAD AMBATO.....	47
6.1	Datos de entrada - caso específico ciudad de Ambato.....	47
6.2	Emisiones caso específico ciudad de Ambato - configuración plana.....	48
6.2.1	Resultados obtenidos caso específico ciudad de Ambato – configuración plana.....	49
6.3	Emisiones caso específico ciudad de Ambato - configuración real.	52
6.3.1	Resultados obtenidos caso específico ciudad de Ambato – configuración real.	54
6.4	Estudio comparativo configuración plana – real ciudad de Ambato.....	57
6.4.1	Relación de diferencia en consumo de combustible y CO2.	57
6.4.2	Relación de diferencia en emisión de CO, VOC y NMVOC.....	58
6.4.3	Relación de diferencia en otras emisiones contaminantes.....	58
6.5	Proyección de emisiones en escenarios hipotéticos.....	59
6.5.1	Proyección de consumo de combustible y emisión de CO2.....	60
6.5.2	Proyección de otras emisiones contaminantes a la atmósfera.....	60
6.5.3	Proyección de emisiones de material particulado y metálico a la atmósfera.....	61
7.	CONCLUSIONES.....	63
7.1	Conclusiones.	63
7.2	Principales aportaciones del autor.....	64
7.3	Sugerencias para trabajos futuros.....	65
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
8.1.	Software.	67
8.2	Documentación de apoyo para el software COPERT.....	67
8.3	Documentación científica consultada.	67
8.4	Páginas web consultadas.	68
	ANEXO 1. Registro de temperatura (Universidad Técnica de Ambato).	69
	ANEXO 2. Gráficos de estimación de emisiones – influencia por variación de valor de pendiente.	73
	ANEXO 3. Gráficos de estimación de emisiones – influencia por variación de la carga soportada.	75
	ANEXO 4. Gráficos de estimación de emisiones – influencia por variación de la velocidad media de recorrido.....	77

NOMENCLATURA

As:	Arsénico
Cd:	Cadmio.
CH ₄ :	Metano.
CN:	Número de Cetano.
CNG:	Gas comprimido natural.
CO:	Monóxido de Carbono.
CO ₂ :	Dióxido de Carbono.
COP:	Contaminantes orgánicos persistentes.
COPERT:	Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport.
CORINAIR:	COre INventory AIR emissions.
COVs:	Compuestos orgánicos volátiles.
Cr:	Cromo.
Cu:	Cobre.
EC:	Carbón Elemental.
EPA:	Agencia de Protección Ambiental.
FC:	Consumo de combustible.
GADMA:	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato.
GEI:	Gases de efecto invernadero.
GUI:	Interfaz gráfica de usuario.
H ₂ SO ₄ :	Ácido sulfúrico
HAP:	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.
HC:	Hidrocarburos.
HCNM:	Hidrocarburos no metanos.
Hg:	Mercurio.
HNO ₃ :	Ácido nítrico.
IPCC:	Panel intergubernamental para el cambio climático.
Ltrip:	Recorrido medio.
NH ₃ :	Amonio.
Ni:	Níquel.
NMVOCs:	Compuestos orgánicos volátiles menos metano.
NO _x :	Óxidos de nitrógeno.
O ₃ :	Ozono
OLADE:	Organización Latinoamericana de Energía.
OM:	Carbón orgánico.
PAHs:	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.
Pb:	Plomo.
PCA:	Porcentaje de compuestos aromáticos.
PCDDs:	Dibenzo-p-dioxinas policloradas.
PM:	Material particulado.
PM ₁₀ :	Material particulado de diámetro menor a 2.5 μm
PM _{2.5} :	Material particulado de diámetro menor a 10 μm
POPs:	Contaminantes orgánicos persistentes.
RH:	Humedad relativa.
RVP:	Presión de vapor Reid.
Se:	Selenio.
SO ₂ :	Dióxido de Azufre.
SO _x :	Óxidos de Azufre.
t:	Tonelada.
t _{trip} :	Tiempo de recorrido.
VOCs:	Compuestos orgánicos volátiles.
Zn:	Zinc.

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes y justificación.

En la actualidad, bajo un modelo de sociedad económicamente activa y productiva, los medios de transporte de tipología pública y privada son uno de los ejes principales de la esfera sostenida de movilización continua necesaria para la humanidad. Tal como lo indica [Mataix González, 2010], “todos los días, para cualquier actividad que decidan desarrollar, deseada o no, los ciudadanos deben desplazarse por la ciudad o acceder a ella: para trabajar, asistir a la escuela, comprar, ir al cine, e incluso, para pasear por un parque. Así, al cabo del día, se producen millones de desplazamiento en nuestros pueblos y ciudades”. (p.7).

La realización de la denominada “movilidad urbana” conlleva una serie de responsabilidades con respecto a temas de una relevada importancia global, el consumo de combustible y su relación directa con las emisiones contaminantes resultantes de los procesos de transformación energética propios de los procesos mecánicos que se llevan a cabo. Este alto grado de responsabilidad del transporte dentro de la contaminación medioambiental debe ser vigilado, controlado y analizado en el espacio temporal mediante los respectivos organismos regulatorios pertinentes.

Bajo este marco inicial, el desarrollo de un estudio investigativo sobre estimación de consumo de combustible y emisiones contaminantes a la atmósfera para la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, en la República del Ecuador, se justifica de forma paralela a investigaciones previas como la desarrollada por [Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2014], sobre inventarios preliminares de emisiones de Contaminantes del Aire en varios cantones de la nación ecuatoriana dentro del proyecto de calidad del aire III con año base 2010. Además, el presente análisis parte de la necesidad de la ciudad de establecer de forma específica el desarrollo estimado de dichos parámetros en la movilidad de tipo pública, con la finalidad de poder realizar una serie de políticas de control y regulación a nivel local que propongan una agenda ambiental de control por parte del Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Ambato (GADMA), adjunto en el futuro al presente desarrollado por la municipalidad, cuyos ejes estratégicos son:

- Reducción de la contaminación ambiental.
- Consolidación de la autoridad para la prevención y el control de la contaminación y fortalecimiento de la institucionalidad ambiental.
- Fomento de la educación ambiental y la participación ciudadana.
- Reducción de las emisiones contaminantes, de fuentes estáticas y móviles.
- Optimización de las capacidades de conformación en políticas ambientales.
- Información y registros estimados de evolución de los sistemas originarios de la contaminación.

El origen de la problemática persistente, no tan solo de forma específica en la ciudad de Ambato sino en gran parte del territorio latinoamericano, es la consumición de grandes cantidades de energía por parte del transporte motorizado, tal como apuntan [Ribeiro, 2000], donde “... en el ámbito mundial, la energía consumida en el sector transporte corresponde al 48% de la demanda total de petróleo y se estima que llegue al 77% en el 2020”. Dichos consumos se ven reflejados en informes, como el presentado por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), quienes expusieron que en países como Ecuador, además de otros pertenecientes a América Latina y el Caribe, la mayor parte del consumo se identificaba, para el año 2007, en forma de Gasolina (49,9%) y Diésel (41,5%), lo que caracteriza la importancia de estos combustibles en el área industrial de la movilización.

De forma paralela al consumo de combustible, surge un dificultoso panorama que afecta directamente a los seres humanos y el medio ambiente en general, la contaminación producida por las emisiones resultantes. Haciendo referencia a [Nevers, 1998], la contaminación del aire se puede definir como “cualquier condición atmosférica en la que las sustancias presentes producen un efecto adverso

medible; en la salud del humano, los animales y vegetales, o bien un daño físico en los materiales (edificaciones y monumentos)".

De esta forma los **contaminantes atmosféricos** se clasifican en:

- **Primarios.** Tipo de contaminantes que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidos, siendo los más representativos las partículas, el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x), y los hidrocarburos (HC).
- **Secundarios.** Tipo de contaminantes que han estado sujetos a cambios químicos o son el producto de reacciones de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera, resaltando en este grupo el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el ácido nítrico (HNO_3), el ozono (O_3), el smog fotoquímico y los compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Los contaminantes primarios expuestos, cuya fuente de contaminación sea de naturaleza móvil, como lo representa el parque automotor, han venido siendo regulados bajo una serie de normas globales, que para fines de aplicación en el territorio europeo se denominan normativas Euro, de uso dentro de la metodología de modelización de la contaminación utilizada por el software COPERT 4.

Las normativas Euro (categoría de contaminantes) son un conjunto de requisitos que fijan los valores límite de las emisiones de los vehículos nuevos al momento que se encuentre válida la revisión actual de dicha norma. Acorde a [Cives Vilar, 2011], "en la fiscalidad de un vehículo, las emisiones de gases contaminantes tienen un papel muy importante porque el tipo impositivo depende también de la clasificación que establecen las diferentes normas Euro.". Estas limitaciones de emisiones se encuentran resumidas en las figuras No. 1.1. y No. 1.2.

Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor de gasolina						
	válido a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
Euro I	12/92	2,72	-	-	0,97	-
Euro II	01/97	2,20	-	-	0,5	-
Euro III	01/00	2,30	0,20	0,15	-	-
Euro IV	01/05	1,00	0,10	0,08	-	-
Euro V	09/09	1,00	0,10	0,06	-	0,005*
Euro VI	08/14	1,00	0,10	0,06	-	0,005*

* con inyección directa

Limitaciones a las emisiones para vehículos con motor de gasolina

Figura 1.1. Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor de gasolina.

Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor diésel						
	válido a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
Euro I	01/92	3,16	-	-	1,13	0,14
Euro II	01/96	1,00	0,15	0,55	0,70	0,08
Euro III	01/00	0,64	0,06	0,50	0,56	0,05
Euro IV	01/05	0,50	0,05	0,25	0,30	-
Euro V	09/09	0,50	0,05	0,18	0,23	0,005
Euro VI	08/14	0,50	0,09	0,08	0,17	0,005

El nivel de emisiones para vehículos con motor diésel

Figura 1.2. Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor diésel.

La fijación de estas normativas no tan solo han sido dirigidas hacia la protección medioambiental, sino que de forma preferente han sido instituidas para reducir los peligros potenciales que representa su presencia en el ambiente próximo circundante del ser humano. Así, resumiendo las consecuencias probables ocasionales de **afección en la salud**, se puede enunciar:

- **Monóxido de carbono (CO).** El monóxido de carbono puede ser precursor de CO_2 y del ozono, dos importantes gases de efecto invernadero. Si bien la exposición al CO no tiene un efecto acumulativo sobre la salud, los efectos instantáneos de concentraciones elevadas pueden ser peligrosos. [Nylund & Erkkilä, 2005].
- **Dióxido de carbono (CO_2).** Es un gas de ocurrencia natural que representa aproximadamente el 77% de los gases de efecto invernadero globales. [Baumert, Herzog, &

Pershing, 2005], por lo que es considerado uno de los gases de efecto invernadero más abundantes.

- **Óxidos de nitrógeno (NO_x).** Los niveles importantes de NO_x en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones, posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. Dentro de esta categoría los mayores productores de NO_x son los vehículos de transporte que utilizan Diésel como combustible.
- **Hidrocarburos no metanos (HCNM).** Son procedentes del combustible parcialmente quemado. Los contaminantes potenciales derivados de los hidrocarburos, como el acetaldehído y el formaldehído, son numerosos y tienen distintos efectos sobre los ojos, la piel, e irritación de las vías respiratorias, por lo que son considerados altamente negativos para la salud o contribuir al ozono o al smog a nivel del suelo. [Macías, Martínez, & Unal, 2010].
- **Material Particulado (PM).** El material particulado está compuesto por una mezcla de pequeñas partículas y gotículas, que incluyen ácidos como nitratos y sulfatos, compuestos químicos orgánicos, metales, suelo o polvo. El cuerpo humano no puede protegerse de las partículas ultra finas (del orden de $10\mu m$ o menos), que pueden ingresar al corazón y a los pulmones por inhalación, tal como se presenta en la figura No. 1.3, y tienen graves efectos sobre la salud: enfermedades respiratorias o afecciones cardíacas y pulmonares. [Agencia de protección ambiental EPA, 2012].

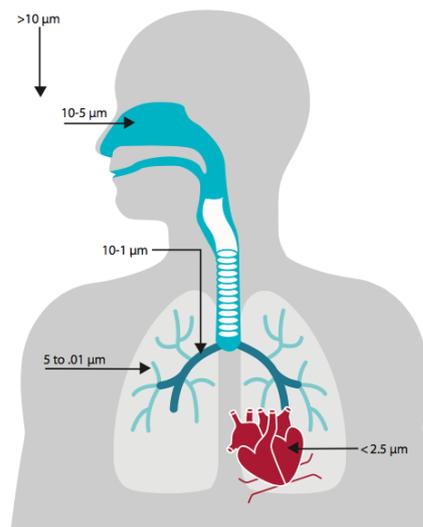


Figura 1.3. Relación de tamaño de partículas – ingreso al cuerpo humano.

- **Dióxido de azufre (SO_2).** Las emisiones de SO_2 de las fuentes móviles son proporcionales al contenido de azufre en los combustibles. El SO_2 está relacionado con numerosos efectos negativos sobre la salud, incluyendo afecciones del sistema respiratorio.

Con la finalidad de poder estimar y documentar las emisiones anuales nacionales y su evolución dentro del espacio temporal, se han desarrollado una serie de modelos, principalmente de tipo informáticos, como el propuesto dentro del presente TFM: COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport). Tal como lo indica [Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2010], COPERT es una herramienta informática para el cálculo de emisiones del sector del transporte en carretera, financiado por la Agencia Europea del Medio Ambiente en el marco de las actividades del European Topic Centre on Air and Climate Change.

COPERT 4, versión oficial de COPERT desde Noviembre de 2006, estima las emisiones de todos los contaminantes regulados (CO , NO_x , COV y PM) emitidos por diferentes categorías de vehículos (coches de pasajeros, vehículos ligeros y pesados, ciclomotores y motocicletas), así como las emisiones de CO_2 en base al consumo de combustible. Además, en referencia a lo explicado por

[Agencia de protección ambiental EPA, 2012], COPERT estima las emisiones de otros compuestos como CH_4 , N_2O , NH_3 , SO_2 , metales pesados, HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y COP (contaminantes orgánicos persistentes).

Finalmente COPERT considera emisiones en caliente, en frío y las producidas por evaporación de combustible. Aunque está pensado inicialmente para emisiones anuales nacionales, bajo suposiciones argumentadas en porcentajes de inclinación del tramo total del recorrido, se puede aplicar esta metodología para estimación de emisiones en territorios orográficamente irregulares, teniendo además un módulo separado para calcular emisiones de escapes de vehículos y motores fuera de carretera.

El desarrollo y registro de propiedad intelectual fue realizado por la empresa Emisia S.A., especializada en área de inventarios y modelado de emisiones, conjuntamente con políticas medioambientales.

1.2 Objetivos.

El **objetivo general** de este TFM es **analizar y simular el consumo de combustible y emisiones de la flota de vehículos de transporte público** a partir de información de circulación bajo configuraciones de relieve y orografía específica de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, en la República de Ecuador, mediante la utilización del Software COPERT 4.

Como **objetivos específicos** se tienen los siguientes:

- **Comprender la metodología** empleada en el modelo de estimación de emisiones de gases del transporte de carretera, tomado como parte de la guía de inventario de emisión contaminante EMEP/EEE de aire para el cálculo de las emisiones de contaminantes de aire, en consonancia con las directrices del IPCC de 2006 para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Ajustar el modelo empleado** dentro de COPERT 4 a una situación real, como la representada para la flota de vehículos de transporte público a partir de información de circulación bajo configuraciones de relieve específicas de la ciudad de Ambato, tomando en cuenta un análisis inicial simplificado y uno posterior explícito que incluya las circunstancias de porcentajes de pendiente dentro del recorrido total.
- **Evaluar los consumos y las emisiones** de la flota de vehículos de transporte público de la ciudad de Ambato, con la mayor exactitud posible a partir de la información disponible, para los años 2000, 2007 y 2015, en forma del consumo de combustible y las emisiones resultantes por km, por vehículo, y emitida por pasajero, analizando los efectos de la pendiente y la carga de pasajeros de los vehículos.
- Predecir **escenarios posibles de consumo de combustible y emisiones de la flota** a en situaciones hipotéticas de **transformación de la misma** hacia normas regulatorias más restrictivas en emisiones.

1.3 Alcance y desarrollo del TFM

El presente TFM se divide en cuatro partes principalmente:

- Descripción metodológica y de funcionamiento (ingreso – salida de datos obtenidos) del software COPERT 4, específicamente para la clasificación de buses tipo con uso de combustible Diésel utilizados dentro de la flota de transporte de la ciudad de Ambato, empleada para el cálculo y estimación de emisiones y consumo de combustible.
- Introducción de la información de las flotas de transporte analizadas de circulación en la ciudad de Ambato, así como su transformación en número de unidades y actualización de la tecnología empleada. En este apartado se describe la introducción de los datos generales en el

programa, la norma Euro aplicada, la información meteorológica local, las características del combustible utilizado, así como las hipótesis tomadas en cuenta a la hora de la introducción de la información, mediante aplicación de un caso modelo inicial (1 vehículo – recorrido 1km)

- Exposición de resultados correspondientes a la caracterización de las simulaciones mediante COPERT en condiciones de referencia, donde se presenta el comportamiento del software para la estimación del consumo de combustible y emisión de gases contaminantes, material particulado y emisiones metálicas a la atmósfera. Los resultados se presentan en valores por kilómetro recorrido (o por 100 km en el caso del consumo), para tener unos valores comparables entre las diversas condiciones. De forma adicional se establecen casos de influencia en las estimaciones de emisión, debido a la influencia por variación de la pendiente, variación de la carga y variación de la velocidad media de recorrido.
- Apartado de análisis de caso específico de la ciudad de Ambato mediante la aplicación del modelo simplificado (plano) con respecto al modelo real (tomando en cuenta porcentajes de pendientes en el trayecto total) para los respectivos años estudiados (2000, 2007 y 2015). A partir de esta información, se realiza un estudio comparativo en la evolución del tiempo, el cambio del número de unidades anual de la flota, mediante la utilización de valores normalizados específicos.
- Marco propositivo de estimación de los efectos que se obtendrían hipotéticamente en escenarios de actualización de la tecnología empleada en las unidades de transporte, así como las perspectivas futuras con respecto al consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes, material particulado y emisiones metálicas a la atmósfera.

2. DESARROLLO ESTRUCTURAL DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES.

Bajo parametrización de la estimación de emisiones de fuentes móviles, en el caso específico de los modelos de transporte urbano en las ciudades, la metodología general consiste en la predicción de los niveles de actividad de la diversidad de categorías vehiculares, relacionándolas a cada una de ellas con un nivel de emisión promedio o factor de emisión.

Si bien es cierto la premisa anterior delinea procesos a primera vista simplificados y relativamente sencillos, la realidad estructural de las metodologías de estimación de emisiones involucran una serie de variables propias de un proceso de transformación energética por naturaleza complejo. Según [Martínez Aguado, Ruiz Rúa, & Muro Rodríguez, 2008], existe una gran variedad de procedimientos para el cálculo del consumo de energía y emisiones, los mismos que dependen del agente contaminador, el modo de transporte y el tipo de vehículo. Bajo esta perspectiva, la estimación de emisiones puede obtenerse bajo dos enfoques:

- **Enfoque Top-Down:** Ofrece un volumen general de consumos o emisiones para todo el conjunto de la actividad de transporte o para algunos de sus modos. La forma funcional de estos modelos suele venir dada por una regresión en el que las variables independientes se alimentan de estadísticas ya elaboradas. Estos modelos se basan en datos o variables agregadas.
- **Enfoque Botom-Up:** Calcula directamente las emisiones y consumos desde la fuente, el vehículo. Estos cálculos pueden realizarse bien en el laboratorio, bien a través de los datos de los fabricantes o bien en pruebas específicas sobre situaciones reales.

Al mismo tiempo, los enfoques anteriormente presentados se pueden subdividir según el objeto que se busque de su realización, pudiendo ser utilizados para la medición del impacto de las políticas energéticas específicas mediante modelos energéticos, o bien para la medición de emisiones mediante la elaboración de inventarios y registros continuos.

El software COPERT 4, a partir de las características de un modelo de enfoque top-down, estima el total de emisiones mediante la combinación de información técnica específica (ej. Factores de emisión) conjuntamente con los datos de actividad de la flota de transporte (ej. Total de kilómetros recorridos) provistos por el usuario. Tal como lo indican [Ntziachristos, et al., 2000], en principio el total de emisiones es calculado mediante la suma de emisiones de tres fuentes distintas: aquellas obtenidas cuando el motor se encuentra en una fase térmica estabilizada (hot emissions), aquellas recabadas durante la fase de calentamiento del sistema (cold emissions) y finalmente las obtenidas por evaporación del combustible (fuel evaporative emissions), tal como se indica en la siguiente ecuación.

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD} + E_{EVAP} \quad (1)$$

Desde otro punto de vista, considerando a COPERT como un modelo de consumo y emisiones por modo de transporte, se incluye la conceptualización de estimación en base a la "Actividad del Tráfico", donde [Martínez Aguado, Ruiz Rúa, & Muro Rodríguez, 2008] exponen que las emisiones vehiculares tienen una fuerte dependencia con respecto a las condiciones de operación del motor, incluyendo aceleraciones, paradas y número de vehículos, cuya diferenciación provoca que se establezca una categorización de la flota: por tipo de vehículo, por tipo de combustible utilizado, por tamaño, por tecnología empleada, por antigüedad, entre otros aspectos.

Adicionalmente, es fundamental incluir el modelo de emisiones en el transporte por carretera, que se basa en el principio de que las emisiones medias que se obtienen en un trayecto determinado varían de acuerdo a la velocidad media con la que se realice este trayecto. De acuerdo a las características propuestas, existen **tres modelos** que permiten la diferenciación en la forma de relación de las operaciones del vehículo:

- Modelo de emisión en función de la velocidad media del vehículo.
- Modelo Suizo/Alemán, el cual asocia un factor de emisión a cada situación del tráfico y cada tipo de vehículo.
- Modelo incluyendo como segunda variable el índice de aceleración.

Dentro de esta singularidad cabe destacar que se ha comprobado que, se obtienen emisiones elevadas a una velocidad media baja, que es cuando el rendimiento del medio de transporte no es el adecuado debido a paradas y arranques intermitentes realizados; se obtienen emisiones elevadas a velocidades altas debido a la gran potencia que se requiere a momentos; y concluyentemente se logran emisiones mínimas a velocidad media.

Esta relación de velocidad-emisión generalmente se obtiene a partir del uso de un determinado “ciclo de conducción”, que no es más que un registro de velocidades típico para el sector, realizando distinciones para los ciclos de manejo urbano, rural y en autopista. Un inconveniente común del uso de estos ciclos es su generalización, por lo que no guardan relación de aproximación real con los patrones de conducción obtenidos en carretera, tal como se visualiza en la figura No. 2.1.

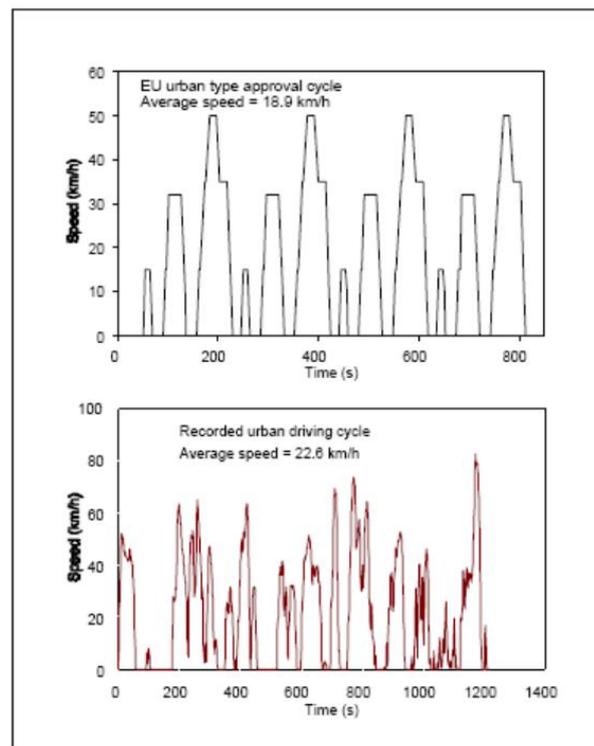


Figura 2.1. Comparativa de velocidad, Ciclo urbano tipo EU y Ciclo urbano real.

A partir de este análisis, COPERT calcula el total de emisiones a través de la ecuación:

$$E_{TOTAL} = E_{URBAN} + E_{RURAL} + E_{HIGHWAY} \quad (2)$$

De forma específica para las flotas de vehículos de transporte urbano, rural y transporte de carga, aparte del modelo usado por COPERT, existen otras cuatro metodologías para estimar el impacto de estrategias y políticas de reducción de emisiones, definidos a continuación según [Clean Air Institute, 2013]:

- **MODELO FLEET (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)**

Con este modelo los transportistas hacen un cálculo anual de la reducción de emisiones provenientes de sus unidades con base en el consumo de combustible y pueden calcular su huella de carbono mediante el empleo de una hoja de cálculo en formato Microsoft Excel.

Información de entrada requerida:

- *Información de operación:* registro de vehículo y país.
- *Datos de contacto:* datos de compañía propietaria y operador.
- *Categorización:* Descripción detallada física del transporte.
- *Información general:* tipo de combustible, empleo de filtros, tipo de tecnología, carga.
- *Año, modelo y clase.*
- *Información sobre datos de actividad:* Distancia total recorrida, distancia recorrida en vacío, distancia recorrida en carga, tipo de vía, horas en ralentí, cantidad de combustible consumido.

- **MODELO DE DESCARBONIZACIÓN (Universidad Heriot - Watt)**

Este modelo desarrollado en 2011, permite a las empresas estimar el grado en que se pueden reducir las emisiones de CO_2 de sus operaciones de transporte, en especial del transporte de mercancías.

Información de entrada requerida:

- *Número de vehículos.*
- *Tipo de vehículo.*
- *Uso del vehículo.*
- *Refrigeración.*
- *Consumo de combustible en l/100km.*
- *Tipo de combustible.*
- *Kilómetros recorridos.*
- *Incremento estimado de kilómetros recorridos.*

- **MODELO PNUMA-TNT**

Desarrollado en el 2006 por el programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, este modelo evalúa el impacto en salud de la flota vehicular en circulación y para desarrollar estrategias y escenarios para abatir las consecuencias negativas. Consta de 4 etapas: concientización, impactos, acciones y estrategias.

Información de entrada requerida:

- *Categorías de vehículos:* Vehículos de pasajeros, camiones y autobuses ligeros, camiones y autobuses medianos, camiones y autobuses pesados.
- *Número de vehículos de la flota.*
- *Consumo de combustible anual.*
- *Calidad del combustible empleado.*
- *Recorrido total anual.*

- **HERRAMIENTA DE CAMIONES Y TRANSPORTES VERDES PARA ASIA (GTT)**

Modelo desarrollado por la iniciativa de Aire Limpio (Clean Air Initiative) para las ciudades asiáticas como parte de la gran iniciativa de la subregión del Gran Mekong. Esta herramienta tiene como objetivo ayudar a los administradores a estimar los impactos de la línea base de las flotas, así como evaluar los impactos de implementar diferentes tecnologías y estrategias para mejorar la eficiencia vehicular y/o reducir emisiones. Permite estimar CO_2 , CO , COV , NO_x , SO_x , material particulado y Plomo (en camiones a gasolina).

Información de entrada requerida:

- *Datos generales:* Nombre de la empresa, país, año de análisis.
- *Datos para el promedio de la flota:* precio promedio del combustible (en USD)
- *Datos a nivel vehículo:* placa de identificación, número de llantas, tipo de combustible, distancia recorrida anual, consumo total de combustible, carga promedio, distancia promedio por viaje, año

de fabricación, peso bruto, proporción en viajes vacío, velocidad promedio, tiempo promedio en ralentí, número promedio de días en operación al año.

3. METODOLOGÍA COPERT 4 PARA AUTOBUSES.

COPERT 4, al ser una metodología de caracterización de todo el parque automotor, para poder realizar los reportes dentro del cuadro de CORINAIR (COre INventory AIR emissions), dentro de su esquematización se provee **una estratificación por categoría de vehículos**, la misma que ha sido aprobada acorde a la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa UN-ECE, siendo esta clasificación denotada a continuación:

- Vehículos de pasajeros M1
- Vehículos de carga ligera N1
- Vehículos de carga pesada N2, N3
- Buses urbanos y autocares M2, M3
- Vehículos de dos ruedas L1, L2, L3, L4 y L5.

Dentro de cada uno de estos tipos incluidos dentro de la clasificación general inicial de COPERT aún se mantiene una serie de sub clasificaciones con la finalidad que exista una uniformidad de cada grupo de forma razonable frente a las emisiones de cada una de ellas. La parametrización después de la cual se disgregan cada una de las tecnologías y normativas que las regulan se basan en:

- Tamaño del vehículo (capacidad del motor o peso bruto)
- Nivel de control de emisión (legislación de control de acuerdo a la EU)
- Tipo de combustible (gasolina, diésel, LPG, o CNG y eléctricos en un futuro)
- El motor
- El propósito operacional (para HDV, si el vehículo es de mercancías, autobús urbano o coche).

Dentro de estos parámetros, como se visualizará posteriormente, el de mayor afección dentro del análisis final es el “nivel de control”, que tal como lo explica [Martínez Aguado, Ruiz Rúa, & Muro Rodríguez, 2008], se define como el estándar de control de las emisiones según el cual un vehículo se clasifica dentro de una determinada categoría.

3.1 Categorías de autobuses.

De forma específica para el presente TFM investigativo se tomarán en cuenta solamente la tipología presente de autobuses dentro del software COPERT 4, por lo que el resto de categorías complementarias no se encuentran agregadas a ningún tipo de análisis ni presentación informativa. Dentro de la subcategoría de nivel 1 presentada para selección dentro del programa informático, de acuerdo al tipo de combustible, se presentan:

- **Buses según tipo de combustible.**
 - ✓ Diésel (5 subcategorías internas).
 - ✓ CNG
 - ✓ Biodiésel.

Los autobuses, cuya fuente de energía es Diésel, CNG o Biodiésel, de acuerdo a su forma estructural se pueden disgregar de acuerdo a la siguiente tabla:

- **Buses según forma estructural.**
 - ✓ Urban Buses Midi <=15 tons.
 - ✓ Urban Buses Standar 15 tons.
 - ✓ Urban buses Articulated > 15 tons.
 - ✓ Coaches Standar <= 18 tons.
 - ✓ Coaches Articulated > 18 tons.

- ✓ Urban CNG Buses.
- ✓ Urban Biodiésel Buses.

Finalmente, la clase de vehículo pasa por un filtro de tipo de tecnología implementado para el control de emisiones, ya que desde la década de 1970 la legislación europea ha venido regularizando y controlando esta actividad. Así los autobuses según esta característica pueden ser:

- **Buses según tipo de tecnología de control de emisiones.**
 - ✓ Conventional.
 - ✓ HD Euro I – 91/542/EEC Stage I.
 - ✓ HD Euro II – 91/542/EEC Stage II.
 - ✓ HD Euro III – 2000 Standars.
 - ✓ HD Euro IV – 2005 Standars.
 - ✓ HD Euro V – 2008 Standars.
 - ✓ HD Euro VI.

3.2 Ciclos de conducción.

Un ciclo de conducción es un perfil indicado de velocidad elaborado dentro del plano de velocidad-tiempo, el mismo que pretende representar una forma típica de conducción en una ciudad o en una autopista, tomando como variables de afección: la tecnología del vehículo, las características del tráfico, la configuración de las carreteras, características de tipo climatológicas y geográficas, así como las características de los propios conductores.

Tal como lo indica [González, 2005], “los ciclos de manejo tienen una gran importancia, entre otros fines, para planear adecuadamente el desarrollo de alguna ciudad, en el desarrollo de tecnologías para los nuevos automóviles, en la validación de modelos que predicen el comportamiento de los vehículos en la vía pública y en los inventarios de emisiones contaminantes en las grandes urbes...”.

Como se indicó anteriormente, las emisiones se encuentran en relación explícita con el tipo de conducción empleado. Para COPERT 4, de acuerdo al informe técnico provisto por [Ntziachristos, et al., 2000], se utiliza una formulación de ciclo de conducción dependiente de la velocidad desarrollado de forma empírica a través del análisis y comprobación estadística de múltiples tests reales mundiales bajo diferentes condiciones de manejo urbano. Estos ciclos de manejo no son del tipo de velocidad constante pero involucran dentro de sus características el tráfico de parada – arranque en ciudad, ciclos de manejo suburbanos, por lo que concluyentemente las curvas de factor de emisión por la dependencia de la velocidad son resultado principal de cada ciclo distinto. En COPERT 4 se distingue 3 tipos de patrones de conducción:

- **Patrón de conducción urbana.** Se identifica por tener velocidades en un rango inferior a 50 km/h, con parada y arranques frecuentes del vehículo, siendo aplicada especialmente en centros característicos de ciudad.
- **Patrón de conducción rural.** Engloba la tipología de carretera externa a las ciudades, la misma que en ocasiones puede ser interrumpida por cruces o semáforos. El rango de velocidades se encuentra entre 50 km/h y 90-100 km/h.
- **Patrón de conducción en autopista.** Se caracteriza por incluir las velocidades en vías de recorrido rápido y de gran capacidad, donde por naturaleza no existen interrupciones en el tráfico. El rango de velocidades está entre 100-120 km/h.

3.3 Tipos de emisiones.

COPERT 4, de acuerdo a la fórmula (1), establece los factores de emisión en función de los tipos de emisiones que ocurren dentro del proceso de transformación energético, siendo estos:

- **Emisiones en caliente (hot emissions).** Las emisiones en caliente se obtienen cuando el motor y los sistemas de control de emisiones (los que hubieren implementados de acuerdo a la tecnología de emisiones utilizada) han alcanzado la temperatura normal de funcionamiento. En su forma básica, las emisiones en caliente se pueden calcular a lo largo del tiempo de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$E_{HOT} = e \cdot m \quad (3)$$

Donde:

E_{HOT} , es la emisión en unidades de nada por unidad de tiempo,

e , es el factor de emisión en caliente en g/km y,

m , es la actividad en distancia recorrida por unidad de tiempo.

Análogamente, la actividad en distancia recorrida por unidad de tiempo m se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$m = n \cdot l \quad (4)$$

Donde:

n , es el número de vehículos de cada una de las categorías definidas y,

l , es la distancia media recorrida por los vehículos de cada categoría durante la unidad de tiempo dada.

En cuanto a los factores de emisión en caliente específicos para autobuses, COPERT 4 hace referencia una recopilación de factores de emisión para esta tipología de vehículos bajo ciertos patrones de conducción. Dentro de los parámetros que influyen las emisiones en caliente en autobuses se puede citar la pendiente de la carretera y el grado de carga del vehículo, por lo que de acuerdo al cambio de estos valores se definen funciones continuas de los índices de emisión de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = K + av + bv^2 + cv^3 + d + e + f \quad (5)$$

Donde:

ε , es el índice de emisión en g/km para un autobús en escasa carga, en una carretera sin pendiente (0%),

K , es una constante,

$a - f$, son los coeficientes y,

v , es la velocidad media del vehículo en km/h.

- **Emisiones en frío (cold emissions).** Son las emisiones obtenidas en el período de calentamiento del sistema. Este tipo de emisiones se ve influenciada por varios factores externos: la velocidad media del vehículo, la temperatura ambiental y la distancia recorrida.

COPERT 4 no toma en cuenta las emisiones en frío para los autobuses ya que, tal como lo agrega [Martínez Aguado, Ruiz Rúa, & Muro Rodríguez, 2008], "el coche de pasajeros era el único tipo de vehículo sobre el que existían suficientes datos (...) los datos acerca de vehículos diésel equipados con catalizador eran demasiado escasos como para permitir realizar un análisis pormenorizado sobre esta subcategoría".

Es importante indicar que, si bien es cierto COPERT 4 no hace una pormenorización de las emisiones en frío para los autobuses, en la realidad según el método MEET, el exceso de emisión producido con el motor en frío es igual al producido por los vehículos de carga pesada de igual peso. Aunque el peso de los autobuses y autocares varía significativamente

dependiendo de su tamaño y capacidad, el peso más común en esta categoría va de 16 a 32 toneladas.

- **Emisiones por evaporación. (evaporative emissions).** Este tipo de emisiones se producen debido a la evaporación que se produce a través del sistema del carburante del vehículo (depósito del combustible, carburador o sistema de inyección, conductos del combustible). Estas evaporaciones son consecuencia directa de aspectos como la volatilidad del carburante, la variación de la temperatura del ambiente y los cambios de temperatura que se producen en el sistema de combustible del vehículo durante el proceso normal de conducción.

Dentro de esta categoría de emisiones se distinguen cuatro tipos de pérdidas por evaporación:

- Pérdidas por llenado del depósito de combustible.
- Pérdidas diurnas por cambio de temperatura.
- Pérdidas por absorción de calor.
- Pérdidas por procesos con el vehículo en funcionamiento.

COPERT 4, en su análisis de emisiones y consumo de combustible para autobuses y autocares de tipo Diésel no hace inclusión mayoritaria de las emisiones por evaporación debido a la diferencia porcentual de información obtenida dentro del método CORINAIR para combustibles gasolina con respecto al anteriormente enunciado.

3.4 Metodología empleada

COPERT 4, tal como se indicó inicialmente, utiliza una metodología donde calcula el total de emisiones combinando la información de actividad para cada categoría de vehículo con su factor de emisión correspondiente. Estos factores de emisión varían de acuerdo a la información de entrada (input data) donde se presentan las variables del combustible, las características de actividad de la flota, las condiciones de conducción de acuerdo a cada tipo de ciclo de conducción, y otras variables como las condiciones climáticas, la distancia total de recorrido, la distribución de evaporación durante el tiempo, entre otros valores de afección. Estos parámetros pasan después a una serie de cálculos intermedios como la participación de los factores de emisión escogidos y el porcentaje en millas de conducción en frío, tal como se indica en la figura No. 3.3

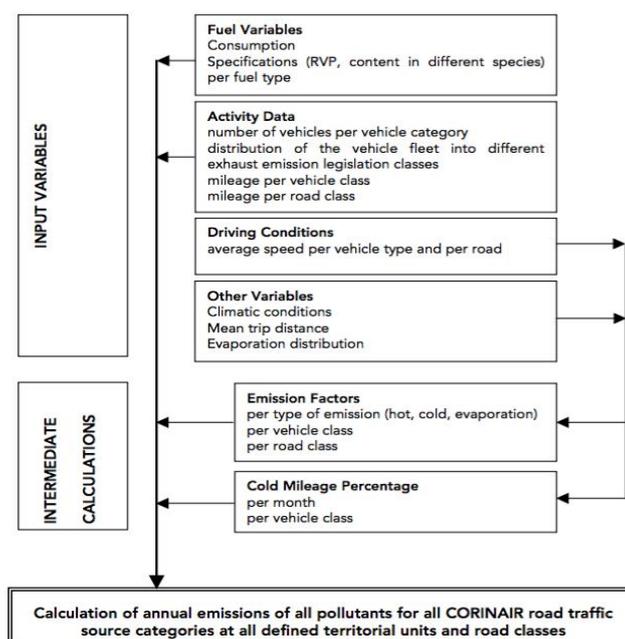


Figura 3.1. Flujoograma metodológico de COPERT 4

Para el cálculo de emisiones en el grupo de autobuses, así como en la agrupación de vehículos de carga pesada tanto gasolina como diésel, COPERT 4 toma en cuenta principalmente el cálculo de las emisiones en caliente, cuyos factores de emisión provienen de la extrapolación de resultados obtenidos para vehículos de menor tamaño, diferenciado solamente para los tres ciclos de conducción: urbano, rural y en autovía. Dentro de este punto de la metodología, [Ntziachristos, et al., 2000] especifican que las dependencias de los factores de emisión con respecto a las velocidades experimentadas han sido construida bajo resultados provistos por la guía metodológica propuesta dentro del German/Swiss Handbook, establecidas en documento adjunto dentro del CD de este TFM.

3.4.1 Secuencia de cálculo de COPERT 4.

Al ser COPERT 4 un software informático, con la finalidad de calcular la contaminación generada por cada categoría bajo las circunstancias de entrada que introduce el usuario, dentro de su esquematización de programación tiene que cumplir una serie de procesos en secuencia determinados a continuación:

- **Cálculo de factores de emisión en caliente (Hot emission factors calculation).** El factor de emisión en caliente es una expresión numérica para la cantidad de contaminación que un vehículo genera por kilómetro en condiciones normales. Para este cálculo se utilizan los siguientes parámetros:
 - ✓ Parámetros del motor.
 - ✓ Año de producción del vehículo.
 - ✓ Modo de conducción.
 - ✓ Velocidad promedio.
- **Cálculo de emisiones en caliente.** En este segundo paso COPERT 4 obtiene una expresión numérica para la cantidad de emisión producida por todos los vehículos de un país en condiciones normales, partiendo de los valores obtenidos en el cálculo de factores de emisión en caliente incluyendo otros parámetros:
 - ✓ Número de vehículos de la flota.
 - ✓ Porcentaje de recorrido en cada ciclo.
 - ✓ Recorrido total de la flota por año.

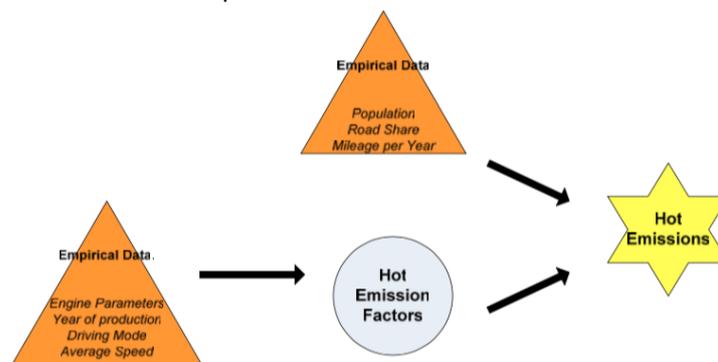


Figura 3.2. Cálculo de emisiones en caliente en COPERT 4

- **Cálculo del factor de emisión en frío (Cold emission factor calculation).** Este factor de emisión representa la contaminación producida por Km por los vehículos cuando no están en estado térmico estable. Sucede en el principio de cualquier viaje. Dentro de esta medición, a parte de los parámetros utilizados en el cálculo de factores de emisión en caliente se utiliza:
 - ✓ Registro de temperatura del país.
 - ✓ Parámetros típicos del motor.

- ✓ Año de producción.
- ✓ Modo de conducción.
- **Cálculo de emisiones en frío.** Este valor representa la contaminación producida en un año por una categoría de vehículos en un país mientras llega el sistema a su estabilización térmica. Para realización de este cálculo la programación informática de COPERT 4 utiliza:
 - ✓ Recorrido del vehículo en ciclo urbano.
 - ✓ Recorrido total de la flota por año.
 - ✓ Total de unidades contenido en la flota por categoría.
 - ✓ Tipo de combustible.
 - ✓ Longitud promedio del viaje.

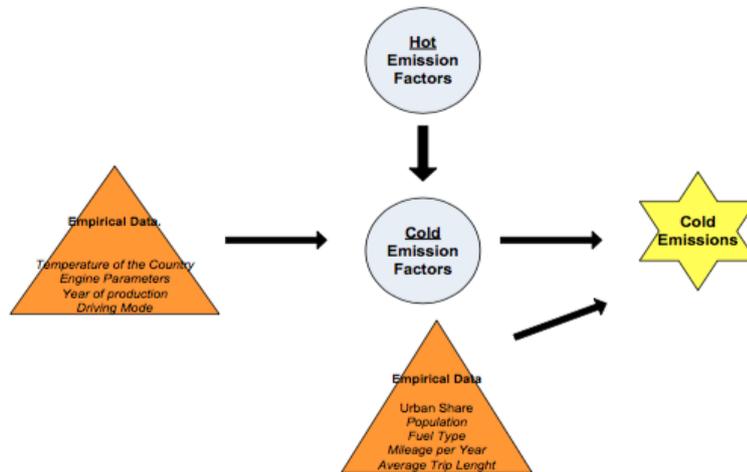


Figura 3.3. Cálculo de emisiones en frío en COPERT 4

Desde el desarrollo de la metodología inicial de COPERT, en sus versiones iniciales, se ha utilizado estas aproximaciones de calculación básica, pero como medida de mejorar la exactitud de los resultados se han introducido en las últimas versiones dos factores de influencia muy importantes, tal como se indica en la figura No. 3.4:

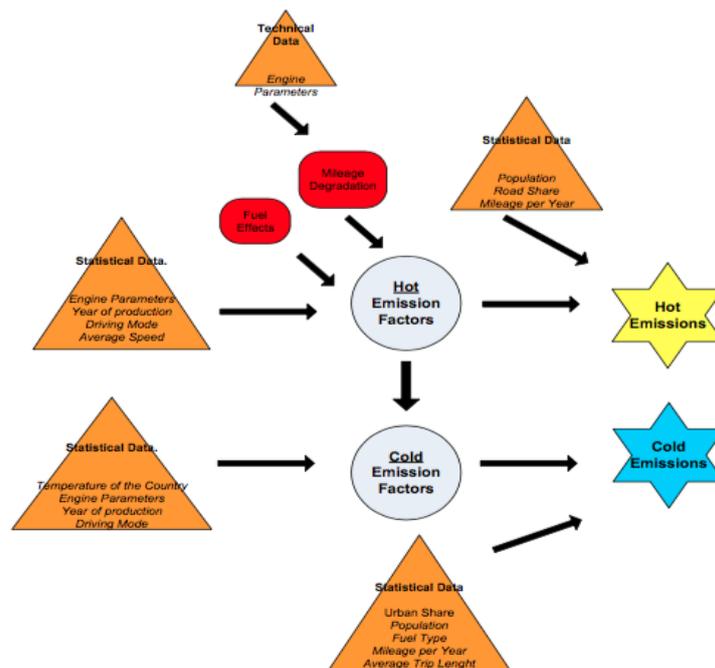


Figura 3.4 Cálculo general final de emisiones en frío y caliente COPERT 4.

- **Cálculo de efecto del combustible.** Este factor participa en el cálculo de los factores de emisión en caliente para ayudar a la obtención de una mayor precisión, ya que se supone que dependiendo de la tecnología el vehículo va a responder de mejor manera a la producción de contaminantes del combustible.
- **Cálculo de degradación por kilometraje.** La influencia de degradación se obtiene por el estado del vehículo con el pasar del tiempo. Este proceso toma en cuenta las millas realizadas por el vehículo desde su construcción, la velocidad realizada en diferentes tramos del camino además de factores inclusivos acerca de los rangos de velocidades. Para autobuses se evidenció que no se toma en cuenta la degradación por kilometraje, comprobado posteriormente.

Si bien es cierto, a la ecuación le falta una parte esencial complementaria, las emisiones por evaporación, tal como lo agregan [Ntziachristos, et al., 2000], debido a la falta de información, las emisiones de evaporación pueden ser solamente estimadas para automóviles de pasajeros a gasolina, vehículos de carga ligera a gasolina y vehículos de dos ruedas, quedando excluidos por el momento los vehículos diésel de carga ligera, vehículos diésel de carga pesada, autobuses y autocares.

3.4.2 Factores de emisión y tipos de agentes contaminantes.

COPERT 4, mediante esta metodología en base a los estatutos de CORINAIR y MEET, hace una gran aproximación a los niveles de producción de emisiones que se podrían obtener mediante documentación experimental, presentando un alto grado de detalle y por tanto de conocimiento. En base a los hechos propuestos anteriormente, la MEET clasifica a los agentes contaminantes dentro de tres niveles:

- **Nivel 1:** incluye los agentes contaminantes para los cuales existen datos para la definición de los factores de emisión representativos con un alto grado de certeza.

Pollutant	Equivalent
Carbon monoxide (CO)	Given as CO
Nitrogen oxides (NO _x : NO and NO ₂)	Given as NO ₂ equivalent
Volatile organic compounds (VOCs)	Given as CH _{1.85} equivalent (also given as HC in emission standards)
Methane (CH ₄)	Given as CH ₄
Non-methane VOCs (NMVOCs)	Given as VOCs (or HC) minus CH ₄
Nitrous oxide (N ₂ O)	Given as N ₂ O
Ammonia (NH ₃)	Given as NH ₃
Particulate matter (PM)	The mass of particles collected on a filter kept below 52 °C during diluted exhaust sampling. This corresponds to PM _{2.5} . Coarse exhaust PM (i.e. > 2.5 µm diameter) is considered to be negligible, hence PM=PM _{2.5} .
PM number and surface area	Given as particle number and particle active surface per kilometre, respectively

Figura 3.5 Tipos de agente contaminantes de nivel 1 COPERT 4

- **Nivel 2:** este nivel incluye los agentes contaminantes para los cuales, los datos existentes sobre los factores de emisión no pueden considerarse representativos: los factores de la emisión dados por los agentes contaminantes del nivel 2 son considerados solamente como una indicación de orden de la magnitud.

Pollutant	Equivalent
Carbon dioxide (CO ₂)	Given as CO ₂
Sulphur dioxide (SO ₂)	Given as SO ₂
Lead (Pb)	Given as Pb
Arsenic (As)	Given as As
Cadmium (Cd)	Given as Cd
Chromium (Cr)	Given as Cr
Copper (Cu)	Given as Cu
Mercury (Hg)	Given as Hg
Nickel (Ni)	Given as Ni
Selenium (Se)	Given as Se
Zinc (Zn)	Given as Zn

Figura 3.6 Tipos de agente contaminantes de nivel 2 COPERT 4

- **Nivel 3:** incluye los agentes contaminantes para los cuales hay muy pocos datos, y los factores de emisión no deben ser facilitados por su poca representatividad.

Pollutant	Equivalent
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and persistent organic pollutants (POPs)	Detailed speciation, including indeno(1,2,3-cd) pyrene, benzo(k)fluoranthene, benzo(b)fluoranthene, benzo(g,h,i)perylene, fluoranthene, benzo(a)pyrene
Polychlorinated dibenzo dioxins (PCDDs) and polychlorinated dibenzo furans (PCDFs)	Given as dioxins and furans respectively

Pollutant	Equivalent
Alkanes (C _n H _{2n+2}):	Given in alkanes speciation
Alkenes (C _n H _{2n}):	Given in alkenes speciation
Alkynes (C _n H _{2n-2}):	Given in alkynes speciation
Aldehydes (C _n H _{2n} O)	Given in aldehydes speciation
Ketones (C _n H _{2n} O)	Given in ketones speciation
Cycloalkanes (C _n H _{2n})	Given as cycloalkanes
Aromatic compounds	Given in aromatics speciation

Figura 3.7 Tipos de agente contaminantes de nivel 3 COPERT 4

A partir de estos niveles COPERT agrupa a los agentes contaminantes de acuerdo a tres métodos, como se presenta a continuación en la figura No. 3.8.

Method	Pollutants
Emission factors	CO, NO _x , NMVOC, CH ₄ , N ₂ O, NH ₃ , PM incl. PM _{2.5} , PM ₁₀ , EC etc., PM number and surface area
Fuel consumption based	CO ₂ , SO ₂ , Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn
Percentage of total VOC	PAHs, POPs, dioxins, furans, alkanes, alkenes, alkynes, aldehydes, ketones, cycloalkanes, aromatics

Figura 3.8 Tipos de agente contaminantes de acuerdo a metodología COPERT 4

4. INTRODUCCIÓN DE DATOS EN COPERT 4.

Para la comprensión inicial del manejo e introducción de información en el software COPERT 4 se explicará el funcionamiento del mismo desde el punto de vista de dos enfoques: un enfoque inicial modelo donde se obtendrá la información de consumo de combustible y emisiones contaminantes para un vehículo en un recorrido de un kilómetro, con su respectivo tiempo empleado para cubrir este recorrido, y un segundo enfoque donde se empleará el caso de las flotas de transporte público de la ciudad de Ambato desde una perspectiva hipotética donde se supondría una ciudad completamente plana con respecto a una segunda situación donde ya se aplicaría las suposiciones de pendientes propias de la orografía local.

El ingreso de información en la interfaz gráfica de usuario GUI del programa informático sigue el siguiente diagrama de casos de uso:



Figura 4.1 Diagrama de casos de uso GUI COPERT 4.

4.1 Caso inicial modelo (1 vehículo – recorrido 1km)

4.1.1 Selección de país y año.

Para la ciudad de Ambato, desde un enfoque inicial modelo donde queremos conocer el comportamiento del programa en un análisis de un solo vehículo por cada tipología de flota existente en los tres años que se pretende realizar (2000, 2007 y 2015), en la selección de país y año se introduce la información mostrada en la Tabla No. 4.1.

	Recorrido medio Ltrip (km)	Tiempo de recorrido t_trip (h)
Caso inicial modelo	1	0,05

Tabla 4.1. Valores de recorrido medio y tiempo de recorrido – caso inicial modelo

Los valores de recorrido medio y tiempo de recorrido, como se especifica dentro del manual de COPERT, de manera conjunta con el valor de temperatura media mensual y el porcentaje de circulación del motor en frío, se utilizan en el establecimiento de los factores de emisión en frío, pero como se adhirió en apartados anteriores, en el caso de vehículos de carga pesada, autobuses y autocares, tanto diésel como gasolina, los factores de emisión en frío no son incluidos en el análisis. Al ser determinado para tres años, se debe hacer un ingreso de año en la opción **Select/Add Country and Year**, quedando como resultado una ventana como la expuesta en la figura No. 4.2.

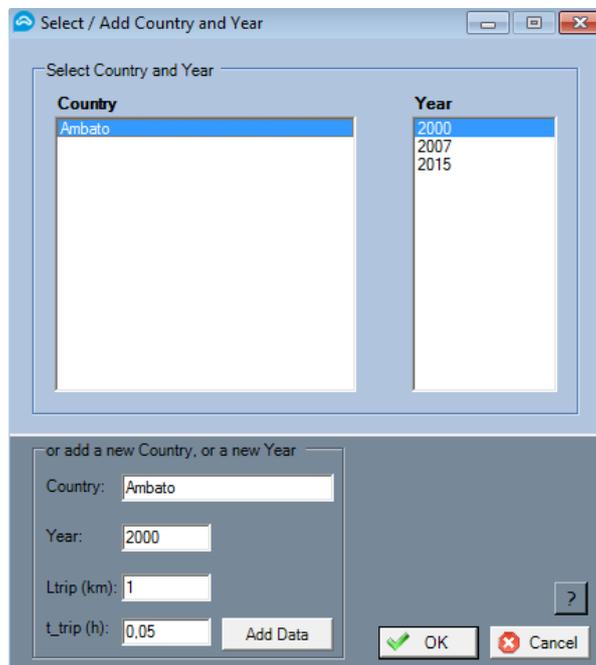


Figura 4.2 Ventana “Select/Add Country and Year”

4.1.2 Información específica de la ciudad.

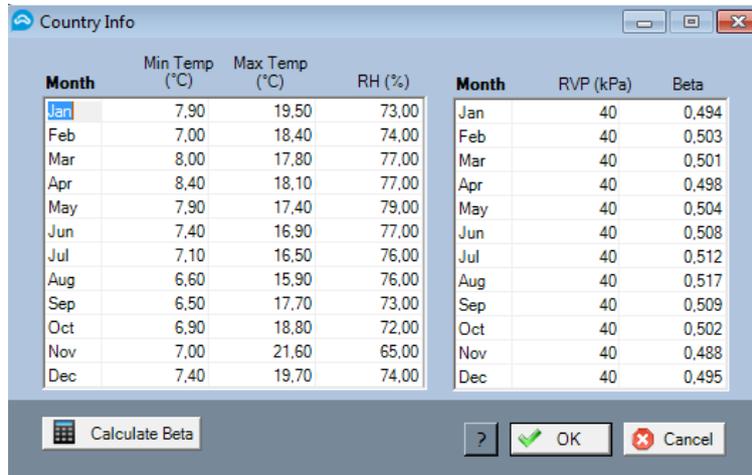
Posterior al ingreso de ciudad y los años que se van a realizar los análisis específicos, COPERT 4 brinda la posibilidad de ingresar información propia de la ciudad, siendo estos valores de tipo meteorológicos (temperatura registrada, humedad relativa) y el valor de presión de vapor Reid (Reid vapor pressure) del combustible.

La información meteorológica para la ciudad de Ambato se toma directamente del Anuario Meteorológico realizado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la República del Ecuador, No. 52-2012, tomados de la estación Querochaca (Universidad Técnica de Ambato), para los respectivos años, cuyos registros completos se presentan dentro del Anexo No. 1.

Citando lo redactado dentro de la Norma NTE INEN 0928 (1984): Productos de petróleo. Determinación de la presión de vapor Reid (documento adjunto en CD de TFM), enuncia que dicha presión RVP es aproximadamente la presión de vapor de un material a 37,8°C, que difiere de la presión de vapor verdadera, debido a una pequeña vaporización de la muestra y a la presencia de vapor de agua y de

aire en el espacio confinado de la cámara en la que se realiza la determinación de su valor. El vapor de RVP para los hidrocarburos en Ecuador es de aproximadamente 40 kPa.

El factor Beta β es el porcentaje del tiempo que el vehículo está funcionando con el motor frío. COPERT 4 da la opción de cálculo de este valor mediante la opción **Calculate Beta**. Ingresados los valores se presenta una ventana como la indicada en la figura 4.3, con los datos anuales presentados en la Tabla No. 4.2.



Month	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)	RH (%)	Month	RVP (kPa)	Beta
Jan	7,90	19,50	73,00	Jan	40	0,494
Feb	7,00	18,40	74,00	Feb	40	0,503
Mar	8,00	17,80	77,00	Mar	40	0,501
Apr	8,40	18,10	77,00	Apr	40	0,498
May	7,90	17,40	79,00	May	40	0,504
Jun	7,40	16,90	77,00	Jun	40	0,508
Jul	7,10	16,50	76,00	Jul	40	0,512
Aug	6,60	15,90	76,00	Aug	40	0,517
Sep	6,50	17,70	73,00	Sep	40	0,509
Oct	6,90	18,80	72,00	Oct	40	0,502
Nov	7,00	21,60	65,00	Nov	40	0,488
Dec	7,40	19,70	74,00	Dec	40	0,495

Figura 4.3 Ventana "Country Info"

Mes	Año 2000				Año 2007				Año 2015			
	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)	RH (%)	RVP (kPa)	Min Temp. (°C)	Max Temp (°C)	RH (%)	RVP (kPa)	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)	RH (%)	RVP (kPa)
Ene.	7,9	19,5	73,0	40	9,3	19,1	77,0	40	8,4	19,7	76,0	40
Feb.	7,0	18,4	74,0	40	7,0	20,2	70,0	40	8,1	19,1	75,0	40
Mar.	8,0	17,8	77,0	40	8,5	18,7	76,0	40	8,4	18,8	77,0	40
Abr.	8,4	18,1	77,0	40	8,7	18,7	79,0	40	8,1	19,3	78,0	40
May.	7,9	17,4	79,0	40	8,5	19,0	78,0	40	8,3	17,4	78,0	40
Jun.	7,4	16,9	77,0	40	8,3	16,0	83,0	40	7,3	18,0	75,0	40
Jul.	7,1	16,5	76,0	40	6,0	18,0	77,0	40	7,1	16,8	76,0	40
Ago.	6,6	15,9	76,0	40	6,8	17,0	79,0	40	6,1	17,0	75,0	40
Sep.	6,5	17,7	73,0	40	6,8	16,0	80,0	40	6,4	17,3	75,0	40
Oct.	6,9	18,8	72,0	40	7,1	19,6	76,0	40	7,8	19,5	74,0	40
Nov.	7,0	21,6	65,0	40	7,7	19,8	77,0	40	7,8	20,4	74,0	40
Dic.	7,4	19,7	74,0	40	7,9	19,7	77,0	40	7,8	20,5	71,0	40

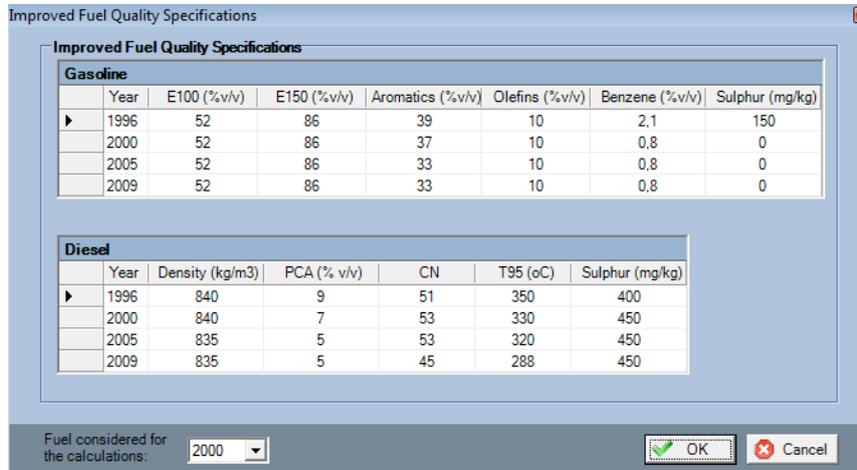
Tabla 4.2 Valores de temperatura, humedad relativa y presión de vapor Reid

4.1.3 Información técnica del combustible.

COPERT 4, dentro de la información de ingreso requerida para su análisis, sostiene un apartado de ingreso de las especificaciones de la calidad mejorada del combustible (**Improved Fuel Quality Specifications**), donde se pueden ingresar datos propios del tipo de combustible utilizado en la región a estudiar. De forma definida para el Diésel, combustible común utilizado en los autobuses en la región ecuatoriana, se pueden ingresar los valores de densidad del combustible (kg/m^3), porcentaje de componentes aromáticos PCA (%v/v), el número de Cetano CN, el T95 o temperatura a la que el 90% - 95% del diésel se evapora y el contenido de azufre en el combustible (mg/kg).

La información del diésel utilizado en Ecuador fue tomada de los registros llevados a cabo por Petroecuador, del Informe Técnico 2673-GCA-REC-12 de análisis de combustibles del Distrito

Metropolitano de Quito, y los requisitos expuestos dentro de la norma NTE INEN 1489:2011 Quinta Revisión, de Productos Derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos. Para cada año se tomará en cuenta las características del Diésel para cada reforma empleada de forma nacional, tal como se apunta en la Tabla No. 4.3 y la figura No. 4.4.



Improved Fuel Quality Specifications

Improved Fuel Quality Specifications							
Gasoline							
Year	E100 (%v/v)	E150 (%v/v)	Aromatics (%v/v)	Olefins (%v/v)	Benzene (%v/v)	Sulphur (mg/kg)	
1996	52	86	39	10	2,1	150	
2000	52	86	37	10	0,8	0	
2005	52	86	33	10	0,8	0	
2009	52	86	33	10	0,8	0	

Diesel						
Year	Density (kg/m3)	PCA (% v/v)	CN	T95 (oC)	Sulphur (mg/kg)	
1996	840	9	51	350	400	
2000	840	7	53	330	450	
2005	835	5	53	320	450	
2009	835	5	45	288	450	

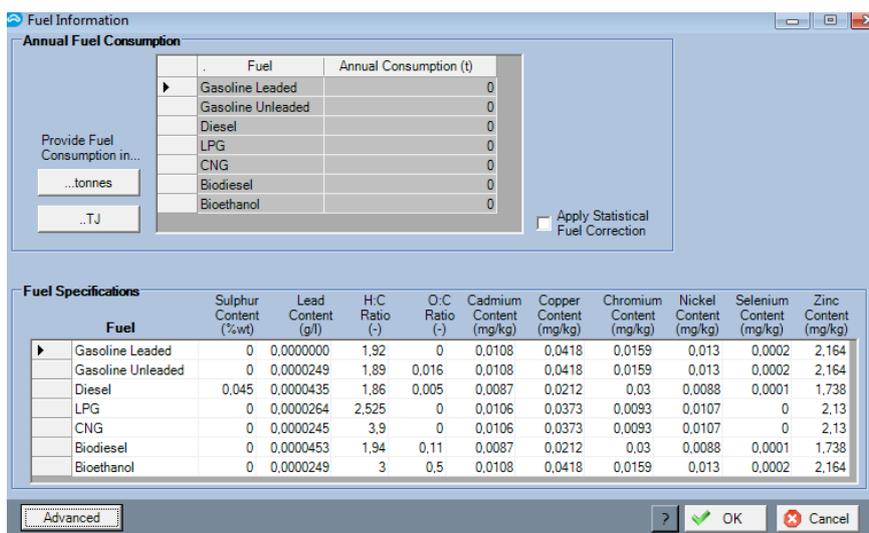
Fuel considered for the calculations: 2000

Figura 4.4 Ventana “Improved Fuel Quality Specifications”

Año	Densidad (kg/m^3)	PCA (% v/v)	CN	T95 (°C)	Azufre (mg/kg)
2000	840	7	53	330	450
2005	835	5	53	320	450
2009	835	5	45	288	450

Tabla 4.3 Características de Diésel para Ecuador.

Adicional al ingreso de información técnica detallada del combustible utilizado por el parque automotor, COPERT 4 permite además aplicar una serie de **factores de corrección de combustible estadísticos**, los mismos que tienen estrecha relación con los valores reales registrados de forma experimental durante el año para dicho recorrido (Annual Consumption), los mismos que favorecen una herramienta de validación del cálculo informático realizado por el software. En el caso de la ciudad de Ambato, al no tener un antecedente de información registrada del consumo de combustible por la flota, no se puede ingresar este valor, ni aplicar este factor de corrección.



Fuel Information

Annual Fuel Consumption

Fuel	Annual Consumption (t)
Gasoline Leaded	0
Gasoline Unleaded	0
Diesel	0
LPG	0
CNG	0
Biodiesel	0
Bioethanol	0

Provide Fuel Consumption in...

Apply Statistical Fuel Correction

Fuel Specifications

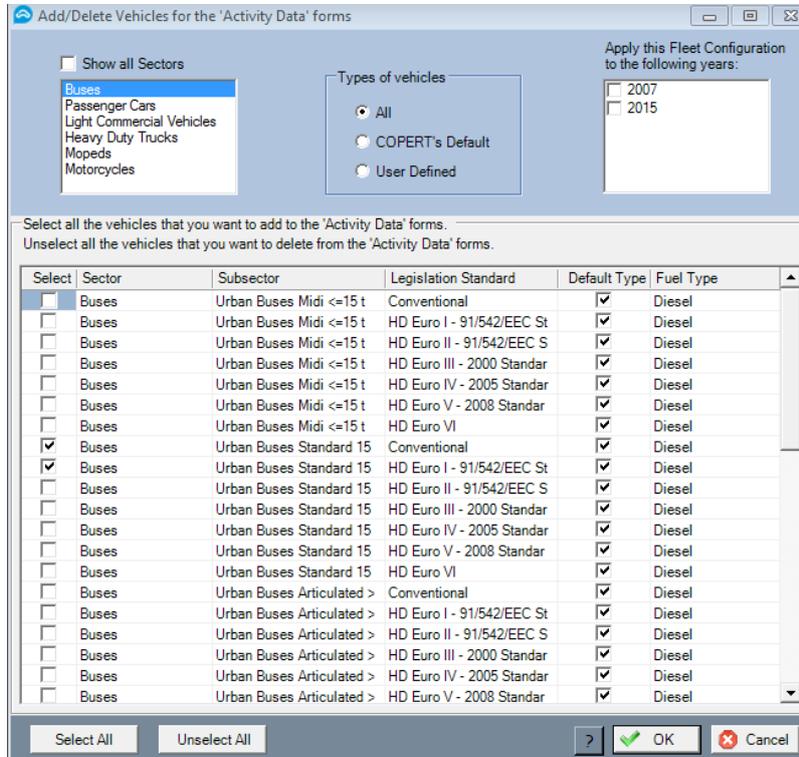
Fuel	Sulphur Content (%wt)	Lead Content (g/l)	H:C Ratio (-)	O:C Ratio (-)	Cadmium Content (mg/kg)	Copper Content (mg/kg)	Chromium Content (mg/kg)	Nickel Content (mg/kg)	Selenium Content (mg/kg)	Zinc Content (mg/kg)
Gasoline Leaded	0	0,0000000	1,92	0	0,0108	0,0418	0,0159	0,013	0,0002	2,164
Gasoline Unleaded	0	0,0000249	1,89	0,016	0,0108	0,0418	0,0159	0,013	0,0002	2,164
Diesel	0,045	0,0000435	1,86	0,005	0,0087	0,0212	0,03	0,0088	0,0001	1,738
LPG	0	0,0000264	2,525	0	0,0106	0,0373	0,0093	0,0107	0	2,13
CNG	0	0,0000245	3,9	0	0,0106	0,0373	0,0093	0,0107	0	2,13
Biodiesel	0	0,0000453	1,94	0,11	0,0087	0,0212	0,03	0,0088	0,0001	1,738
Bioethanol	0	0,0000249	3	0,5	0,0108	0,0418	0,0159	0,013	0,0002	2,164

Advanced

Figura 4.5 Ventana “Fuel Information”

4.1.4 Selección de vehículos para ingreso de actividad de la flota.

Dentro de esta opción, se indican todas las categorías existentes dentro de la base de datos de COPERT, tanto para vehículos de pasajeros, vehículos livianos comerciales, camiones de carga pesada, buses, ciclomotores y motocicletas, diferenciándolos por peso estructural, legislación de control de emisiones y tipo de combustible (Figura No. 4.6).



Apply this Fleet Configuration to the following years:

2007
 2015

Select all the vehicles that you want to add to the 'Activity Data' forms.
Unselect all the vehicles that you want to delete from the 'Activity Data' forms.

Select	Sector	Subsector	Legislation Standard	Default Type	Fuel Type
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	Conventional	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	HD Euro I - 91/542/EEC St	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	HD Euro II - 91/542/EEC S	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	HD Euro III - 2000 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	HD Euro IV - 2005 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	HD Euro V - 2008 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Midi <=15 t	HD Euro VI	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input checked="" type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	Conventional	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	HD Euro I - 91/542/EEC St	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	HD Euro II - 91/542/EEC S	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	HD Euro III - 2000 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	HD Euro IV - 2005 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	HD Euro V - 2008 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Standard 15	HD Euro VI	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Articulated >	Conventional	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Articulated >	HD Euro I - 91/542/EEC St	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Articulated >	HD Euro II - 91/542/EEC S	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Articulated >	HD Euro III - 2000 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Articulated >	HD Euro IV - 2005 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel
<input type="checkbox"/>	Buses	Urban Buses Articulated >	HD Euro V - 2008 Standar	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel

Select All Unselect All > OK Cancel

Figura 4.6 Ventana “Add/Delete Vehicles for the Activity Data forms”

Para la ciudad de Ambato, específicamente para las flotas de vehículos que proveen el servicio de transporte urbano, solamente se seleccionan los siguientes subsectores:

- Urban Buses Standar 15t – Conventional – Diésel.
- Urban Buses Standar 15t – HD Euro I – 91/542/EEC Stage – Diésel.
- Urban Buses Standar 15t – HD Euro II – 91/542/EEC Stage – Diésel.
- Urban Buses Standar 15t – HD Euro III – 2000 Standars – Diésel.

En el territorio Ecuatoriano, así como en gran parte de Latinoamérica, al existir un retraso de aplicación de normativas de control de emisiones con respecto a las empleadas en territorio europeo, tiene como máxima legislación utilizada la norma Euro III, por lo que dentro del presente análisis no se utilizan aquellas posteriores a esta.

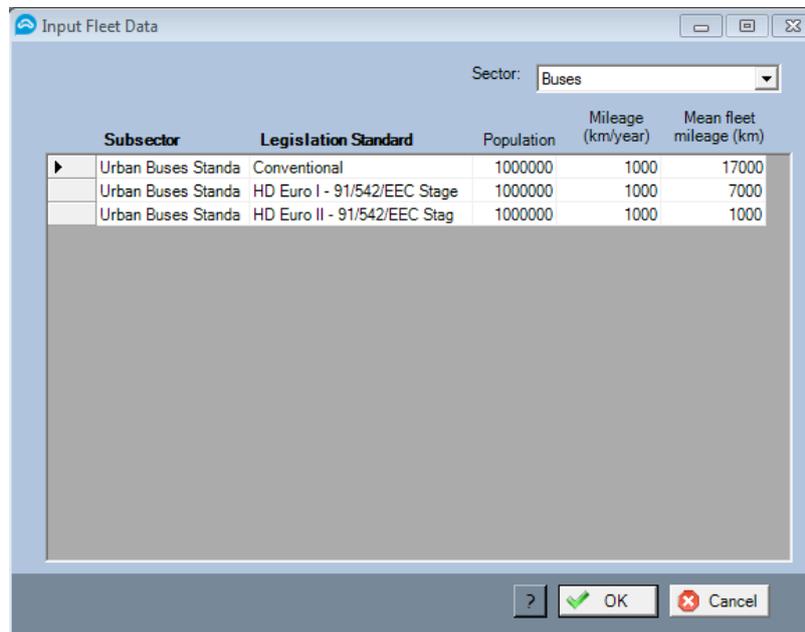
4.1.5 Datos de entrada de la flota – Caso inicial modelo

En el caso inicial modelo, se pretender verificar el comportamiento de software únicamente para las características del espacio temporal utilizadas posteriormente en el caso indicado para la ciudad de Ambato, tanto en su enfoque plano completo y el correspondiente enfoque real con participación activa del porcentaje de pendiente positiva y negativa.

El software por denominación, y al estar diseñado para el cálculo de emisiones de flotas de transporte de gran tamaño, mantiene unas unidades de magnitud de peso y volumen del orden de toneladas y kilogramos, por lo que para poder aplicarlo al caso inicial modelo se requiere multiplicar la información de flota de entrada por un millón, y se supone un recorrido anual de 1000 km, lo que a análisis posterior

se llevaría a cabo el análisis contrario a partir de los resultados obtenidos, para verificar el valor real de emisiones para un solo vehículo.

Así, los datos de entrada de la flota para el caso inicial modelo se expresan de acuerdo a las tablas No. 4.4, 4.5 y 4.6, quedando la ventana de “input fleet data” acorde a la figura No. 4.7.



Subsector	Legislation Standard	Population	Mileage (km/year)	Mean fleet mileage (km)
Urban Buses Standar	Conventional	1000000	1000	17000
Urban Buses Standar	HD Euro I - 91/542/EEC Stage	1000000	1000	7000
Urban Buses Standar	HD Euro II - 91/542/EEC Stag	1000000	1000	1000

Figura 4.7 Ventana “Input Fleet Data”

Subsector	Legislation Standard	Population	Mileage (km/year)	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	Conventional	1000000	1000	10000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	1000000	1000	1000

Tabla 4.4. Datos de entrada caso inicial modelo – año 2000

Subsector	Legislation Standard	Population	Mileage (km/year)	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	Conventional	1000000	1000	17000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	1000000	1000	7000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	1000000	1000	1000

Tabla 4.5 Datos de entrada caso inicial modelo – año 2007

Subsector	Legislation Standard	Population	Mileage (km/year)	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	1000000	1000	15000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	1000000	1000	8000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro III – 2000 standars	1000000	1000	5000

Tabla 4.6 Datos de entrada caso inicial modelo – año 2015

Como se observa, el parámetro de kilometraje por año es de 1000 km/año en razón de que, como se acotó anteriormente, el software está indicado para flotas de vehículos de gran tamaño, y con un recorrido de kilómetros elevado, por lo que en el análisis final hay que dividirlo por el número de kilómetros y el número de unidades dispuesto, con la finalidad de obtener el comportamiento por vehículo por kilómetro recorrido.

El valor de kilometraje total de la flota, o “Mean fleet mileage (km)” indica al programa indirectamente el número de años que se encuentra recorriendo la flota desde su producción aproximadamente, valor indicado para en el caso de los vehículos livianos de pasajeros poder establecer la degradación por kilometraje, pero en el caso de las flotas de vehículos de transporte público mediante el uso de buses de tipología estándar de 15 toneladas, como se puede verificar posteriormente, la degradación por antigüedad de la flota no se aplica. El valor de “Mean fleet mileage” se obtiene a partir de la multiplicación de los kilómetros/año por el número de años que está la flota a ese momento, siguiendo los valores indicados en las tablas No. 4.7, No. 4.8 y No. 4.9.

Subsector	Legislation Standard	Mileage (km/year)	Años activos de la flota	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	Conventional	1000	10	10000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	1000	1	1000

Tabla 4.7. Kilometraje de la flota caso inicial modelo – año 2000

Subsector	Legislation Standard	Mileage (km/year)	Años activos de la flota	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	Conventional	1000	17	17000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	1000	7	7000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	1000	1	1000

Tabla 4.8 Datos de entrada caso inicial modelo – año 2007

Subsector	Legislation Standard	Mileage (km/year)	Años activos de la flota	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	1000	15	15000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	1000	8	8000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro III – 2000 standars	1000	5	5000

Tabla 4.9 Datos de entrada caso inicial modelo – año 2015

4.1.6 Datos de entrada de velocidad de circulación.

El apartado de ingreso de información de velocidad de circulación, incluyendo además el porcentaje de participación dentro del tipo de carretera, permite la caracterización completa del tipo de recorrido que realizan los vehículos a ser analizados, con lo que COPERT a través de los ciclos de conducción específicos puede obtener los respectivos valores de los factores de emisión correspondientes.

Dentro de COPERT 4 se especifican tres segmentaciones del ciclo de conducción: urban cycle (ciclo urbano), rural cycle (ciclo rural) y highway cycle (autopista o autovía). En el caso del transporte público de la ciudad de Ambato se especifica una velocidad media de 25 km/h, con un porcentaje de

participación de 100% de ciclo urbano (Tabla No. 4.10). Dentro del análisis del caso inicial modelo, se añaden 2 posibilidades más (velocidades a 20km/h, y 35km/h) para poder visualizar el comportamiento del consumo de combustible y emisiones con respecto al cambio de la velocidad media del vehículo.

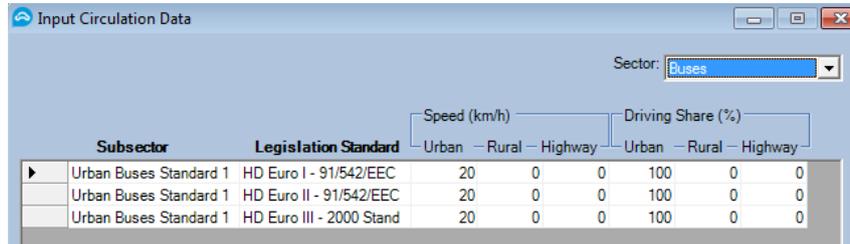


Figura 4.7 Ventana “Input Circulation Data”

Subsector	Legislation Standar	Velocidad = 20 km/h		Velocidad = 25 km/h		Velocidad = 35 km/h	
		Urban	Urban	Urban	Urban	Urban	Urban
		Speed (km/h)	Driving Share (%)	Speed (km/h)	Driving Share (%)	Speed (km/h)	Driving Share (%)
Urban Buses Standar. 15 toneladas	Conventional	20	100	25	100	35	100
	HD Euro I - 91/542/EEC Stage	20	100	25	100	35	100
	HD Euro II - 91/542/EEC Stage	20	100	25	100	35	100
	HD Euro III - 2000 standards	20	100	25	100	35	100

Tabla 4.10. Input circulation data – velocidades 20km/h, 25km/h y 35km/h.

4.1.7 Emisiones de CO2 debido al aceite lubricante.

Al estar el aceite en continuo proceso de lubricación de los componentes estructurales del motor en la combustión interna, estos también producen una cantidad de emisiones por su consumo. COPERT 4 toma en cuenta este proceso de emisiones y lo agrega a las emisiones de CO2 generales del proceso mismo de la combustión, cuyos factores de emisión los calcula por defecto el mismo software, dando además la posibilidad de incluir un valor propio del usuario.

Para poder incluir el valor de emisión de CO2 debido al aceite lubricante, en la pestaña “CO2 Emissions Factors due to lube-oil” se debe seleccionar la opción de “Add CO2 emissions due to lube oil”, con lo que el software incorpora estos valores a los de producción de CO2 totales. (Figura No. 4.8)

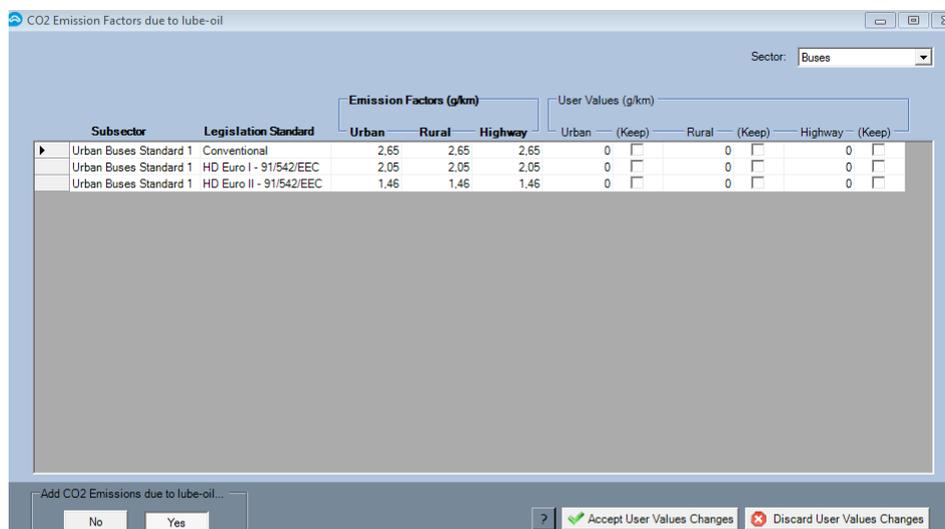


Figura 4.8 Ventana “CO2 Emissions Factors due to lube-oil”

Subsector	Legislation Standar	Emission Factor (g/km)		
		Urban	Rural	Highway
Urban Buses Standar. 15 toneladas	Conventional	2,65	2,65	2,65
	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	2,05	2,05	2,05
	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	1,46	1,46	1,46
	HD Euro III – 2000 standars	0,861	0,861	0,861

Tabla 4.11 Factores de emisión por consumo de aceite lubricante predeterminados COPERT 4

4.1.8 Datos de selección de carga del vehículo y número de ejes.

El comportamiento de las emisiones de acuerdo al nivel de carga y el número de ejes del que este compuesto el vehículo es evidente, por lo que COPERT 4, especialmente para el caso de autobuses, autocares y vehículos de carga pesada, incluye el factor de incremento de emisión por carga de vehículo y numero de ejes. Se considera que el autobus tiene un margen de carga desde 0% (carga solamente estructural, sin carga por ocupantes) hasta una carga de 100% (carga estructural más carga ocupacional completa).

Los factores de emisión producidos por el nivel de carga del vehículo y número de ejes se aplica dentro de los cálculos de emisión en caliente (hot emissions), los mismos que son determinados para autobuses por preferencia, siendo además incluidos en el cálculo de emisiones de material particulado. En el análisis propuesto dentro del caso inicial modelo, se identifican 3 posibilidades de carga (0%, 50% y 100%), siempre con el mismo número de ejes, a velocidad base 20 km/h, ya que la flota real de buses en Ambato siempre mantiene dos ejes en su configuración. Para hacer efectiva la corrección por carga, se debe seleccionar “Apply Load Correction”.

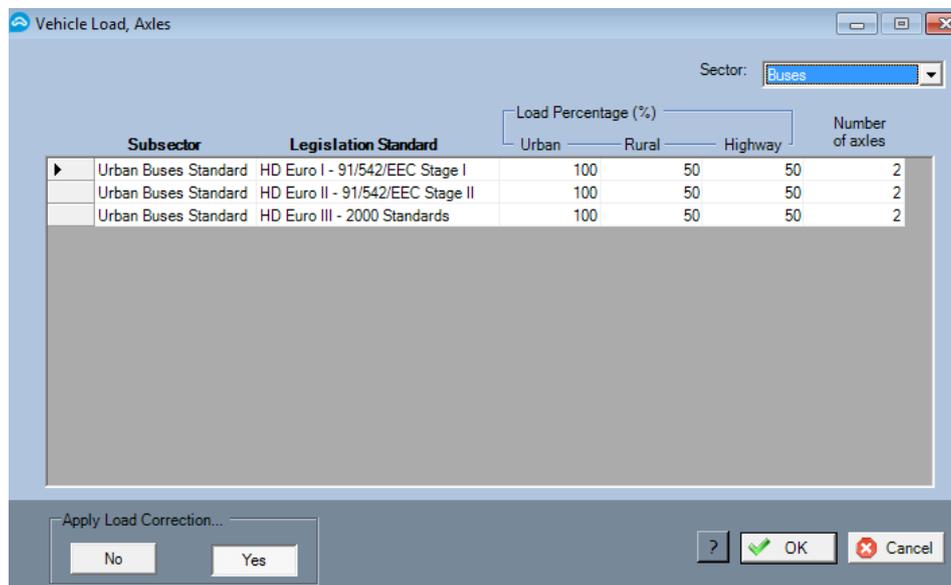


Figura 4.9 Ventana “Vehicle Load, Axles”

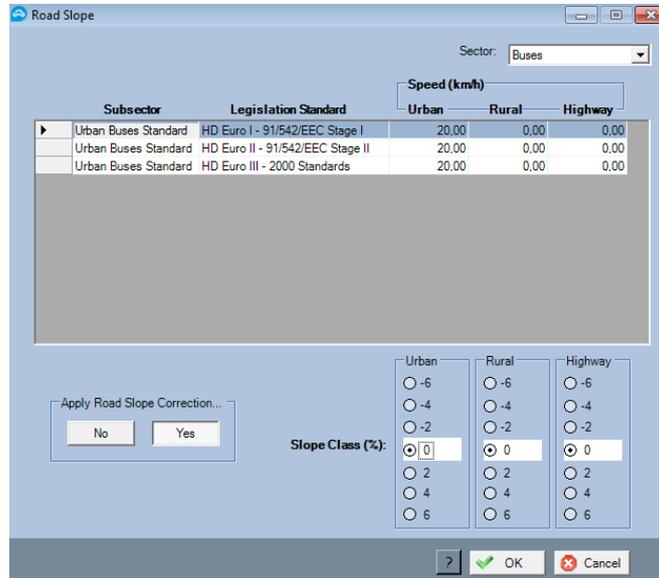
4.1.9 Datos de aplicación de pendiente en carretera.

La aplicación de los datos de pendiente en carretera es de gran utilidad, sobre todo en casos de ajuste del modelo a ciudades con una orografía variada, como es el determinado para la ciudad de Ambato. COPERT 4 permite así el ingreso de información por porcentaje de pendiente en el apartado “Road Slope”, donde a las categorías introducidas en la flota se les puede aplicar distinto ángulo de acuerdo a criterios del investigador.

Existen dentro de sus opciones 6 posibilidades de pendiente (3 opciones de pendiente positiva y 3 opciones de pendiente negativa) para cada modo de conducción. Estos parámetros, después de la

realización de los cálculos correspondientes, sus factores de emisión por pendiente son agregados al cálculo final de factores de emisión por caliente.

Para comprensión de la afeción de la pendiente dentro de la metodología de COPERT 4, en el caso modelo inicial se hace un estudio de la variación de la cantidad de emisión producida en todas las opciones de pendiente, tanto positiva como negativa, cuyos resultados posteriormente serán expuestos en el apartado de resultados didácticos de comprensión de COPERT 4.



Sector: Buses

Speed (km/h): Urban Rural Highway

Subsector	Legislation Standard	Urban	Rural	Highway
Urban Buses Standard	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	20.00	0.00	0.00
Urban Buses Standard	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	20.00	0.00	0.00
Urban Buses Standard	HD Euro III - 2000 Standards	20.00	0.00	0.00

Apply Road Slope Correction...

Slope Class (%):

Urban	Rural	Highway
<input type="radio"/> -6	<input type="radio"/> -6	<input type="radio"/> -6
<input type="radio"/> -4	<input type="radio"/> -4	<input type="radio"/> -4
<input type="radio"/> -2	<input type="radio"/> -2	<input type="radio"/> -2
<input checked="" type="radio"/> 0	<input checked="" type="radio"/> 0	<input checked="" type="radio"/> 0
<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 2
<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 6

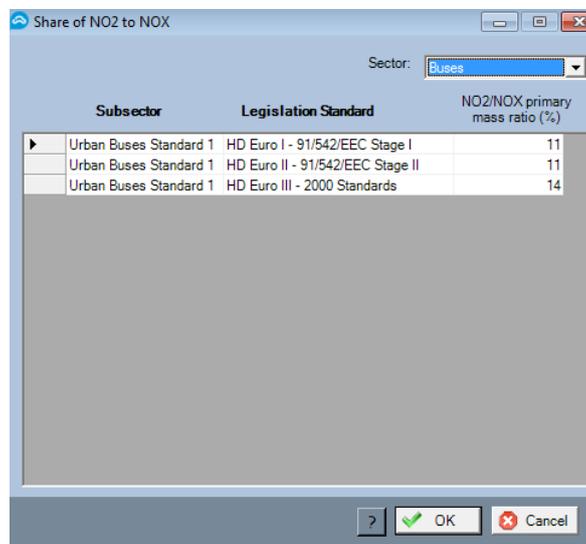
?

Figura 4.10 Ventana "Road Slope"

4.1.10 Relación de NO₂ a NO_x

El término general de óxidos de nitrógeno engloba desde un punto de vista formal a varios compuestos con relación al nitrógeno (NO , NO_2 , N_2O_2 , N_2O_4 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_5 y NO_3), pero tal como lo agrega [Bahamonde, 2001], generalmente dicho término se aplica solo al NO y al NO_2 por su presencia mayoritaria y la facilidad de transformación mutua en presencia del O_2 del aire.

De esta forma, la determinación de la relación de NO_2 a NO_x es importante en el desarrollo de la estimación de emisiones, existiendo la posibilidad de incluirla en COPERT 4, cuyos valores son automáticamente calculados por el software y presentados en la ventana respectiva (Figura 4.11).



Sector: Buses

Subsector	Legislation Standard	NO ₂ /NO _x primary mass ratio (%)
Urban Buses Standard 1	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	11
Urban Buses Standard 1	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	11
Urban Buses Standard 1	HD Euro III - 2000 Standards	14

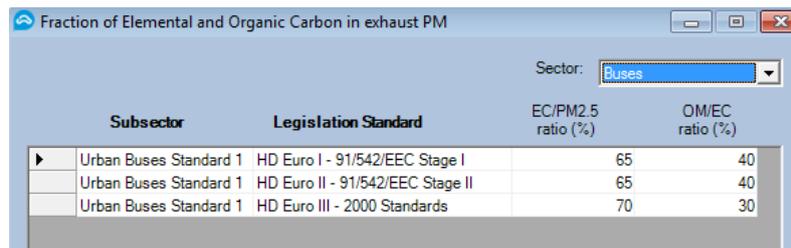
?

Figura 4.11. Ventana "Share of NO₂ to NO_x"

4.1.11 Fracción de Carbono elemental y Carbono orgánico en PM.

Por definición, tanto el carbono elemental como el carbono orgánico provienen directamente de los procesos de combustión, formadas por un centro de carbono elemental, cubierto por una capa superficial de compuestos orgánicos semi volátiles. El carbono orgánico y el carbono elemental contenido en el material particulado con diámetro menos a 10 micrómetros afecta de manera significativa la salud de las personas por lo que es de vital importancia el conocimiento de sus concentraciones dentro de las fuentes de emisión.

COPERT 4 expone dentro del apartado “Fraction of Elemental and Organic Carbon in exhaust PM” la fracción de relación entre el carbono elemental y el carbono orgánico con respecto al material particulado. Estos valores son presentados automáticamente por el software, los mismos que pueden ser modificados para ajustarse a métodos experimentales.



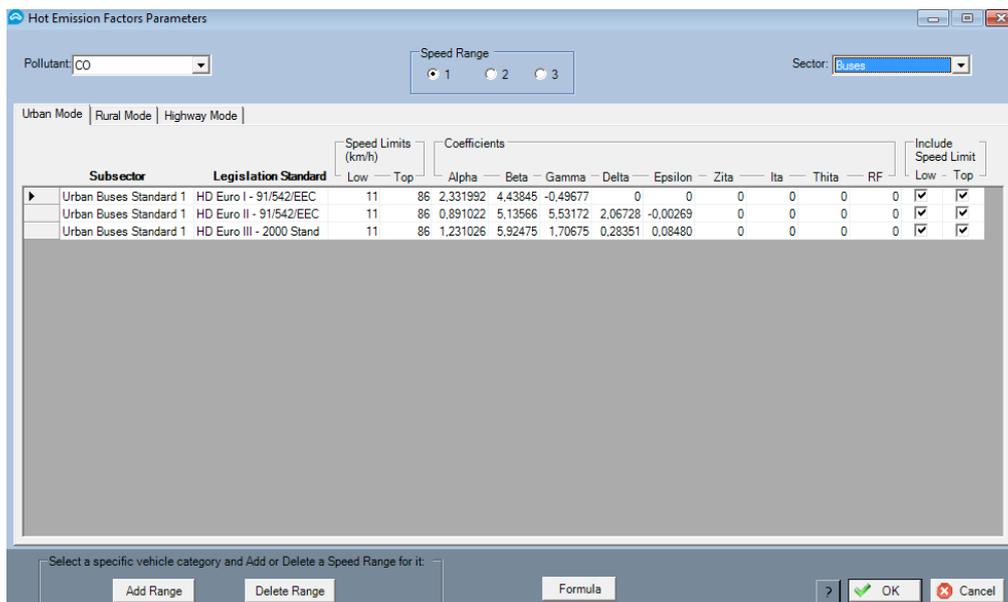
Subsector	Legislation Standard	EC/PM2.5 ratio (%)	OM/EC ratio (%)
Urban Buses Standard 1	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I	65	40
Urban Buses Standard 1	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II	65	40
Urban Buses Standard 1	HD Euro III - 2000 Standards	70	30

Figura 4.12. Ventana “Fraction of Elemental and Organic Carbon in exhaust PM”

4.1.12 Parámetros de los factores de emisión en caliente.

Al ser el estudio direccionado a la estimación de emisiones para buses urbanos, y en consecuencia de la premisa que especifica que COPERT 4 para esta tipología de vehículos solamente toma en cuenta las emisiones en caliente, el paso final a la obtención de resultados para la flota, o en el caso inicial modelo para un solo automóvil, es la selección o edición de los parámetros de los factores de emisión en caliente.

Por defecto COPERT 4 utiliza la información provista dentro de su metodología para las diferentes legislaciones utilizadas dentro del espacio europeo, indicando además la fórmula utilizada para incluir todos los coeficientes expuestos. Además de estos parámetros por default, existe la posibilidad de incluir otros rangos de velocidad con la finalidad de ajustar el modelo lo más cercano posible a la realidad, quedando la ventana de acuerdo a la figura 4.13.



Subsector	Legislation Standard	Speed Limits (km/h)		Coefficients								Include Speed Limit			
		Low	Top	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zeta	Eta	Theta	RF	Low	Top	
Urban Buses Standard 1	HD Euro I - 91/542/EEC	11	86	2.331992	4.43845	-0.49677	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Urban Buses Standard 1	HD Euro II - 91/542/EEC	11	86	0.891022	5.13566	5.53172	2.06728	-0.00269	0	0	0	0	0	0	0
Urban Buses Standard 1	HD Euro III - 2000 Stand	11	86	1.231026	5.92475	1.70675	0.28351	0.08480	0	0	0	0	0	0	0

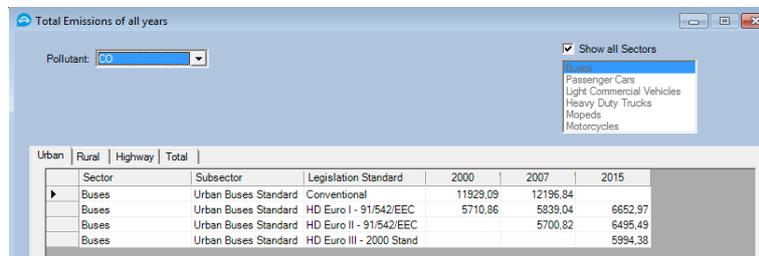
Figura 4.12. Ventana “Fraction of Elemental and Organic Carbon in exhaust PM”

5. CARACTERIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE COPERT EN CONDICIONES DE REFERENCIA.

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes a la caracterización de las simulaciones mediante COPERT en condiciones de referencia, relativos a la estimación del consumo de combustible y emisión de gases contaminantes, material particulado y emisiones metálicas a la atmósfera. Los resultados se presentan en **valores por kilómetro recorrido** (o por 100 km en el caso del consumo), para tener unos valores comparables entre las diversas condiciones. De forma adicional se establecen casos de influencia en las estimaciones de emisión, debido a la **influencia por variación de la pendiente, variación de la carga de los pasajeros y variación de la velocidad media de recorrido**.

Después de introducidos todos los datos en el programa, la obtención de resultados aparece dentro de la opción Total Emissions en la sección Emission de COPERT 4, tal como se indica en la figura 5.1.

Anterior a la presentación de los valores finales de emisión, es necesario proponer el cálculo final de todas las emisiones, incluyendo todos los factores de emisión, con lo que la información se actualizaría a su última edición, mediante la selección de la opción “All Emissions (including all factors)”.



		Urban	Rural	Highway	Total			
Sector	Subsector	Legislation Standard	2000	2007	2015			
Buses	Urban Buses Standard	Conventional	11929.09	12196.84				
Buses	Urban Buses Standard	HD Euro I - 91/542/EEC	5710.86	5839.04	6652.97			
Buses	Urban Buses Standard	HD Euro II - 91/542/EEC		5700.82	6495.49			
Buses	Urban Buses Standard	HD Euro III - 2000 Stand			5994.38			

Figura 5.1 Ventana “Total Emissions”

Al estar desarrollado el análisis solamente para autobuses urbanos, los factores que calcula el software son los siguientes:

- Efecto del combustible. (Fuel Effect).
- Factores de emisión en caliente. (Hot emission factors).
- Factor de emisión de CO2 debido al aceite lubricante. (CO2 Emissions Factors due to lube-oil)

Además se toma en cuenta la afección de parámetros definidos por:

- Variaciones por carga y ejes. (Vehicle load, axles).
- Variaciones por pendiente de carretera. (Road Slope).
- Variaciones por incremento/reducción de valor de velocidad media.

Finalmente para comprensión de la evolución que predetermina el programa para la estimación de las emisiones en el espacio temporal, COPERT 4 tiene una opción final de presentación de información para todos los años en una misma ventana “Total emissions of all years” (Figura 5.2). En esta ventana se presentan las estimaciones totales categorizadas de acuerdo al tipo de contaminante según es seleccionado en la pestaña “pollutant” de la esquina izquierda superior de la ventana



		Urban	Rural	Highway	Total			
Sector	Subsector	Legislation Standard	2000	2007	2015			
Buses	Urban Buses Standard	Conventional	11929.09	12196.84				
Buses	Urban Buses Standard	HD Euro I - 91/542/EEC	5710.86	5839.04	6652.97			
Buses	Urban Buses Standard	HD Euro II - 91/542/EEC		5700.82	6495.49			
Buses	Urban Buses Standard	HD Euro III - 2000 Stand			5994.38			

Figura 5.2. Ventana “Total emissions of all years”

5.1 Resultados caso inicial modelo.

Los resultados del caso inicial modelo presentados a continuación son obtenidos para una primera configuración, detallada a continuación:

- Velocidad media de recorrido: 20 km/h.
- Vehicle load / axles: 100% / 2.
- Road Slope: 0% (sin road slope).

Cabe indicar que los resultados presentados a continuación, obtenidos del comportamiento del software en el caso inicial modelo propuesto, están determinados por vehículo y por km, por lo que las unidades deben ser menores a las utilizadas en COPERT 4 (Toneladas -> Kilogramos, Kilogramos -> Gramos).

5.1.1 Consumo de combustible y emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El factor de mayor influencia en el consumo de combustible de un automóvil, en este caso un bus urbano, está relacionado principalmente con la energía necesaria para poder realizar su función efectiva. Entre los aspectos que incrementan directa e indirectamente el consumo de combustible se puede señalar (www.economiasimple.net):

- El uso del aire acondicionado dentro del coche incrementa el consumo de combustible. Esto se debe a que el compresor del aire toma la potencia del motor para funcionar. Sin embargo, andar a mucha velocidad con las ventanillas bajas hace que el motor tenga que realizar más esfuerzo, lo que incrementa también el consumo de combustible.
- El exceso de peso por carga de ocupantes hace que el motor realice más esfuerzo, sobre todo en los arranques y en periodos de aceleración. Del mismo modo, no es recomendable transportar objetos en el exterior del vehículo, ya que aumentan la resistencia al aire, por lo que se incrementa el consumo de combustible.
- La baja presión de aire de los neumáticos también aumenta de forma significativa el consumo de combustible del motor. Por ello, es importante siempre verificar la presión de inflado.
- Características propias de funcionamiento del vehículo, como la relación del consumo con la velocidad, la eficiencia del motor, eficiencia de la cadena de transmisión, la aerodinámica del vehículo y la utilización de sistemas auxiliares incrementa el consumo del combustible por exigencias adicionales al motor.
- Propiedades de la naturaleza del camino como el trazado y características de la carretera, el modo de conducción, configuración de los neumáticos y estado de los mismos también influyen en el incremento del consumo.
- Un efecto particular a tomar en cuenta es la volatilidad del combustible seleccionado, a partir de dos enfoques distintos:
 - **Efecto en trayectos cortos:** Mientras el vehículo no está suficientemente caliente, salvo que aparezcan problemas de formación de hielo, las altas volatilidades de las gasolinas producen una mejor vaporización, mejorando la mezcla aire/combustible y el rendimiento de la combustión. Además, esta elevada volatilidad hace que el arranque y calentamiento sean más rápidos y no será necesario incrementar la cantidad de combustible durante largo tiempo
 - **Efecto en trayectos largos:** El consumo disminuye cuanto mayor es el poder calorífico. Esto implica una elevada densidad y una baja volatilidad. La elección de la volatilidad es un compromiso entre el consumo de combustible a largo plazo y el incremento en la dilución del combustible y en la formación de depósitos en la cámara de combustión.

COPERT 4 hace el cálculo del consumo de combustible a partir de fuentes estadísticas de consumo propuestas por sus desarrolladores. En cuestión a las emisiones dependientes del consumo de combustible ($CO_2, SO_2, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn$), sus valores son obtenidos a partir de la fuente estática calculada por el software, y si se introduce el valor real consumido, COPERT realiza una corrección basada en el verdadero consumo de combustible. En el caso inicial modelo no se dispone del valor de consumo verdadero, por lo que el factor de corrección no se aplica.

Desde un punto de vista complementario, existe una estrecha relación entre el consumo de combustible y la emisión de CO_2 a la atmósfera, donde hay que tener en cuenta que la emisión de CO_2 por kilómetro recorrido por el vehículo depende del consumo de este (l/100km) y de las propiedades físicas y de composición del combustible, principalmente de la densidad de este y de la relación de hidrógeno – carbono.

Haciendo relación a lo que expone [Almodóvar, 2015], las **emisiones de CO_2** proceden a partir de tres fuentes:

- **Combustión de combustible (consumo y relación H/C del combustible utilizado).**
- **Combustión de aceite lubricante.** Donde cabe recalcar que todos los vehículos consumen pequeñas cantidades de aceite de lubricación, debido a la película de aceite desarrollado en las paredes internas del cilindro. Esta película de aceite se expone a la combustión y se quema junto con el combustible, donde el desgaste debido al funcionamiento prolongado del motor generalmente aumenta el consumo de aceite lubricante.
- **Emisiones de CO_2 procedentes de catalizadores en base de urea,** los mismos que son empleados en procesos de convertidores catalíticos que obtienen como resultado emisiones no combustivas que se rigen a la siguiente ecuación [Waldron, et al., 2006]:

$$EmisiónCO_2 = Actividad * \frac{12}{60} * Pureza * \frac{44}{12}$$

donde:

Emisiones CO_2 = Emisiones de CO_2 del aditivo en base de urea de los conversores catalíticos.

Actividad = cantidad de aditivo basado en urea consumido para usarlo en dichos conversores.

Pureza = la fracción de masa (= porcentaje dividido por 100) de urea en el aditivo.

El factor (12/60) captura la conversión estequiométrica de la urea ($CO(NH_2)_2$) al carbono.

El factor (44/12) convierte el carbono en CO_2 .

Las emisiones de CO_2 están íntimamente relacionadas con el consumo de combustible, por lo que muchos autores en sus informes de emisión y establecimiento de factores de emisión, presentan valores interrelacionados. Un claro ejemplo de esta relación explícita se encuentra expuesta dentro del informe inventarios GEI 1990 – 2009 donde el factor de emisión calculado de diésel se encuentra determinado en $kgCO_2$ /litro de combustible.

A continuación se presenta el comportamiento del consumo de combustible y emisiones de CO_2 para un vehículo, por kilómetro realizado, correspondiente a la configuración de presencia de la normativa de acuerdo a los años medidos, así como su evolución en el tiempo con respecto a la presencia de la normativa (Conventional, Euro I, Euro II y Euro III) dentro de las especificaciones características de la ciudad de Ambato.

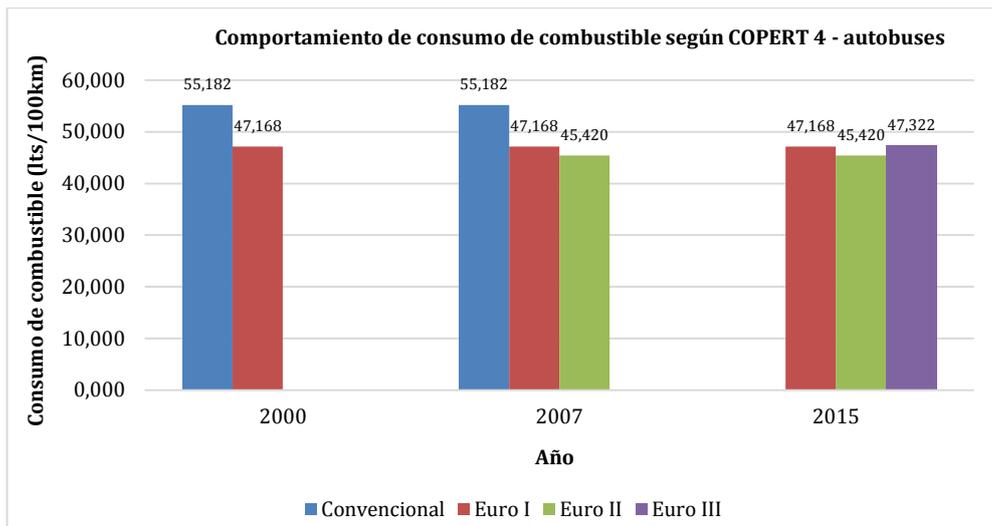


Figura 5.3 Comportamiento de la estimación del consumo de combustible anual

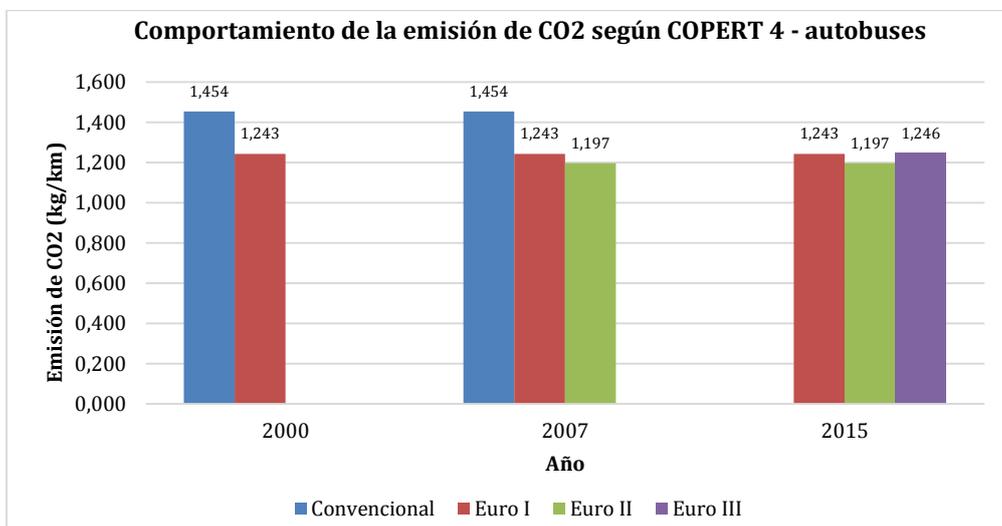


Figura 5.4 Comportamiento de la estimación de emisiones de CO2 anual.

COPERT 4, en clara evidencia a su metodología, y a la no inclusión de parámetros de consumos, factores de emisión en frío y factores de emisión por evaporación, mantiene un comportamiento de consumo de combustible y de emisiones de CO2 de tipo lineal en el transcurso del tiempo, tal como se presencia en las figuras No. 5.3 y No. 5.4., además de que, tal como se enunció por parte de los desarrolladores del software, en vehículos pesados y autobuses no se incluyen factores de degradación por recorrido cumplido en el tiempo para FC y CO2, por lo que además se concluye dentro del programa informático que no se toma en cuenta en ningún momento parámetros de envejecimiento de la flota para FC y CO2.

5.1.2 Emisión de SO2.

Son emisiones gaseosas que se forman por la oxidación del azufre del combustible durante el proceso de combustión y dependen totalmente del contenido de azufre en el combustible. En este caso, en la República del Ecuador, existen dos tipos de combustible diésel, diésel convencional y diésel de bajo contenido en azufre. Para el estudio de emisión de productos contaminantes se tomaron los valores característicos del diésel convencional, al ser el más económico y de uso generalizado dentro del transporte público nacional.

El comportamiento de la estimación anual de SO₂ por vehículo por kilómetros para la ciudad de Ambato, se presenta en la figura 5.5.

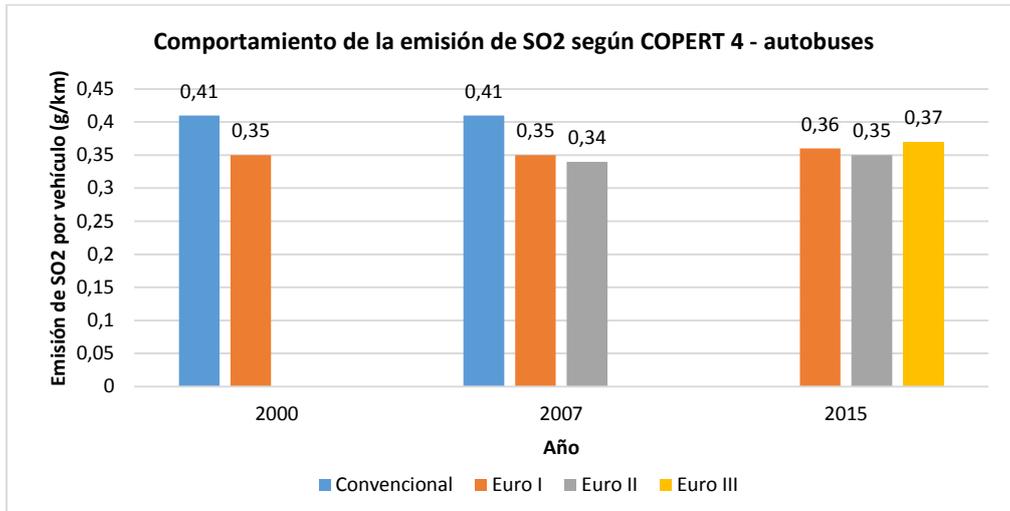


Figura 5.5 Comportamiento de la estimación de emisiones de SO₂ anual.

El comportamiento de la emisión de SO₂ anual, según COPERT 4, sigue un comportamiento prácticamente lineal, al igual que se comprobó para la estimación del consumo de combustible, así como la estimación de emisión de CO₂ anual.

5.1.3 Emisiones de CO, VOC, NMVOC y CH₄.

Dentro del análisis completo propuesto por la metodología empleada por COPERT 4, se identifican las emisiones de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC), compuestos orgánicos volátiles sin metano (NMVOC) y metano (CH₄). Para la obtención de valores de emisión correspondientes, COPERT 4 utiliza una serie de factores de emisión obtenidos a partir de valores estadísticos propios de los desarrolladores, para diferentes ciclos de conducción y diferentes características meteorológicas.

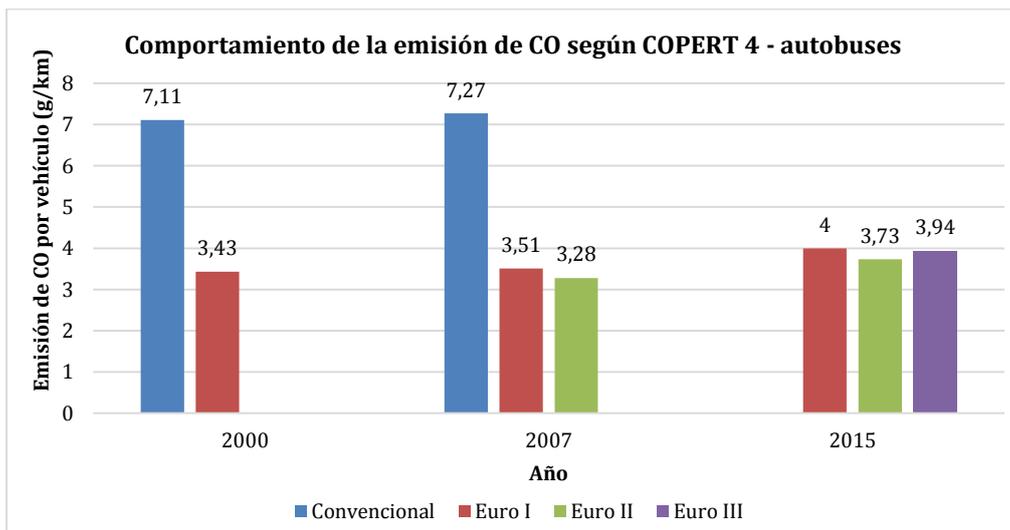


Figura 5.6. Comportamiento de la estimación de emisiones de CO anual.

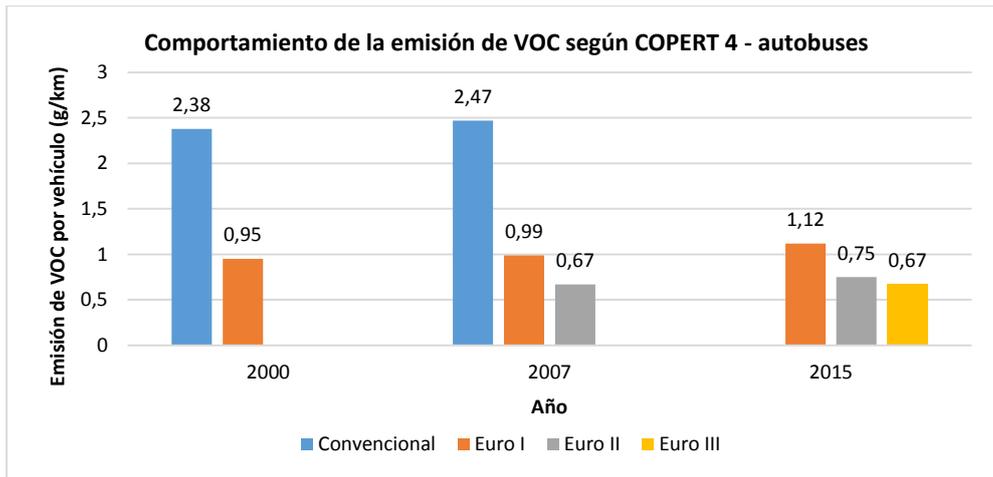


Figura 5.7. Comportamiento de la estimación de emisiones de VOC anual.

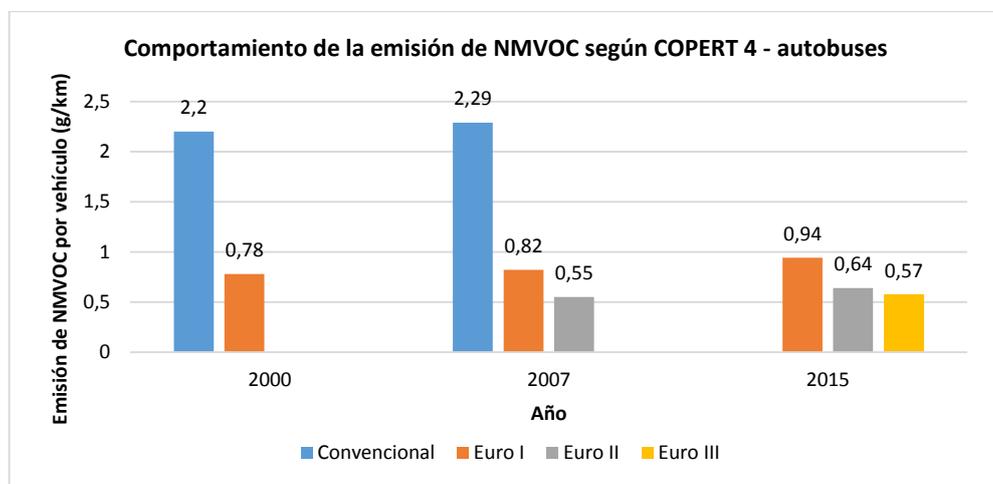


Figura 5.8. Comportamiento de la estimación de emisiones de NMVOC anual.

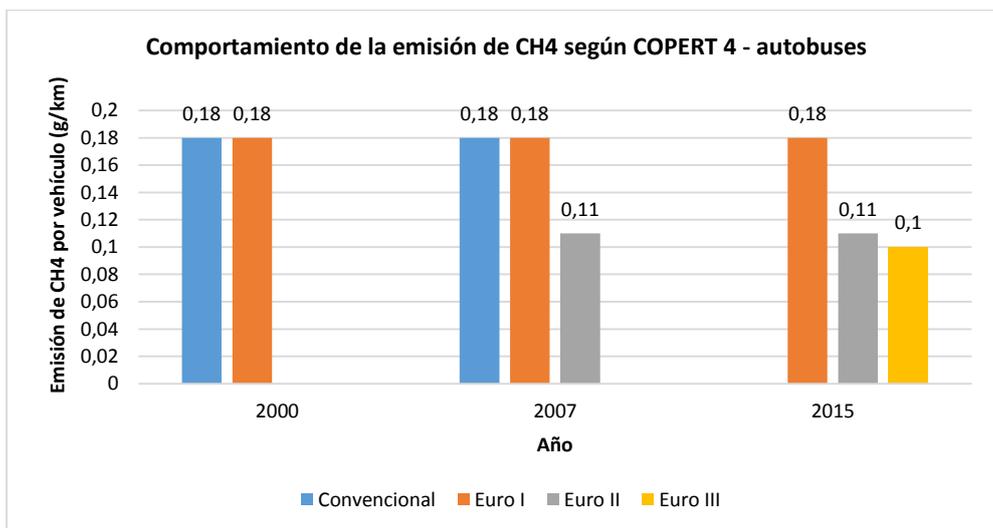


Figura 5.9. Comportamientos de la estimación de emisiones de CH4 anual.

El comportamiento de la estimación de emisiones para CO, VOC y NMVOC siguen una curva creciente con respecto al paso de los años de la flota, lo que comprende la intervención de parámetros por kilometraje recorrido hasta el momento, mientras que el comportamiento de la estimación de emisiones para CH4 es lineal para todos los años.

5.1.4 Emisiones de materiales con nitrógeno.

Los materiales cuyo compuesto incluye el nitrógeno (NO_x, NO, NO₂ y N₂O), se forman durante el proceso de combustión, cuando el combustible se quema a temperaturas elevadas dentro del motor del vehículo, entendiéndose a NO_x como el nombre genérico que representa en conjunto a óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO₂).

La nocividad de estos compuestos dentro del medioambiente se caracteriza por cuanto el NO₂ se oxida fácilmente en el vapor de agua de las nubes formando así ácido nítrico (HNO₃), unos de los principales constituyentes de la lluvia ácida. En cuanto al NO, una vez liberado a la atmósfera es oxidado rápidamente por el ozono para generar NO₂, que a su vez interviene en el ciclo de formación del ozono troposférico, constituyente esencial del smog fotoquímico.

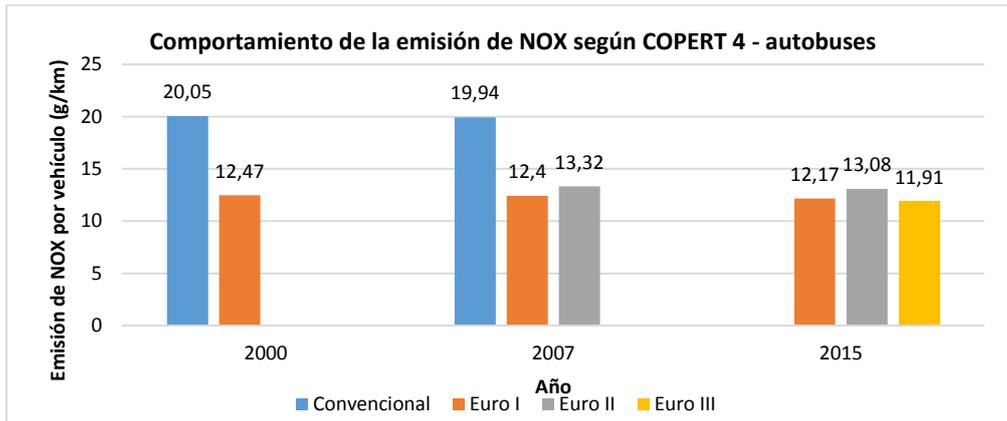


Figura 5.10 Comportamiento de la estimación de emisiones de NO_x anual.

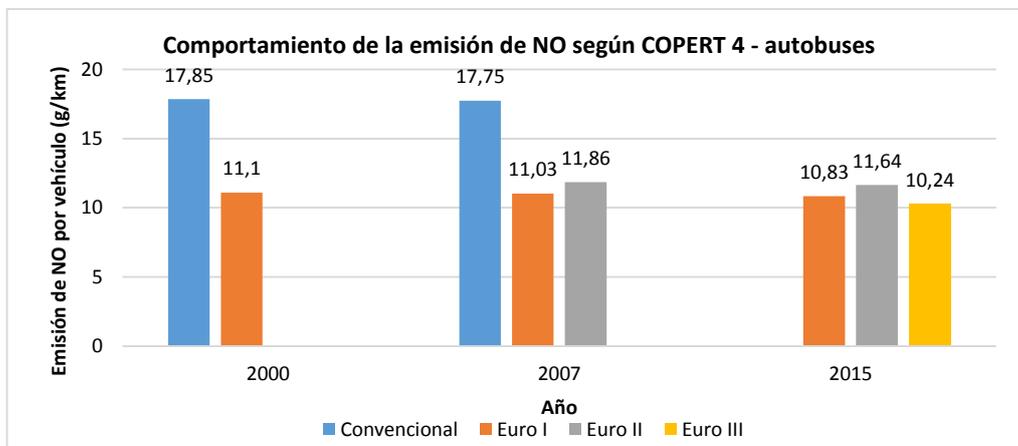


Figura 5.11 Comportamiento de la estimación de emisiones de NO anual.

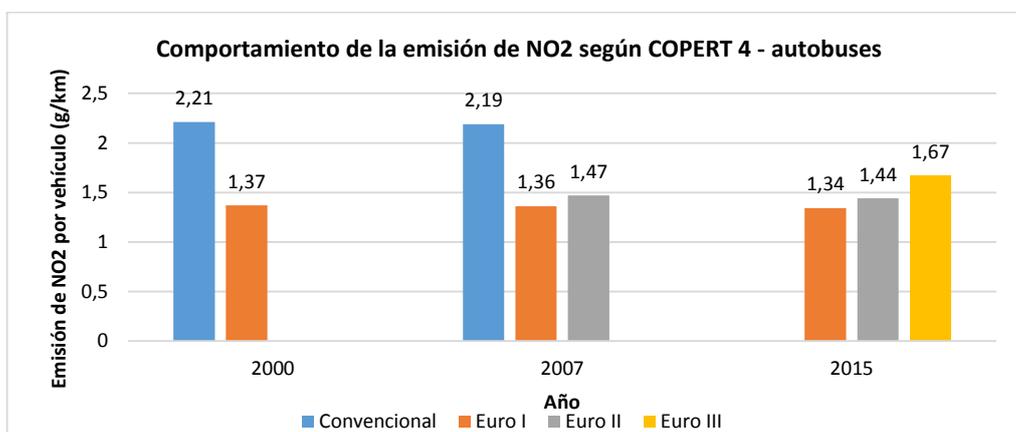


Figura 5.12 Comportamiento de la estimación de emisiones de NO₂ anual.

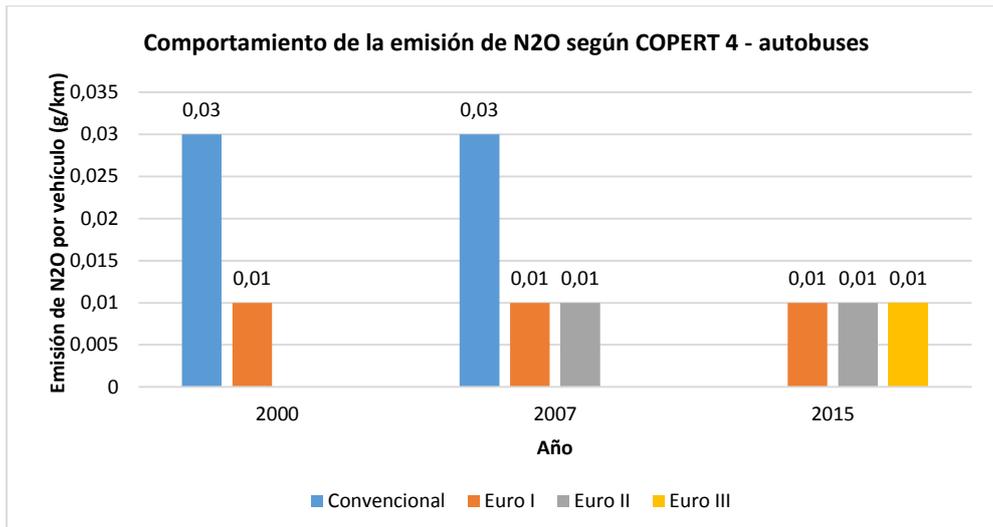


Figura 5.13 Comportamiento de la estimación de emisiones de N2O anual.

El comportamiento de estimación de emisiones en este caso en particular es decreciente en el caso de NOx, NO y NO2 con respecto al paso de los años, en gran medida a que a medida que se produce el desgaste de componentes propios de la composición de motores, la emisión de contaminantes se reduce proporcionalmente durante un rango de tiempo, después del cual incrementa nuevamente su emisión.

COPERT 4 tiene un comportamiento lineal en la estimación de emisiones de N2O para autobuses a diferencia de los anteriormente señalados.

5.1.5 Emisiones de material particulado.

Las partículas sólidas o líquidas emitidas por el vehículos, denominadas como material particulado, están formadas principalmente de partículas gruesa (PM10), partículas finas (PM2.5) y material particulado en el escape (PM escape). Su fuente de origen viene determinada a partir de dos fuentes:

- Partículas orgánicas formadas durante el proceso de combustión.
- Partículas provenientes de desprendimiento por procesos de fricción.

El material particulado PM se emite directamente o se forma en la atmósfera a partir de precursores como los óxidos de azufre (SOx) y los óxidos de nitrógeno (NOx).

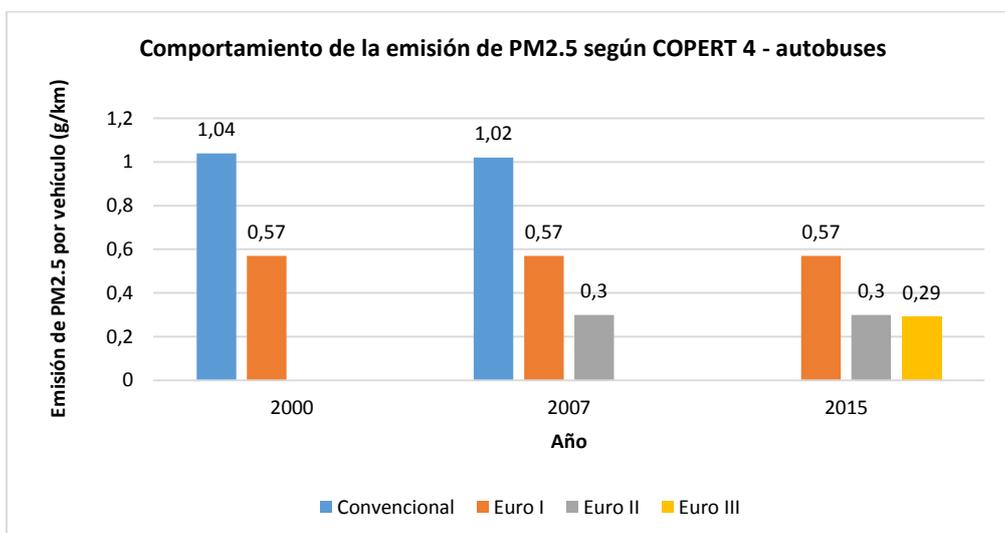


Figura 5.14. Comportamiento de la estimación de emisiones de PM2.5 anual.

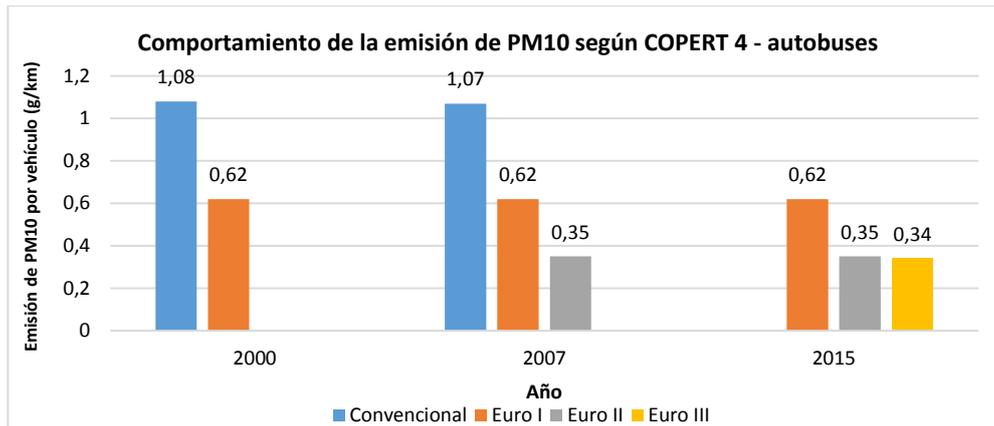


Figura 5.15. Comportamiento de la estimación de emisiones de PM10 anual.

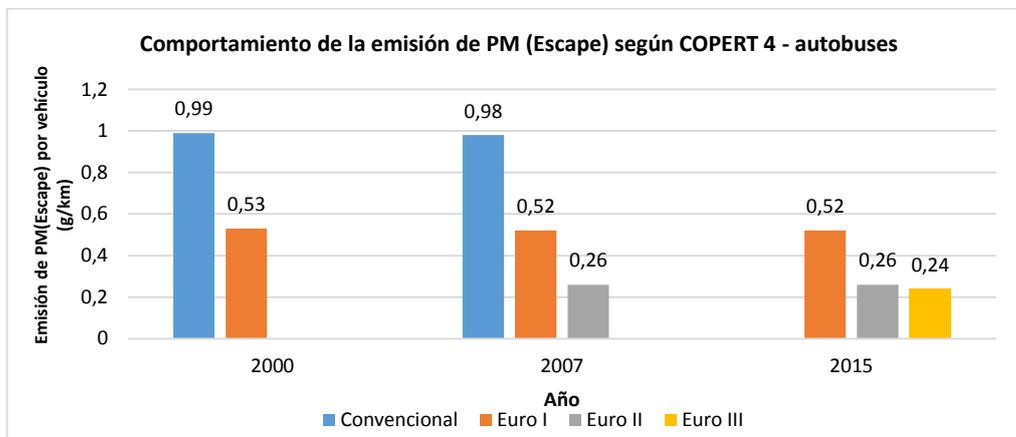


Figura 5.16 Comportamiento de la estimación de emisiones de PM (escape) anual

El comportamiento de la estimación de material particulado mediante COPERT 4 para el análisis de emisiones para autobuses es prácticamente lineal en todos los casos, evidenciándose una clara diferencia entre normativas vigentes sobre el control de los mismos, siendo en todos los casos mayor precursor de PM los vehículos de tipo convencionales, con respecto a la última normativa aplicada para Ecuador que sería Euro III.

5.1.6 Emisiones de compuestos de carbono.

El carbono elemental (EC) y el carbono orgánico (OM) son resultados directos de los procesos de combustión contenidos en el material particulado expulsado con diámetros de menos de 10 micrómetros, de alta afección a la salud humana.

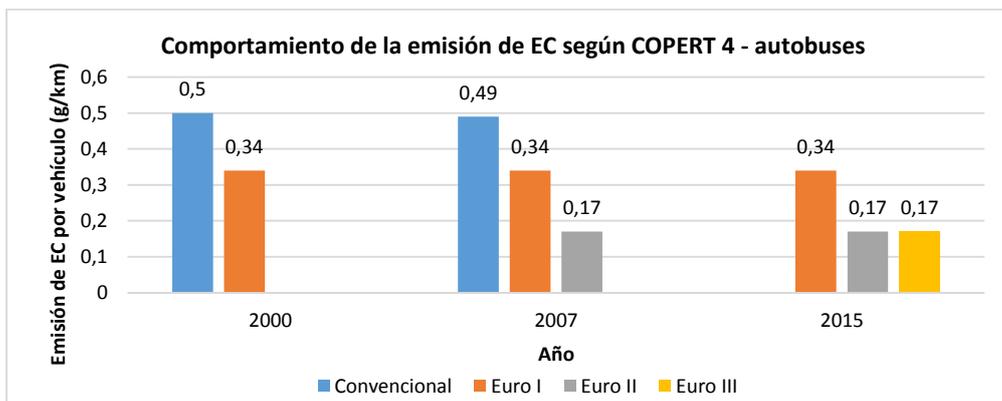


Figura 5.17 Comportamiento de la estimación de emisiones de EC anual.

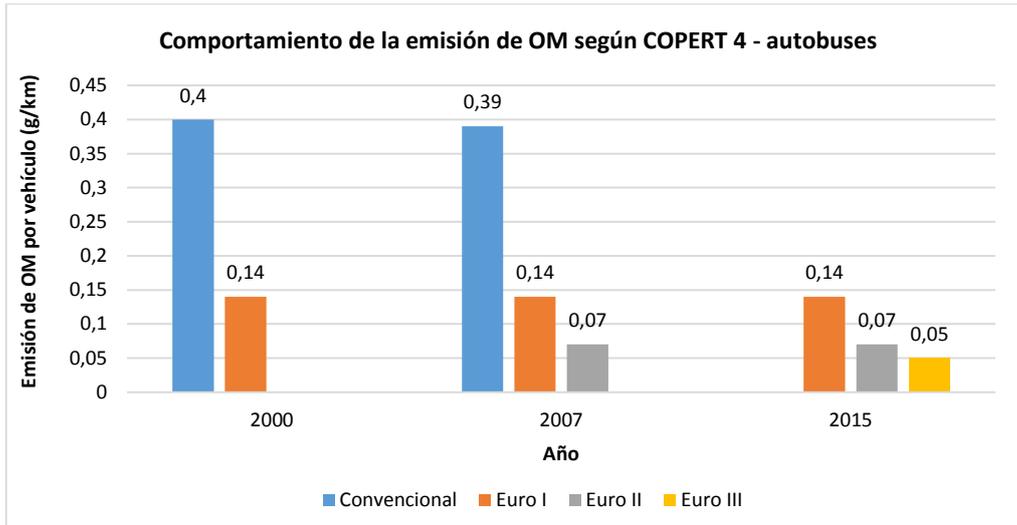


Figura 5.18 Comportamiento de la estimación de emisiones de OM anual.

COPERT 4, para la estimación de compuestos de carbono, mantiene un comportamiento lineal, por lo que la degradación por kilometraje recorrido no es influyente en ninguno de los casos, resaltando sobre todo la diferencia de emisiones entre normativas, evidenciándose un alto rango de disminución entre la normativa convencional y la Euro III.

5.1.7 Emisión de metales a la atmósfera.

Los metales pesados emitidos a la atmósfera (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se y Zn) se producen por su contenido, bien el combustible o en el lubricante. El producto emitido proviene debido a los procesos de refinado o su incorporación por desprendimientos metálicos propios de los rozamientos producidos en los procesos mecánicos que se llevan a cabo dentro del motor.

Dentro de los metales emitidos a la atmósfera por los vehículos, los que tienen mayor presencia son el Plomo, el Cobre y el Zinc.

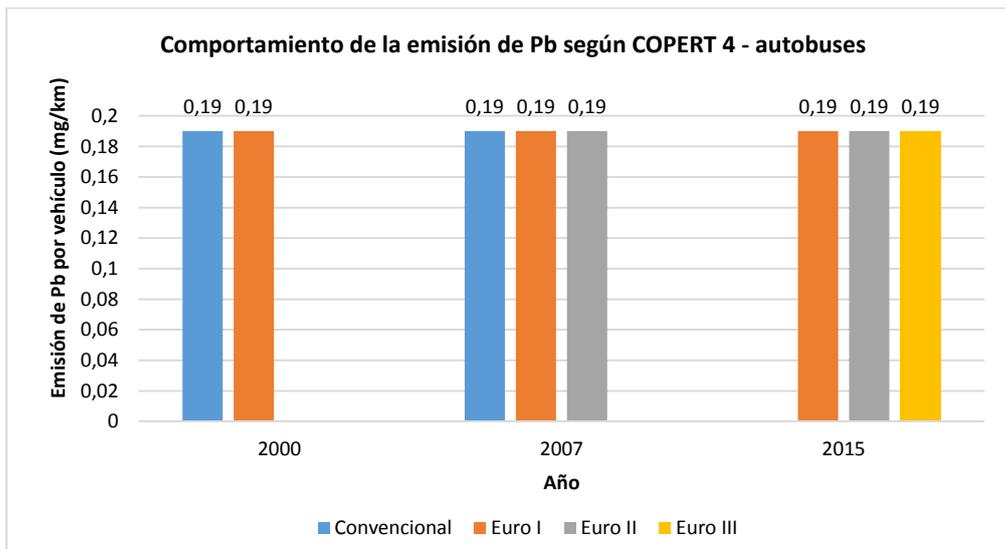


Figura 5.19. Comportamiento de la estimación de emisiones de Pb anual.

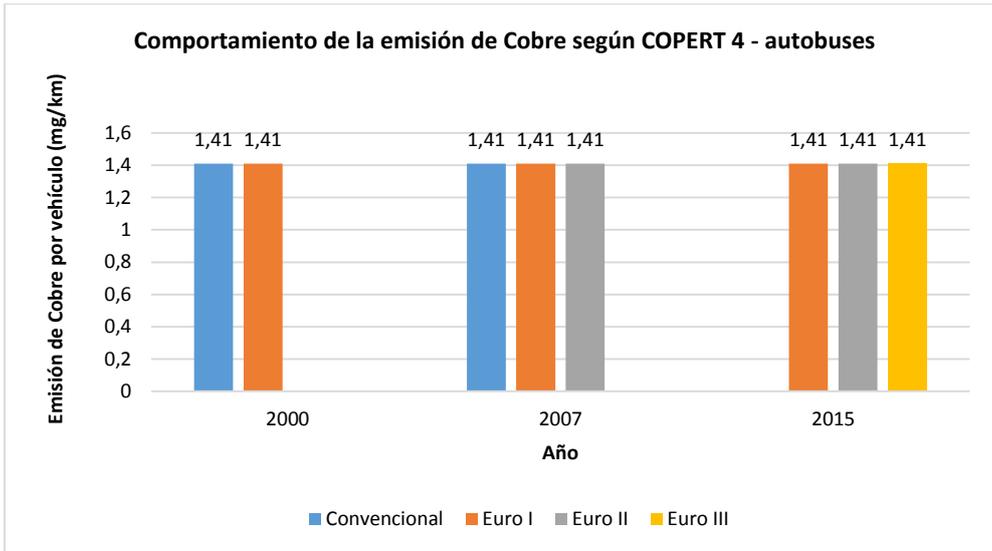


Figura 5.20. Comportamiento de la estimación de emisiones de Cu anual.

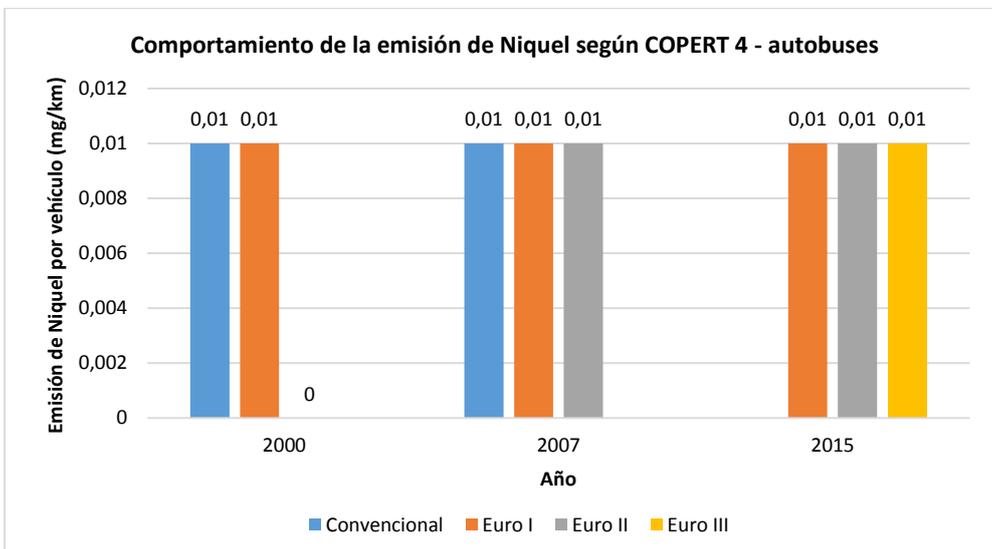


Figura 5.21. Comportamiento de la estimación de emisiones de Ni anual.

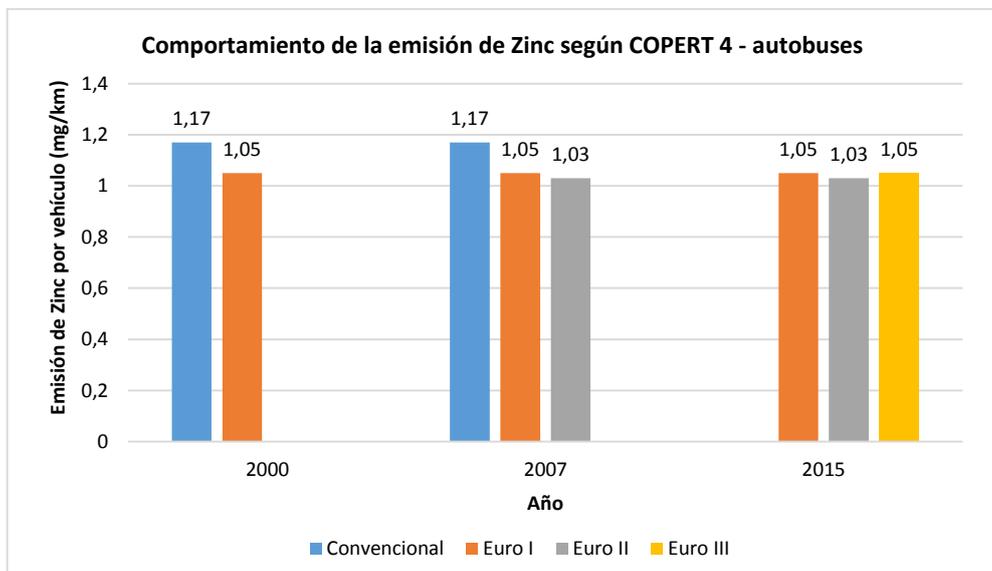


Figura 5.22. Comportamiento de la estimación de emisiones de Zinc anual.

El comportamiento de emisiones en este caso final es estrictamente lineal según la metodología de COPERT 4, distinguiéndose en el caso del Plomo, el Cobre y el Níquel los mismos valores establecidos para todas las normativas analizadas, mientras que existe una diferencia de reducción en la emisión de Zinc entre las normativas. El análisis de Cadmio, Cromo y Selenio no se indican por cuanto su emisión para un vehículo en el trayecto de un kilómetro es muy pequeña, aplicándose posteriormente en el caso real de la ciudad de Ambato para toda la flota.

5.2 Casos de influencia en las estimaciones de emisión.

En orden hacia la comprensión final del software, y establecer su comportamiento bajo distintas configuraciones, se procede a analizar una serie de casos de influencia en las estimaciones de emisión, variando varios parámetros dentro de COPERT 4. Los casos de influencia en las estimaciones de emisión son:

- Cambios de estimaciones por influencia de la variación de la pendiente.
- Cambios de estimaciones por influencia de la variación de la carga.
- Cambios de estimaciones por influencia de la variación de la velocidad media de recorrido.

5.2.1 Cambios por influencia de la variación de la pendiente.

Como se indicó anteriormente, COPERT 4 permite la selección del grado de pendiente que tiene la carretera, siendo este nivel de pendiente decreciente o ascendente, en grados de -6° , -4° , -2° , 0° , 2° , 4° y 6° . Para aplicar la variación de la pendiente, dentro de la ventana correspondiente se tiene que seleccionar la opción de "Apply Road Slope Correction", con lo que este parámetro se incluye en el proceso de obtención de emisiones.

Para el caso modelo inicial, en el presente documento solamente se indicará el comportamiento del consumo de combustible y las emisiones de CO₂, siendo el resto de los comportamientos de las emisiones por influencia de la pendiente acotadas en el documento caso modelo inicial.xlsx adjunto en el CD del proyecto.

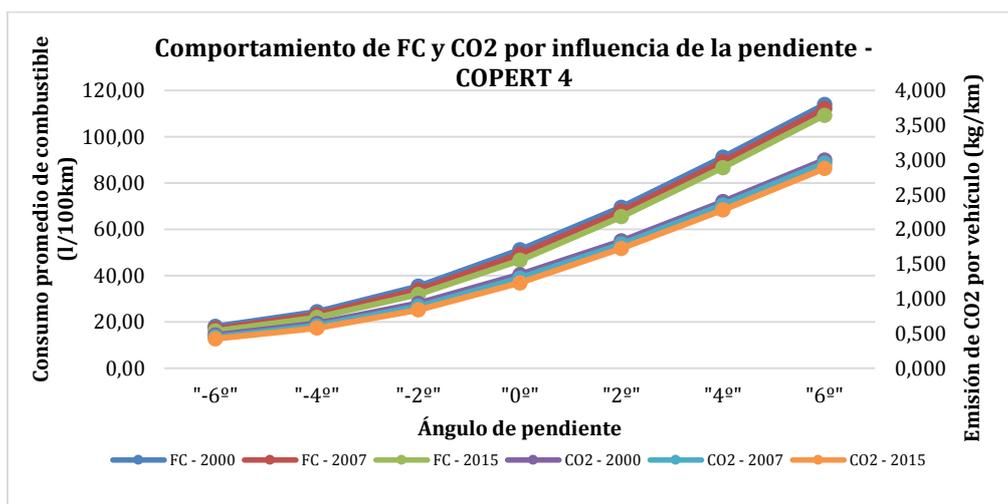


Figura 5.23. Cambio de estimaciones de FC y CO₂ por influencia del grado de pendiente.

Debido a la pendiente se presencia una variación considerable del consumo de combustible, y al estar relacionado íntimamente el CO₂ con este consumo de combustible, la emisión de CO₂ experimenta el mismo comportamiento, siendo menor al menor grado posible de pendiente (-6° pendiente decreciente), y acrecentando el valor en forma de curva ascendente a medida que se va aumentando la pendiente, has el punto máximo (6° pendiente ascendente).

Este crecimiento en forma de curva se constata para el consumo de combustible FC, CO₂, SO₂, CO, NO_x, NO, NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, PM escape, EC, OM y emisión de Zn, mientras que en los casos no nombrados (VOC, NMVOC, CH₄, N₂O, emisión de Pb, Cu y Ni) se presencia un comportamiento lineal sin afección por cambio de la pendiente, de acuerdo a los gráficos correspondientes indicados en el anexo No. 2.

5.2.2 Cambios por influencia de la variación de la carga.

El factor componente al nivel de carga que soporta el vehículo tiene una gran importancia en cuanto al consumo final de combustible y por tanto el aumento o disminución de las emisiones de CO₂ y otros productos contaminantes al ambiente.

En referencia al estudio presentado por [Villalobos, Salazar, Gavilán, & Rojas, 2013], la carga genera impacto sobre el consumo por dos vías:

- **Fuerza de resistencia por pendiente.** Como se estableció en el apartado anterior, la fuerza de gravedad tiende a evitar que cualquier cuerpo suba y, por lo tanto, cuando sube por una pendiente, es necesario vencer esta fuerza. El efecto contrario ocurre en el descenso por una rampa, donde esta misma fuerza favorece el movimiento tendiendo a acelerar al vehículo. Esta fuerza depende directamente de la masa total de éste y de la inclinación de la pendiente.

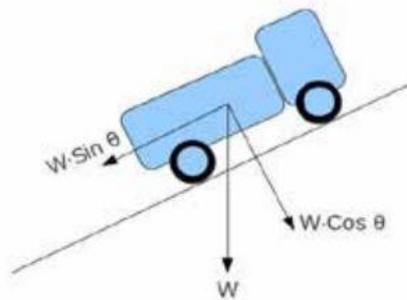


Figura 5.23. Efecto del peso y pendiente sobre el consumo de combustible. [Villalobos et al, 2013]

- **Fuerza de resistencia a la rodadura.** Al rodar un neumático, éste se deforma, lo que provoca una fuerza que se opone al movimiento del mismo. En vehículos cargados y circulando a bajas velocidades, ésta es la resistencia que más energía requiere para su vencimiento, llegando a suponer hasta un 40% de la fuerza total resistente. Esta es proporcional a la masa del vehículo y depende del tipo y medida de los neumáticos.

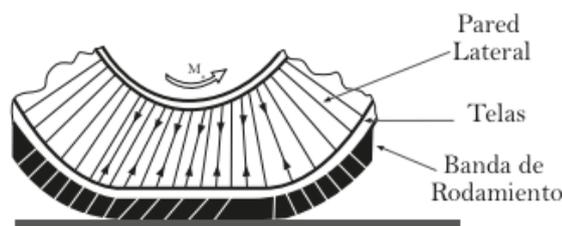


Figura 5.24. Efecto del peso en la fuerza de resistencia a la rodadura. [Villalobos et al, 2013]

Para el caso modelo inicial, de igual manera que se realizó en el análisis de influencia de la pendiente en la estimación realizada por COPERT 4, en el presente documento solamente se indicará el comportamiento del consumo de combustible y las emisiones de CO₂, siendo el resto de los comportamientos de las emisiones por influencia de la carga acotadas en el documento caso modelo inicial.xlsx adjunto en el CD del proyecto.

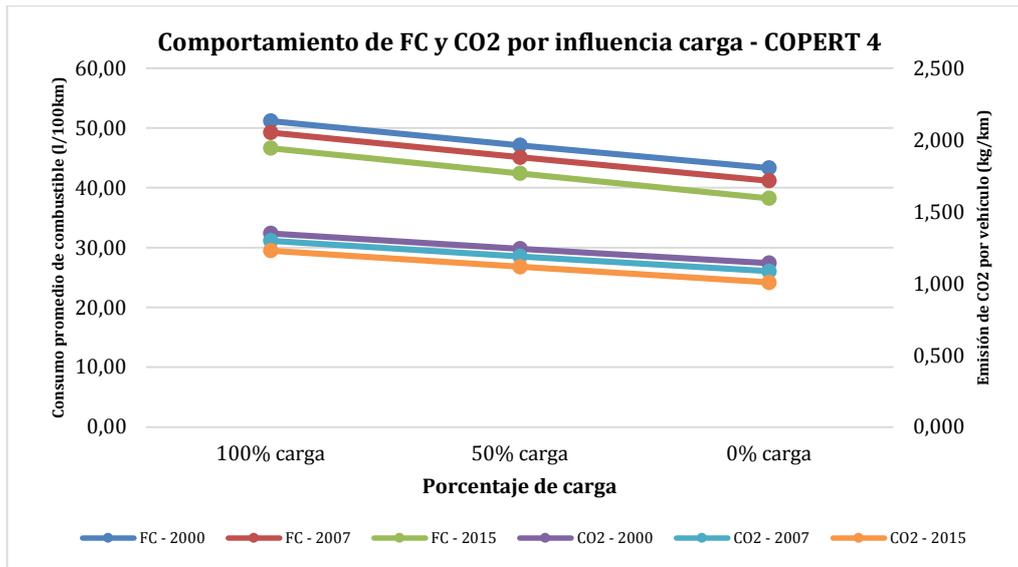


Figura 5.25 Cambio de estimaciones de FC y emisiones de CO2 por influencia de la carga

Es concluyente que por la disminución de carga, dentro de la metodología de COPERT 4, sí se experimenta una reducción en el consumo de combustible y la emisión de CO2, tomando en cuenta que en el caso de 0% de carga no quiere decir que el autobús urbano solo tiene carga del motor, sino que no mantiene el aumento de peso de los ocupantes del mismo, consumiendo lo indicado cuando el autobús está recorriendo sin pasajeros.

El mismo comportamiento de reducción lineal está presente al mismo tiempo que en el FC y emisión de CO2, en emisiones de SO2, CO, NOx, NO, NO2, PM2.5, PM10, PM (escape), EC, OM y emisiones de metales como Cu, Zn y Pb. En los parámetros que no se presencia una variación se encuentran CH4, NMVOC, VOC, N2O, y emisión de Ni. Los gráficos representativos de estos efectos se encuentran indicados en el anexo No. 3.

5.2.3 Cambios por influencia de la variación de la velocidad media de recorrido.

Un último factor a considerar para la comprensión y manejo completo del software COPERT 4, así como de su metodología para la estimación de emisiones, es la influencia que ejerce la variación de la velocidad media de recorrido.

En verdad para determinación teórica del consumo de combustible, y su relación con el aumento o disminución de la velocidad parte de la diferenciación de dos conceptos totalmente diferentes (velocidad y aceleración), en situaciones de trabajo de igual manera distintas (tipo de marcha, rango de velocidad a la que se recorre, etc.).

Cabe apuntar la disimilitud conceptual existente, ya que por un lado la velocidad indica la distancia que recorre el coche en dependencia del tiempo, mientras que la aceleración es la diferencia en el tiempo entre dos velocidades diferentes. En base a la premisa anterior, en realidad el consumo de combustible no depende directamente de la disminución de la velocidad al existir una relación completamente lineal, por ejemplo la resistencia aerodinámica de un coche es proporcional a la velocidad con la cual este se mueve. En el caso de los autobuses, con un rango entre los 20 km/h y los 70 km/h, el gasto de combustible dependerá esencialmente del peso del coche, la aceleración y el número de revoluciones del motor.

Para el caso modelo inicial, en similitud al análisis de influencia de la pendiente y la carga en la estimación realizada por COPERT 4, en el presente documento solamente se indicará el comportamiento del consumo de combustible y las emisiones de CO2, siendo el resto de los

comportamientos de las emisiones por influencia de la variación de la velocidad media de recorrido acotadas en el documento caso modelo inicial.xlsx adjunto en el CD del proyecto.

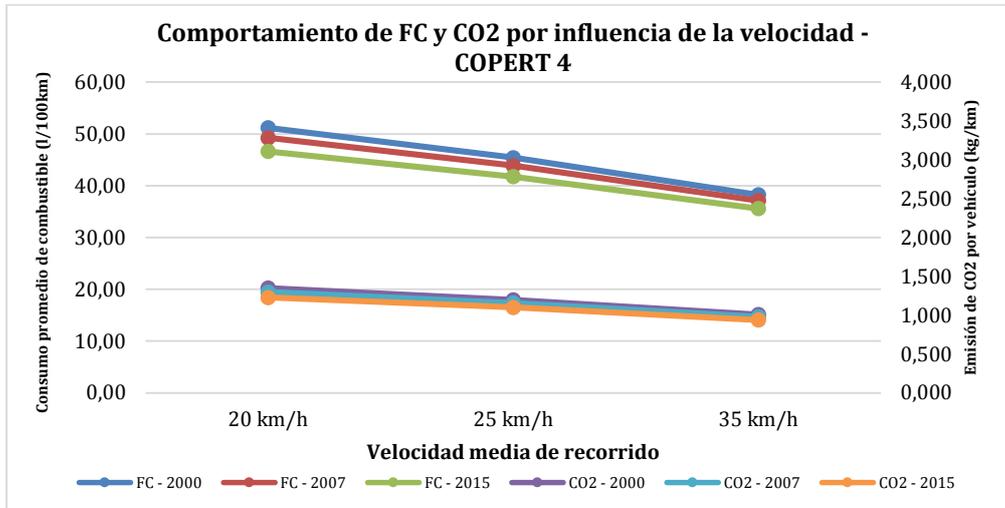


Figura 5.26. Cambio de estimaciones de FC y emisiones de CO2 por influencia de la velocidad

Según resultados obtenidos propios del programa, para autobuses al aumento de velocidad se experimenta una reducción del consumo de combustible, como se indica en la figura 5.26 con un decrecimiento lineal tanto en el consumo de combustible, como en la emisión consiguiente de CO2. Si bien es cierto se utilizó un rango relativamente corto, es el mismo máximo que podría circular un autobús en un circuito urbano para la ciudad de Ambato, por lo que no vendría al caso el uso de un rango más amplio de velocidad, que sería adecuado en el caso de transportes de pasajeros en autovías, donde los rangos manejados son superiores a los utilizados.

El comportamiento de decrecimiento lineal estuvo presente en estimaciones de FC, CO2, SO2, CO, VOC, NMVOC, NOX, NO, NO2, PM10, PM2.5, PM (escape), EC, OM y emisión de Zinc, siendo al contrario de comportamiento lineal mantenido en las estimaciones de emisión de CH4, N2O, Pb, Cu y Ni, tal como se presenta en gráficos del Anexo No.4.

6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON COPERT – CASO ESPECÍFICO CIUDAD DE AMBATO.

Entendido en su totalidad el comportamiento de programa para diferentes configuraciones propuestas por el usuario, y como la variación de valores característicos influencia directamente en el cálculo de las estimaciones de emisión finales para autobuses bajo distintas legislaciones de control, se posiciona las características de la ciudad de Ambato desde dos enfoques iniciales:

- Análisis de consumo de combustible y emisiones para la flota de transporte público de la ciudad de Ambato, identificándolo como un **recorrido completamente plano**.
- Análisis propio de consumo de combustible y emisiones para la flota de transporte público de la ciudad de Ambato, introduciendo valores característicos de **orografía presente en la ciudad**.

6.1 Datos de entrada - caso específico ciudad de Ambato.

Como se indicó anteriormente, se pretende en el caso específico de la ciudad de Ambato, hacer dos análisis, un primero sin tomar en cuenta la orografía de la ciudad y un segundo tomando en cuenta este parámetro. En ambos casos existen datos de entrada comunes entre sí, expuestos en el apartado de caso modelo inicial (Cap. 4), enunciados a continuación:

- **Información meteorológica de la ciudad:** incluye datos de temperatura, humedad relativa y presión de vapor Reid. (Tabla 4.2).
- **Información técnica del combustible.** Específica para el territorio Ecuatoriano, con valores normalizados para Diésel de uso convencional en el transporte público. (Tabla 4.3).
- **Categorización de vehículos.** Se mantiene el uso del bus urbano estándar de 15 toneladas de peso, bajo las mismas legislaciones de control: convencional, Euro I, Euro II y Euro III.
- **Velocidad media de recorrido.** Valor de 25 km/h para el recorrido en base a estimaciones propias del transporte público y legislaciones de control de velocidades locales (Tabla 4.10)
- **Carga del vehículo.** En los dos estudios posteriores se mantiene una carga de 100% de pasajeros, en forma de encontrar un punto medio entre las situaciones en las cuales el transporte urbano está a mediana capacidad y momentos pico de uso donde se sobrepasa la cantidad de pasajeros en el mismo. (Figura 4.9).
- **Datos de entrada de la flota.** Se encuentran integradas tres de las principales flotas de transporte público de la ciudad de Ambato: Jerpazsol, Coop. Tungurahua y Coop. Libertadores cuyos registros anuales demuestran los siguientes datos de unidades.

Cooperativa Tungurahua			
	2000	2007	2015
Convencional	74	84	0
Euro I	38	21	0
Euro II	0	29	97
Euro III	0	0	51

Tabla 6.1 Datos de flota Coop. Tungurahua.

Cooperativa Jerpazsol			
	2000	2007	2015
Convencional	0	0	0
Euro I	35	35	0
Euro II	0	12	16
Euro III	0	0	35

Tabla 6.2. Datos de flota Coop. Jerpazsol.

Cooperativa Libertadores			
	2000	2007	2015
Convencional	41	41	0
Euro I	9	9	31
Euro II	0	8	23
Euro III	0	0	11

Tabla 6.3 Datos de flota Coop. Libertadores.

Total buses de la flota real			
	2000	2007	2015
Convencional	115	125	0
Euro I	82	65	31
Euro II	0	49	136
Euro III	0	0	97
Total	197	239	264

Tabla 6.4 Datos de flota totales ciudad Ambato.

6.2 Emisiones caso específico ciudad de Ambato - configuración plana.

El análisis de estimación de emisiones del caso específico de la ciudad de Ambato empieza mediante una configuración del recorrido suponiendo que este es completamente plano (sin afección de la pendiente), por lo que para consecución del mismo se proponen las siguientes hipótesis de aplicación hacia su caracterización:

- **Valores de recorrido medio y tiempo de recorrido.** En este caso al suponer un circuito completamente plano se especifica la totalidad de kilómetros que constituyen el tramo base tipo que recorren las tres flotas de transporte.

	Recorrido medio Ltrip (km)	Tiempo de recorrido t_trip (h)
Caso ciudad de Ambato – configuración plana	51,2	3

Tabla 6.5. Datos de recorrido medio y tiempo de recorrido – configuración plana.

- **Valores de entrada de la flota.** En la aplicación de la configuración plana, los valores de población de la flota, kilometraje anual recorrido kilometraje principal de la flota, quedan determinados acorde a información organizada en la Tabla 6.6, Tabla 6.7 y Tabla 6.8.

Datos de entrada de la flota			
año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	62290,4	622903,6
Euro I	82	62290,4	62290,4

Tabla 6.6. Datos de entrada de la flota – año 2000 – configuración plana.

Datos de entrada de la flota			
año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	62290,4	1058936,2
Euro I	65	62290,4	436032,6
Euro II	49	62290,4	62290,4

Tabla 6.7. Datos de entrada de la flota – año 2007 – configuración plana.

Datos de entrada de la flota			
año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Euro I	31	62290,4	934355,5
Euro II	136	62290,4	498322,9
Euro III	97	62290,4	311451,8

Tabla 6.7. Datos de entrada de la flota – año 2015 – configuración plana.

- **Datos de velocidad de la flota.** Como se indicó anteriormente, el valor de velocidad media de recorrido viene determinada con valor de 25 km/h, sin pendiente y al 100% de carga.

Subsector	Legislation Standar	Velocidad = 20 km/h	
		Urban	Urban
		Speed (km/h)	Driving Share (%)
Urban Buses Standar. 15 toneladas	Conventional	25	100
	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	25	100
	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	25	100
	HD Euro III – 2000 standars	25	100

Tabla 6.8. Datos de entrada velocidad media de la flota – configuración plana.

- **Otros valores complementarios de ingreso en COPERT 4.** Adicional a los parámetros indicados, existen otros más que sirven de apoyo complementario para la cumplimentación de los cálculos de emisiones (Tabla 6.9).

Parámetro	Valor complementario
Emisiones de CO2 debido al lubricante	Predeterminadas - Apply
Datos de selección de carga	100% - Apply
Datos de variación de pendientes	Don't apply.
Relación de NO2 a NOX	Predeterminadas.
Fracción carbono elemental y carbono orgánico en PM	Predeterminado.
Parámetros de los factores de emisión en caliente	Speed limits – Predeterminado Coeficientes - Predeterminado

Tabla 6.9. Valores complementarios de ingreso – configuración plana.

6.2.1 Resultados obtenidos caso específico ciudad de Ambato – configuración plana.

Especificada una configuración plana, donde se indica un recorrido completo del autobús dentro del circuito urbano tipo (ida + vuelta), sin tomar en cuenta la orografía específica de la ciudad de Ambato, COPERT 4 presenta los siguientes resultados, indicados de la siguiente manera para facilidad de lectura y comparación:

- Consumo de combustible (FC) y emisión de CO2 – Ambato configuración plana.
- Emisión de CO, VOC y NMVOC – Ambato configuración plana.
- Emisión de CH4 y SO2 – Ambato configuración plana.
- Emisión de NOx, NO y NO2 – Ambato configuración plana.
- Emisión de N2O y NH3 – Ambato configuración plana.
- Emisión de material particulado y de carbón – Ambato configuración plana.
- Emisiones metálicas a la atmósfera – Ambato configuración plana.

Cabe señalar que los siguientes gráficos no son comparativos anuales, sino que representan la evolución anual bajo una configuración plana del consumo de combustible y emisiones contaminantes, debido a que la cantidad de unidades de transporte para cada año difiere de los otros.

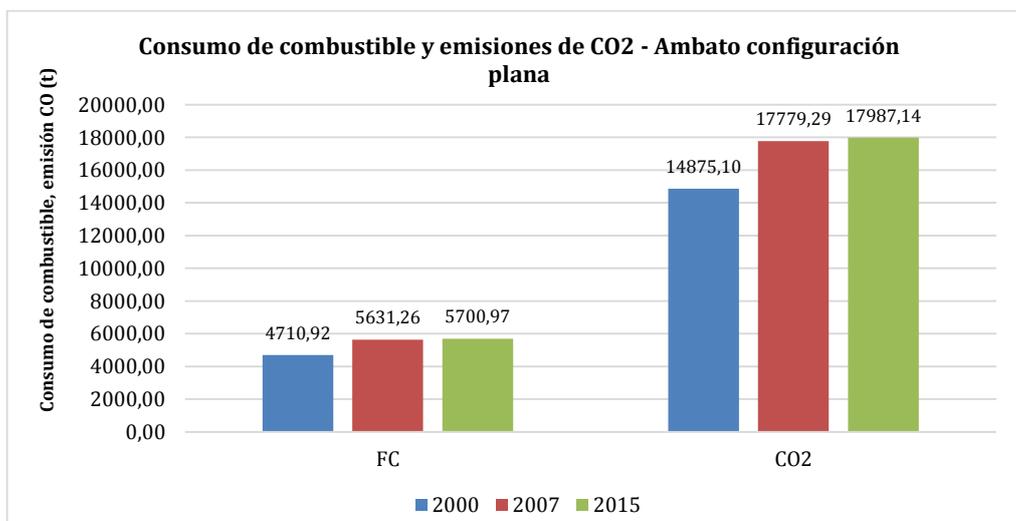


Figura 6.10. Consumo de combustible y emisión de CO2 – Ambato configuración plana

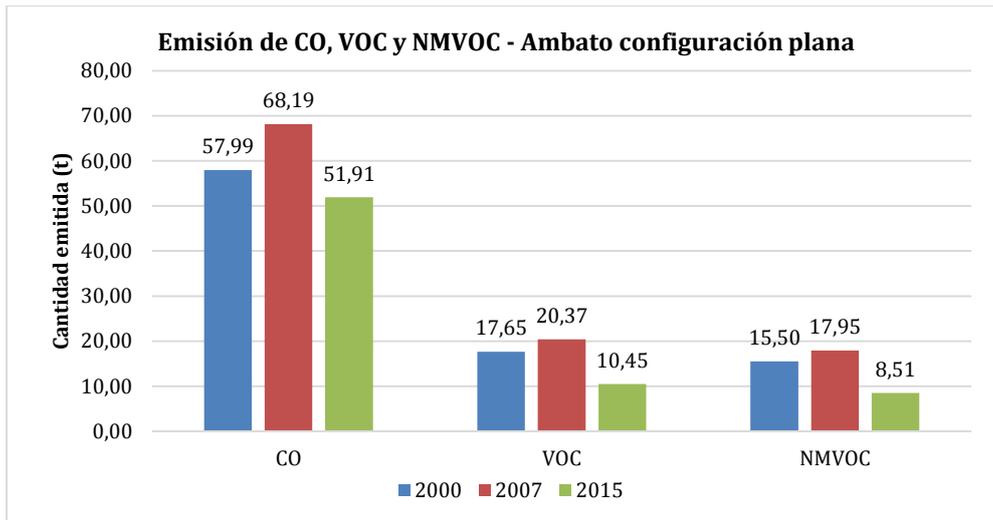


Figura 6.11. Emisión de CO, VOC y NMVOC – Ambato configuración plana

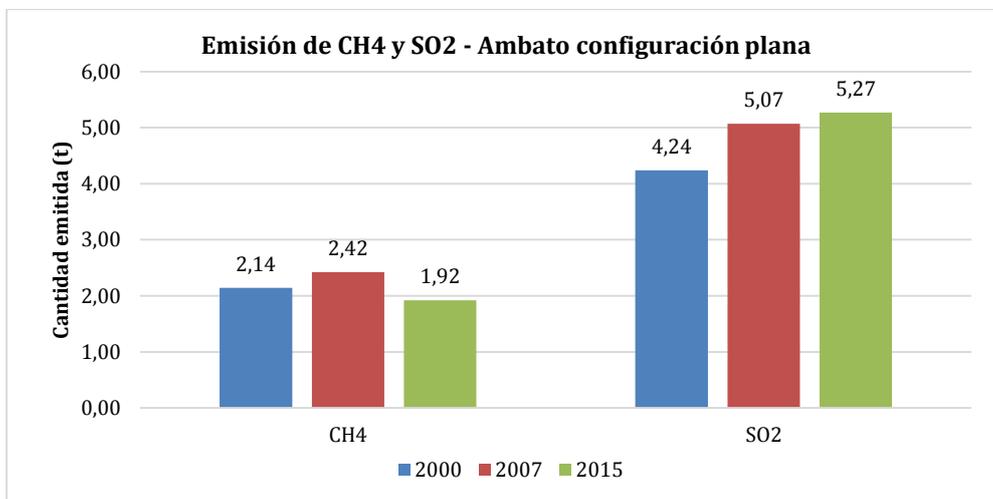


Figura 6.12. Emisión de CH4 y SO2 – Ambato configuración plana

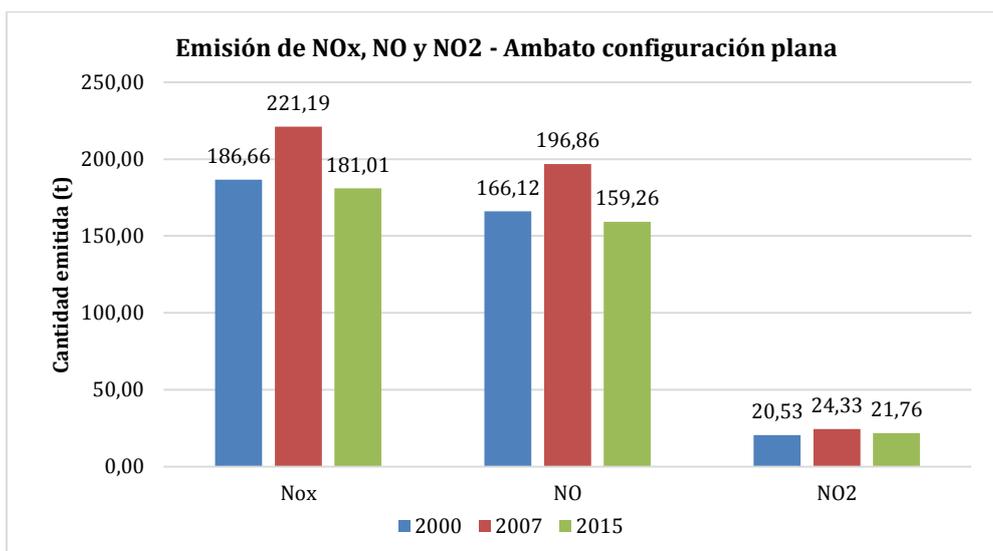


Figura 6.13. Emisión de NOx, No y NO2 – Ambato configuración plana

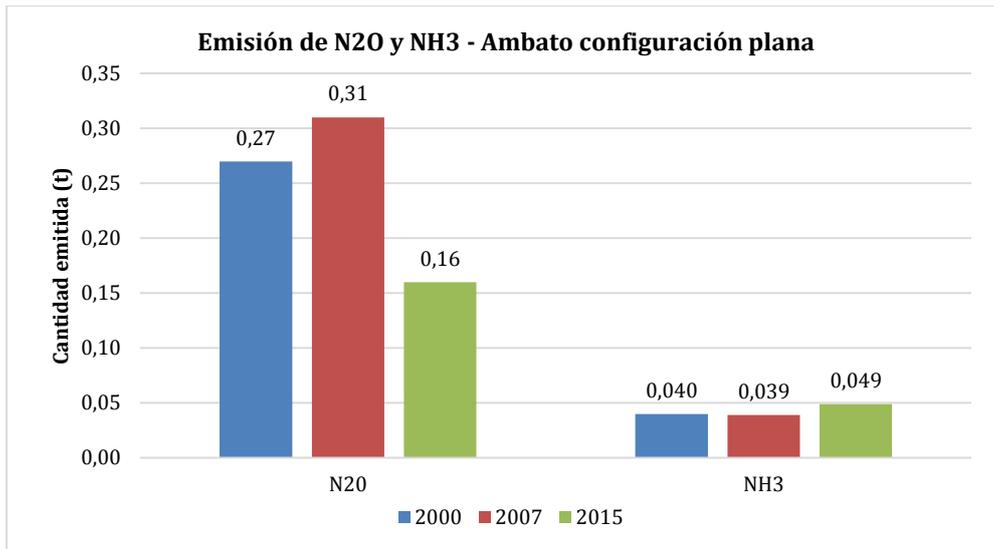


Figura 6.14. Emisión de N2O y NH3 – Ambato configuración plana

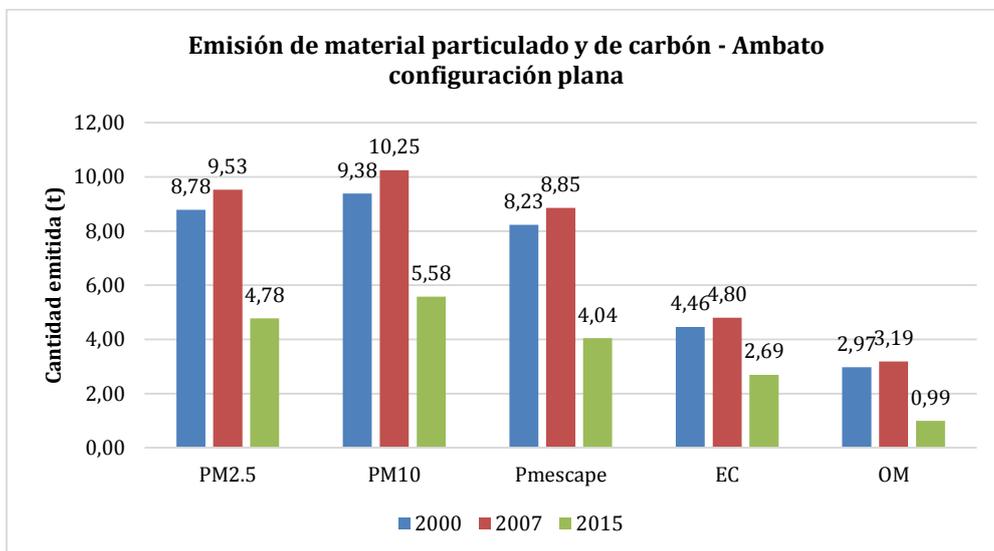


Figura 6.15. Emisión de material particulado y de carbón – Ambato configuración plana

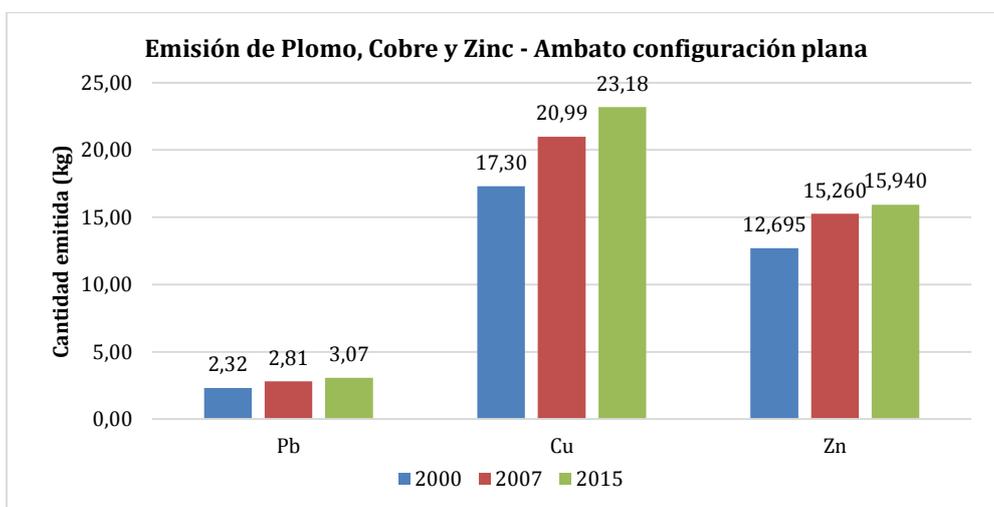


Figura 6.16. Emisión de Pb, Cu y Zn – Ambato configuración plana

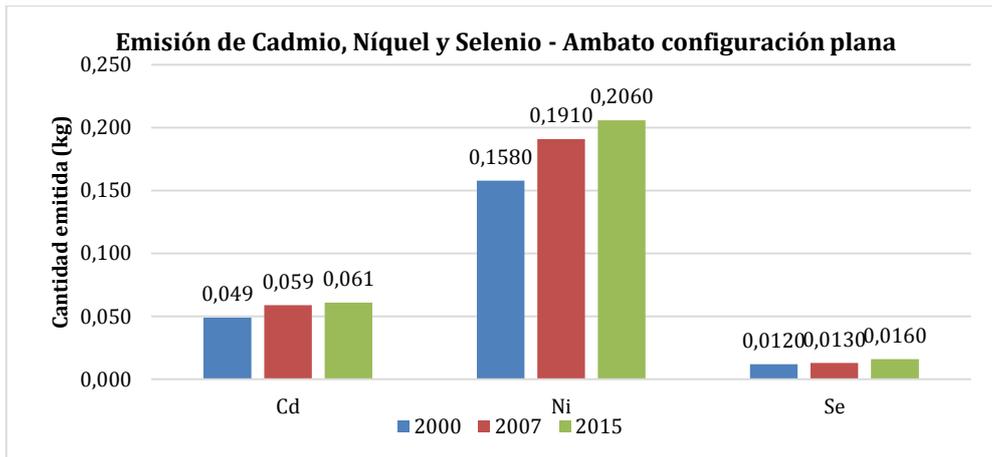


Figura 6.17. Emisión de Cd, Ni y Se – Ambato configuración plana

6.3 Emisiones caso específico ciudad de Ambato - configuración real.

Terminado el estudio inicial bajo una configuración sin influencia de la orografía propia de la ciudad de Ambato, se realiza el mismo estudio bajo influencia de aplicación de las pendientes de las que esta compuesta recorrido tipo dentro del casco urbano local.

Para singularización aproximada de la orografía de la ciudad de Ambato se aplican las siguientes hipótesis y datos de entrada:

- **Valores de recorrido medio y tiempo de recorrido.** Al suponer un circuito con afección directa de la orografía, el recorrido se subdivide en dos tramos (recorrido de ida y recorrido de vuelta), los mismos que a su vez se dividen en tres porciones (porción de recorrido con pendiente positiva, porción de recorrido plano, y porción de recorrido con pendiente negativa), los mismos que englobarían los cambios de pendiente dentro de la ciudad.

Para englobamiento de las pendientes, se congregan estos cambios de acuerdo a la suposición que: en el tramo de ida el autobús recorre 4,86 km (19%) en descenso con pendiente de -2° , 16,128 km (63%) en planicie y 4,608 km (18%) en ascenso con pendiente de 4° , siendo el mismo recorrido para el tramo de ida con variación de pendiente contraria, ascenso inicial de 2° , recorrido plano y descenso de -4° .

	Recorrido medio L _{trip} (km)	Tiempo de recorrido t _{trip} (h)	Ángulo de variación de la pendiente
Tramo descendente	4,864	0,29	-2°
Tramo plano	16,128	0,95	0°
Tramo ascendente	4,608	0,27	4°

Tabla 6.10. Datos de recorrido medio y tiempo de recorrido – ida

	Recorrido medio L _{trip} (km)	Tiempo de recorrido t _{trip} (h)	Ángulo de variación de la pendiente
Tramo descendente	4,608	0,27	-4°
Tramo plano	16,128	0,95	0°
Tramo ascendente	4,864	0,29	2°

Tabla 6.11. Datos de recorrido medio y tiempo de recorrido - regreso

- **Valores de entrada de la flota.** En la aplicación de la configuración real, los valores de población de la flota, kilometraje anual recorrido kilometraje principal de la flota, tanto para el tramo de ida, como tramo de vuelta quedan determinados acorde a información a continuación:

Datos de entrada de la flota			
año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	5917,58	59175,85
Euro I	82	5917,58	5917,58

Tabla 6.12. Datos de entrada de la flota – año 2000 – tramo descendente ida - ascendente regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	5917,58	100598,94
Euro I	65	5917,58	41423,09
Euro II	49	5917,58	5917,58

Tabla 6.13. Datos de entrada de la flota – año 2007 – tramo descendente ida - ascendente regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Euro I	31	5917,58	88763,77
Euro II	136	5917,58	47340,68
Euro III	97	5917,58	29587,92

Tabla 6.14. Datos de entrada de la flota – año 2015 – tramo descendente ida - ascendente regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	19621,46	196214,65
Euro I	82	19621,46	19621,46

Tabla 6.15. Datos de entrada de la flota – año 2000 – tramo plano ida – plano regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	19621,46	333564,90
Euro I	65	19621,46	137350,25
Euro II	49	19621,46	19621,46

Tabla 6.16. Datos de entrada de la flota – año 2007 – tramo plano ida – plano regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Euro I	31	19621,46	294321,97
Euro II	136	19621,46	156971,72
Euro III	97	19621,46	98107,32

Tabla 6.17. Datos de entrada de la flota – año 2015 – tramo plano ida – plano regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	5606,13	56061,33

Euro I	82	5606,13	5606,13
---------------	----	---------	---------

Tabla 6.18. Datos de entrada de la flota – año 2000 – tramo ascendente ida - descendente regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	5606,13	95304,26
Euro I	65	5606,13	39242,93
Euro II	49	5606,13	5606,13

Tabla 6.19. Datos de entrada de la flota – año 2007 – tramo ascendente ida - descendente regreso

Datos de entrada de la flota			
año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Euro I	31	5606,13	84091,99
Euro II	136	5606,13	44849,06
Euro III	97	5606,13	28030,66

Tabla 6.20. Datos de entrada de la flota – año 2015 – tramo ascendente ida - descendente regreso

- **Datos de velocidad de la flota.** El valor de velocidad media de recorrido viene determinada con valor de 25 km/h, sin pendiente y al 100% de carga.

Subsector	Legislation Standard	Velocidad = 20 km/h	
		Urban	Urban
		Speed (km/h)	Driving Share (%)
Urban Buses Standar. 15 toneladas	Conventional	25	100
	HD Euro I – 91/542/EEC Stage	25	100
	HD Euro II – 91/542/EEC Stage	25	100
	HD Euro III – 2000 standards	25	100

Tabla 6.21. Datos de entrada velocidad media de la flota – configuración real.

- **Otros valores complementarios de ingreso en COPERT 4.** Adicional a los parámetros indicados, existen otros más que sirven de apoyo complementario para la cumplimentación de los cálculos de emisiones (Tabla 6.22).

Parámetro	Valor complementario
Emisiones de CO2 debido al lubricante	Predeterminadas - Apply
Datos de selección de carga	100% - Apply
Datos de variación de pendientes	De acuerdo a situación.
Relación de NO2 a NOX	Predeterminadas.
Fracción carbono elemental y carbono orgánico en PM	Predeterminado.
Parámetros de los factores de emisión en caliente	Speed limits – Predeterminado Coeficientes - Predeterminado

Tabla 6.22. Valores complementarios de ingreso – configuración plana.

6.3.1 Resultados obtenidos caso específico ciudad de Ambato – configuración real.

Pormenorizada la configuración real aproximada, tomando en cuenta la orografía específica de la ciudad de Ambato, COPERT 4 presenta los siguientes resultados, representados de la siguiente manera para facilidad de lectura y comparación:

- Consumo de combustible (FC) y emisión de CO2 – Ambato configuración real.
- Emisión de CO, VOC y NMVOC – Ambato configuración real.
- Emisión de CH4 y SO2 – Ambato configuración real.

- Emisión de NOx, NO y NO2 – Ambato configuración real.
- Emisión de N2O y NH3 – Ambato configuración real.
- Emisión de material particulado y de carbón – Ambato configuración real.
- Emisiones metálicas a la atmósfera – Ambato configuración real.

Cabe señalar que, de la misma manera que con el estudio con configuración plana, los siguientes gráficos no son comparativos anuales, sino que representan la evolución anual del consumo de combustible y emisiones contaminantes en una aproximación real, debido a que la cantidad de unidades de transporte para cada año difiere de los otros.

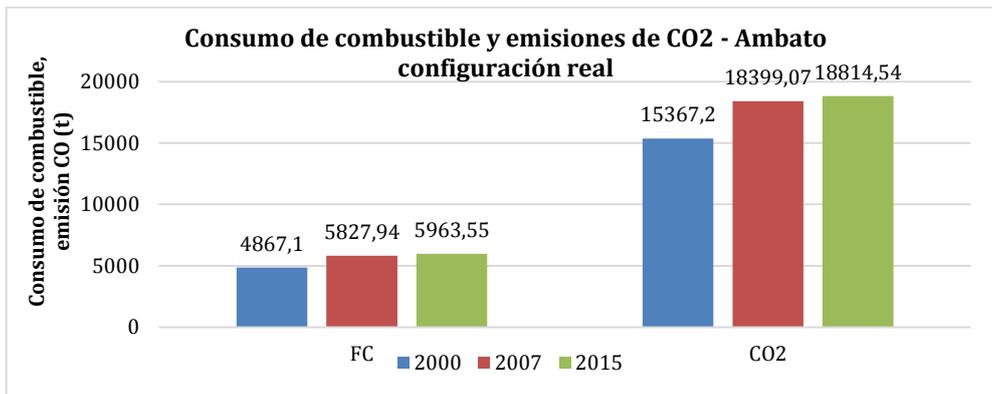


Figura 6.18. Consumo de combustible y emisión de CO2 – Ambato configuración real.

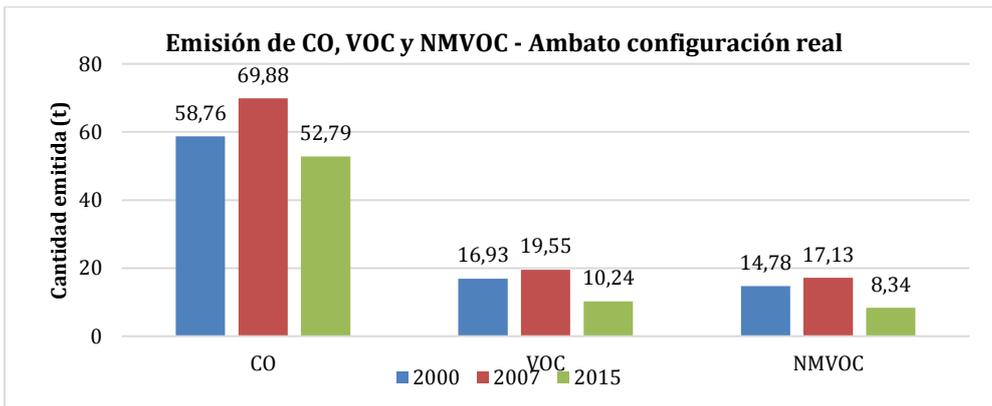


Figura 6.19. Emisión de CO, VOC y NMVOC – Ambato configuración real.

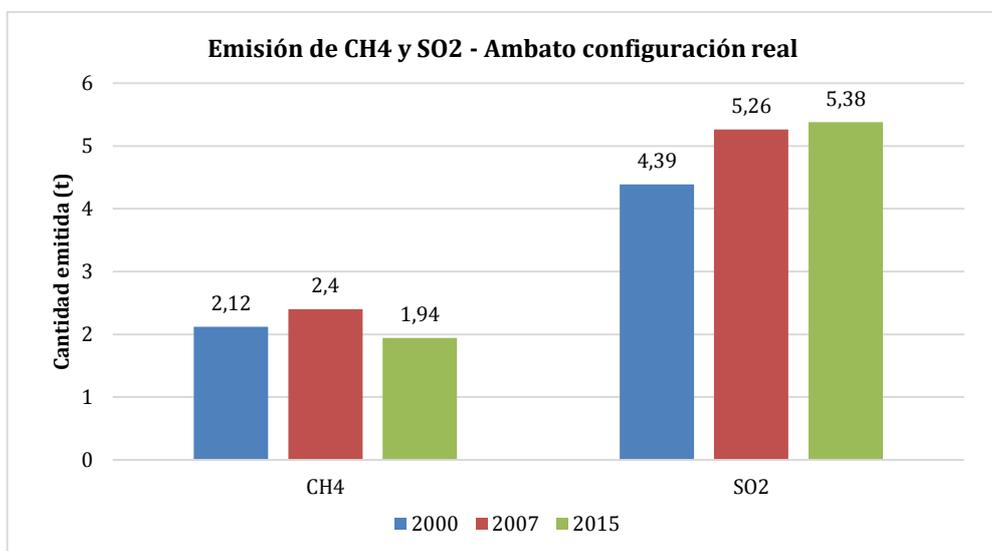


Figura 6.20. Emisión de CH4 y SO2 – Ambato configuración real.

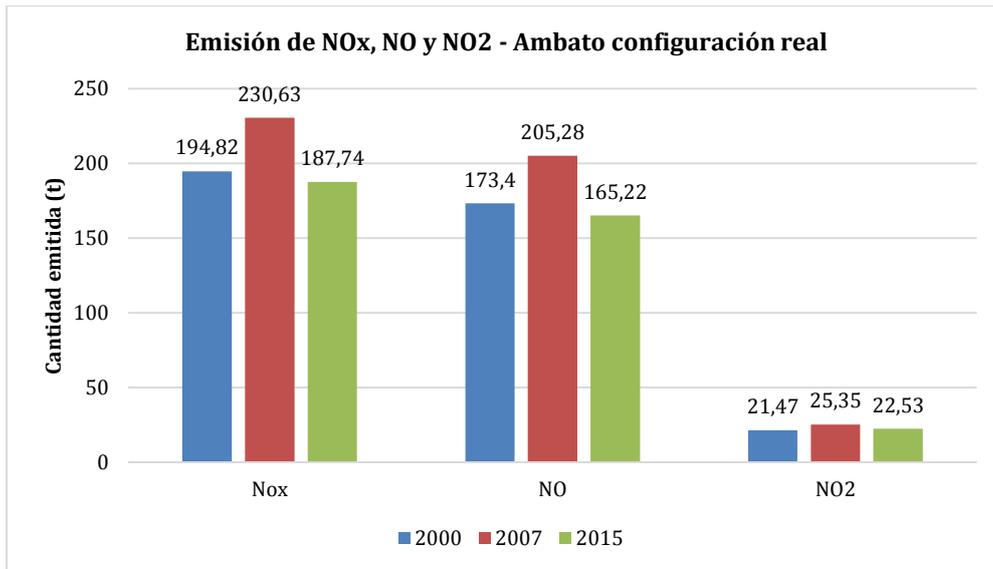


Figura 6.21. Emisión de NOx, No y NO2 – Ambato configuración real.

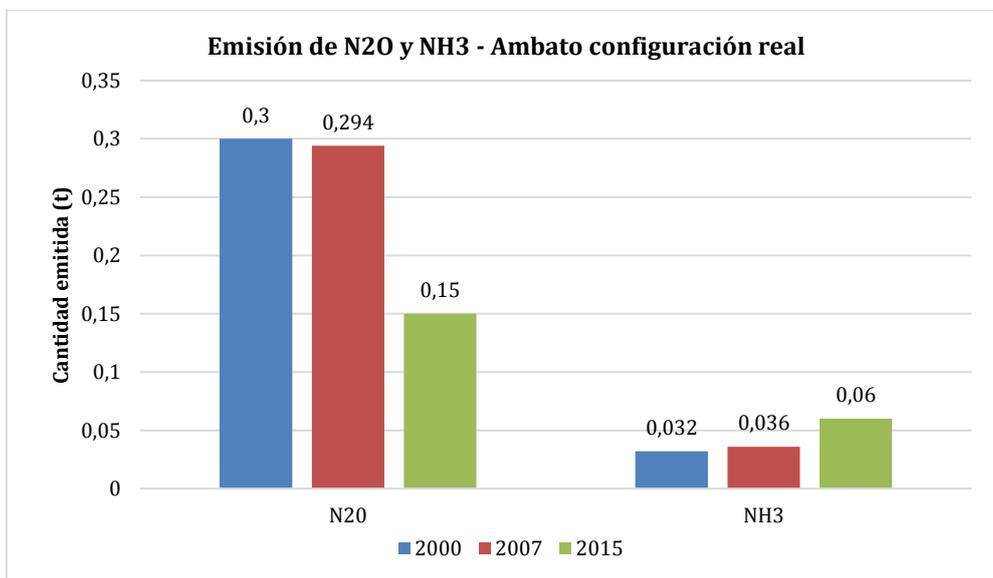


Figura 6.22. Emisión de N2O y NH3 – Ambato configuración real.

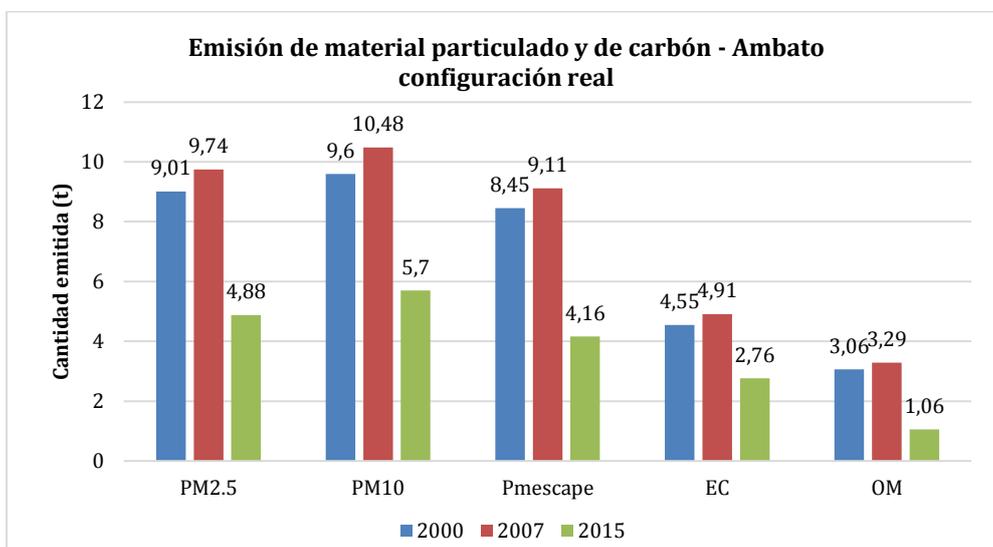


Figura 6.23. Emisión de material particulado y de carbón – Ambato configuración real.

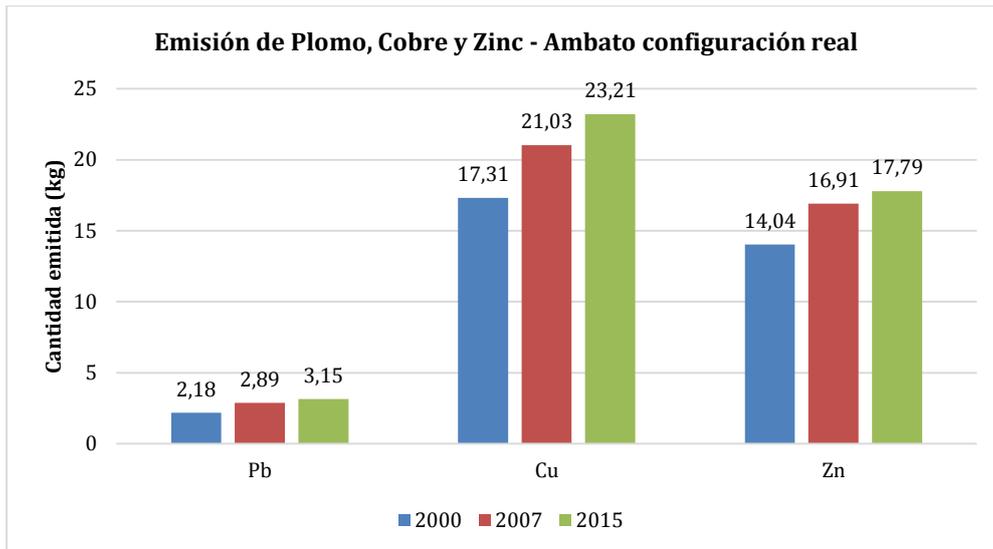


Figura 6.24. Emisión de Pb, Cu y Zn – Ambato configuración real.

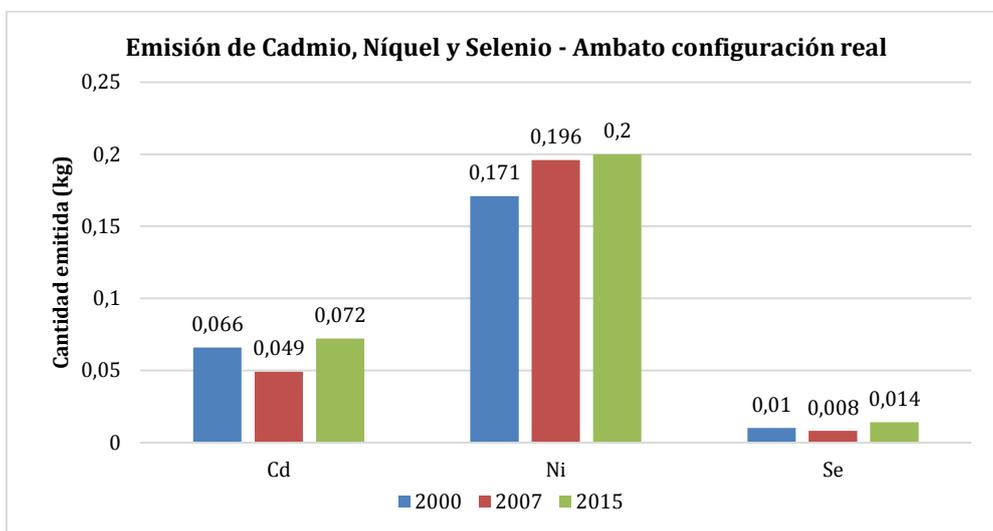


Figura 6.25. Emisión de Cd, Ni y Se – Ambato configuración real.

6.4 Estudio comparativo configuración plana – real ciudad de Ambato.

En relación comparativa sobre los resultados obtenidos dentro del análisis inicial de configuración plana con respecto a estudio consecuente con caracterización real aproximada, se presenta una diferencia (en algunos casos negativa) con base a los resultados presentados por COPERT 4.

6.4.1 Relación de diferencia en consumo de combustible y CO₂.

Por afección directa de la aplicación de la pendiente, y en consecución directa con el comportamiento del software COPERT 4 sobre el incremento – reducción de las emisiones por pendiente dentro de la estimación de emisiones en su metodología explicados en el apartado 5.2.1.

Tanto en el caso del consumo de combustible FC, como en la emisión de CO₂ correspondiente se observa una diferencia positiva, lo que explicaría que en casos de ciudades como Ambato por su orografía irregular se evidencia en la realidad un mayor consumo y una mayor emisión de CO₂ con respecto a ciudades planas.

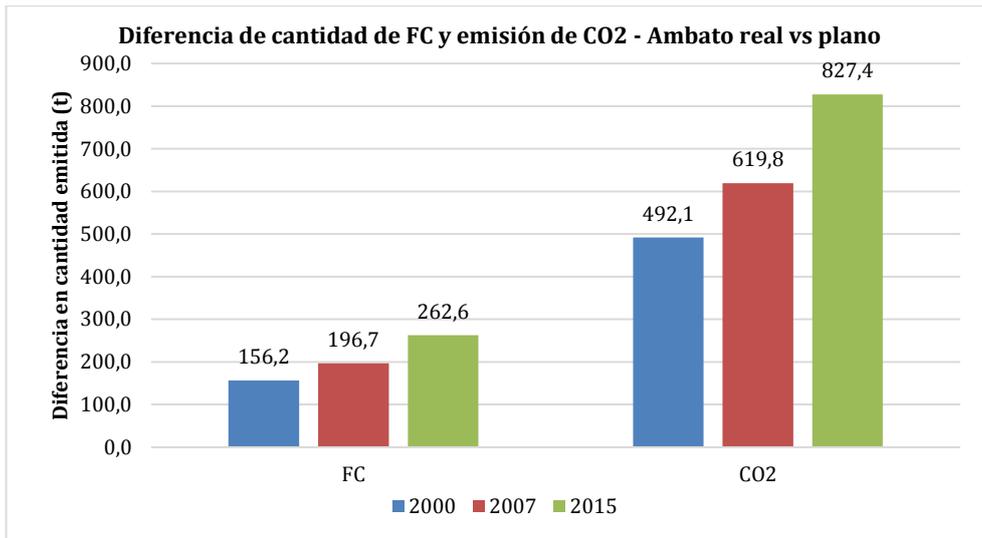


Figura 6.26. Diferencia de consumo de combustible FC y emisión de CO2, Ambato real vs plano

6.4.2 Relación de diferencia en emisión de CO, VOC y NMVOC.

En el caso de las diferencia expresas en relación a la comparativa entre emisiones de CO, VOC y NMVOC se constata un efecto particular, la diferencia de CO es positiva, mientras que la diferencia de VOC y NMVOC es negativa, lo que señalaría que en el caso real según la metodología de COPERT, se emitiría menos cantidad de VOC y NMVOC en ciudades con características orográficas irregulares con respecto a ciudades con configuración plana.

Es importante recordar que COPERT 4 toma en cuenta únicamente los factores de emisión en caliente (hot emissions), por lo que este fenómeno de diferencia puede no representar la realidad experimental de la flota del transporte.

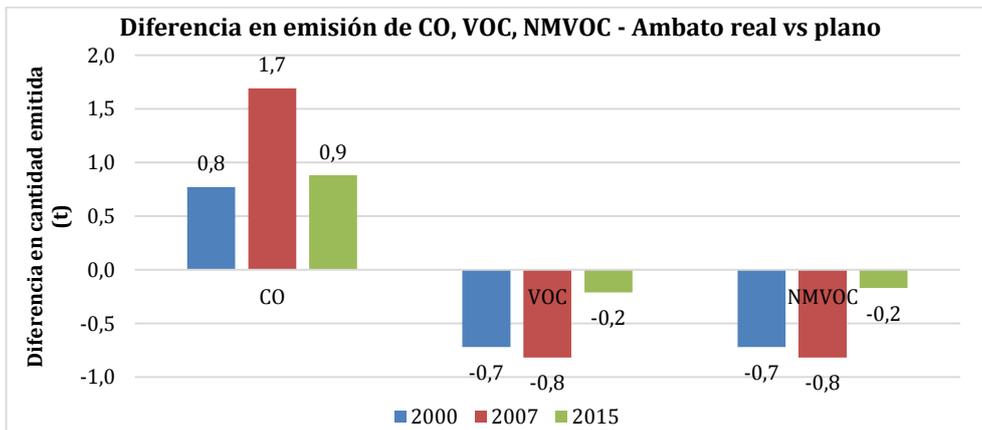


Figura 6. 27. Diferencia de emisión de CO, VOC y NMVOC – Ambato real vs plano.

6.4.3 Relación de diferencia en otras emisiones contaminantes.

Finalmente, de forma complementaria a la comparación de las estimaciones de emisión para ambas configuraciones propuestas (plana y real), se añaden los resultados expuestos para el resto de componentes nocivos identificados por la metodología COPERT, verificando que en todos los casos se certificó una diferencia positiva, enunciando así el incremento de emisiones en el caso real aproximado con respecto al análisis con configuración plana.

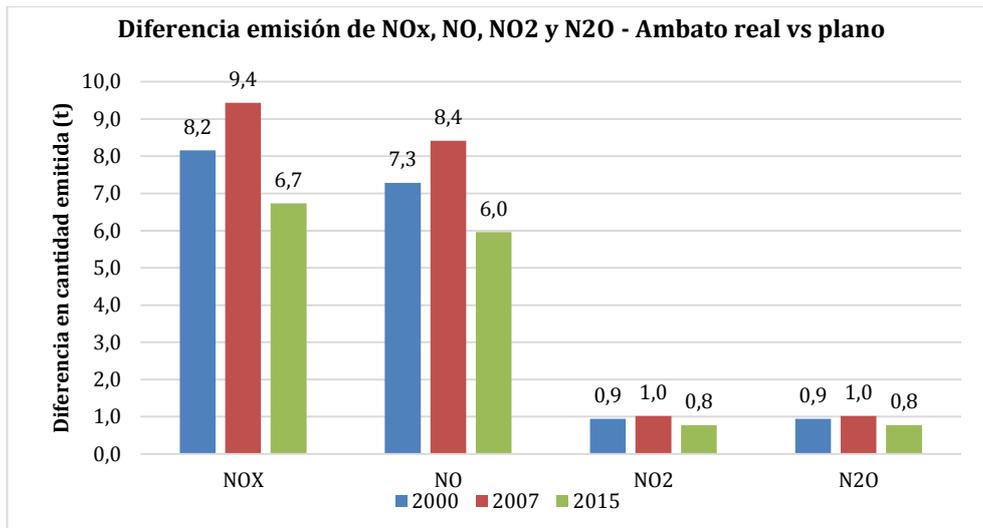


Figura 6.28 Diferencia de emisión de NOx, NO, NO2 y N2O – Ambato real vs plano.

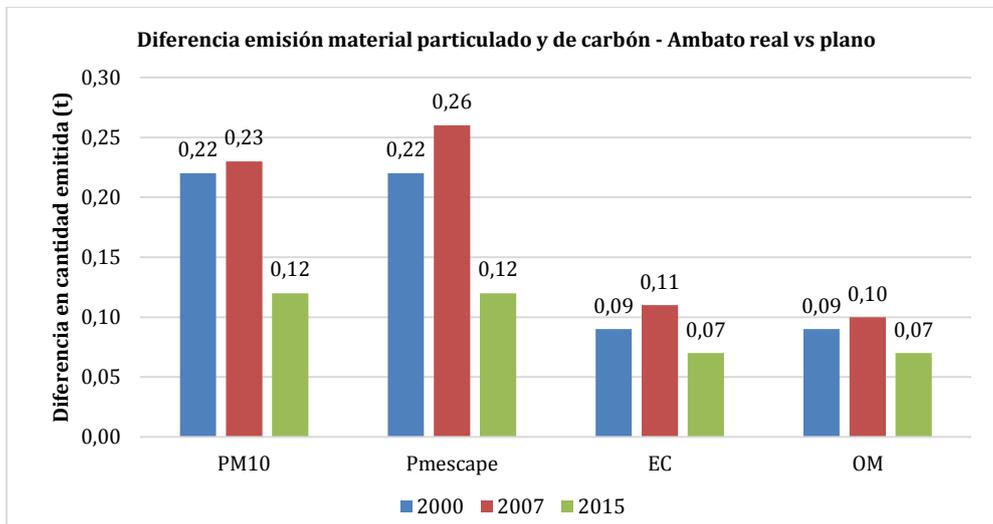


Figura 6.29. Diferencia de emisión de material particulado y de carbón – Ambato real vs plano

6.5 Proyección de emisiones en escenarios hipotéticos.

La metodología empleada en COPERT 4, partiendo de un enfoque top-down, permite la realización de proyecciones de emisiones en escenarios hipotéticos, con la finalidad de poder desarrollar un marco propositivo de evolución de las estimaciones bajo ciertos cambios que se pueden aplicar mediante medidas generales por los gobiernos locales o los medios internos de control de las emisiones urbanas.

Para la ciudad de Ambato, una de las principales prioridades establecidas por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipalidad de Ambato dentro de su plan maestro de movilidad y transporte 2012 – 2032, se centra en la renovación parcial o total de la flota hacia tecnología con una mayor eficiencia y menor emisión de fuentes contaminantes. En aplicación la meta propuesta por el GAD Municipalidad de Ambato, dentro del presente TFM se proponen dos situaciones hipotéticas a corto plazo para poder justificar estadísticamente las ventajas que se obtendrían se esta actualización de tecnología, siendo las dos opciones:

- Actualización de la flota del año 2015 a una flota potencial 50% Euro II – 50% Euro III.

- Actualización de la flota del año 2015 a una flota potencial 100% Euro III.

6.5.1 Proyección de consumo de combustible y emisión de CO2.

Centrándose dentro del consumo de combustible, y por consiguiente en la emisión de CO₂, COPERT 4 indica un incremento en ambos parámetros, debido principalmente a que, al ser un cambio de tecnología a unidades nuevas, el consumo y emisiones en los primeros años de aplicación son mayores que los años consecuentes durante un rango considerable de tiempo, aunque en las medidas de COPERT también influye los resultados característicos de los que se basa las fórmulas de cálculo para cada normativa aplicada.

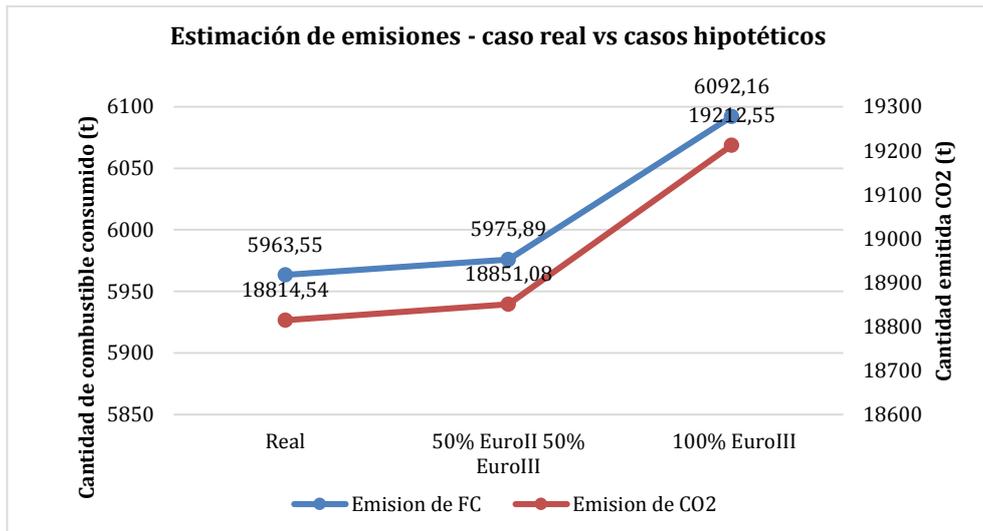


Figura 6.30. Proyección de FC y emisión de CO₂ – Ambato real vs casos hipotéticos.

6.5.2 Proyección de otras emisiones contaminantes a la atmósfera.

A continuación se presentan las proyecciones de otras emisiones contaminantes a la atmósfera, por transformación de la tecnología según los dos casos hipotéticos propuestos, donde en la mayoría de los casos se apunta una clara disminución de las emisiones con respecto a la real aproximada actual, facilitando la toma de decisiones de tipo políticas, base principal del enfoque por el que fue realizado el software COPERT.

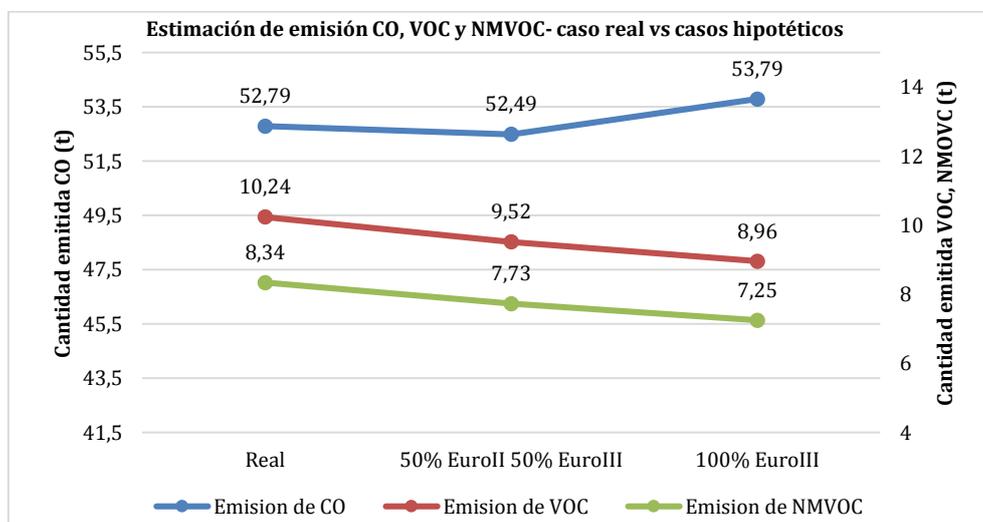


Figura 6.31. Proyección de emisiones de CO, VOC y NMVOC – Ambato real vs casos hipotéticos.

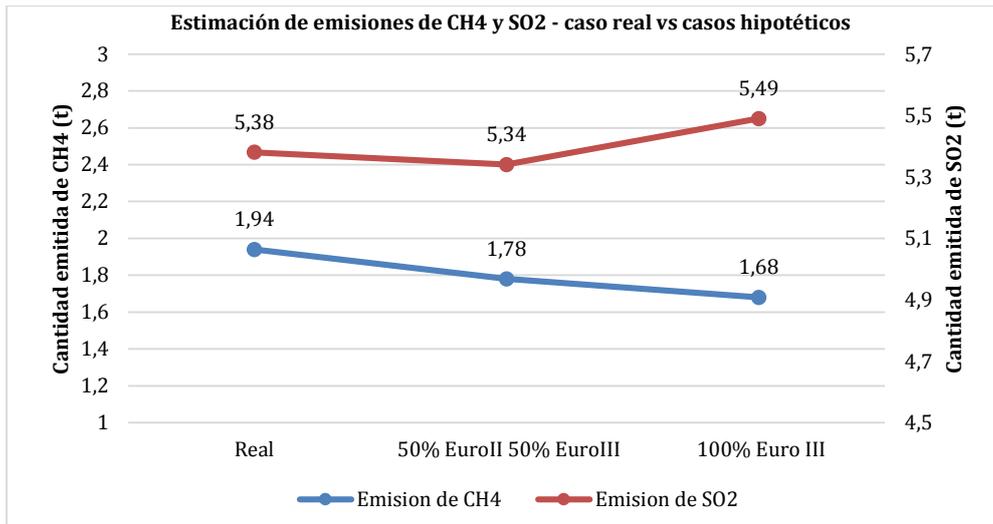


Figura 6.32. Proyección de emisiones de CH₄ y SO₂ – Ambato real vs casos hipotéticos.

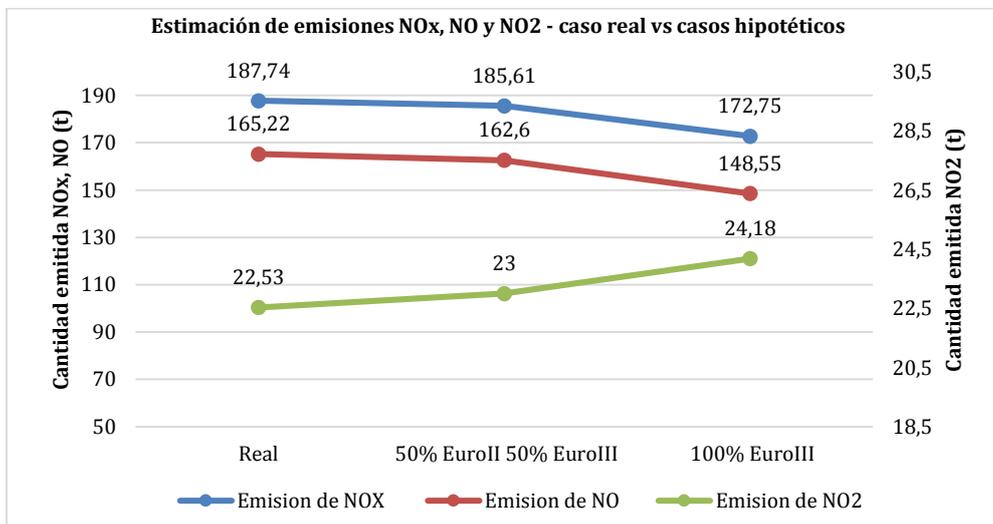


Figura 6.33. Proyección de emisiones de NO_x, NO y NO₂ – Ambato real vs casos hipotéticos.

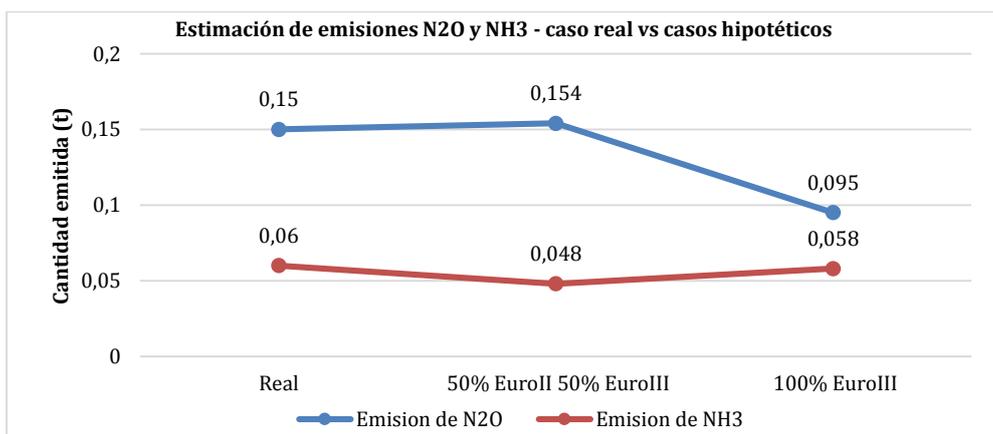


Figura 6.34. Proyección de emisiones de N₂O y NH₃ – Ambato real vs casos hipotéticos.

6.5.3 Proyección de emisiones de material particulado y metálico a la atmósfera.

A diferencia de las proyecciones de emisión establecidas dentro del análisis de emisiones gaseosas reveladas en numerales anteriores, en el caso de las emisiones de material particulado y metálico a la

atmósfera es muy clara la tendencia de reducción aplicada en cada uno de los casos hipotéticos que se analizan. Esta tendencia lineal de reducción obedece a las restricciones que impone cada una de las legislaciones con respecto a la emisión de estos materiales, que como se explicó inicialmente son de gran afección a la salud del ser humano, al mismo que son agentes potenciales de contaminación medioambiental.

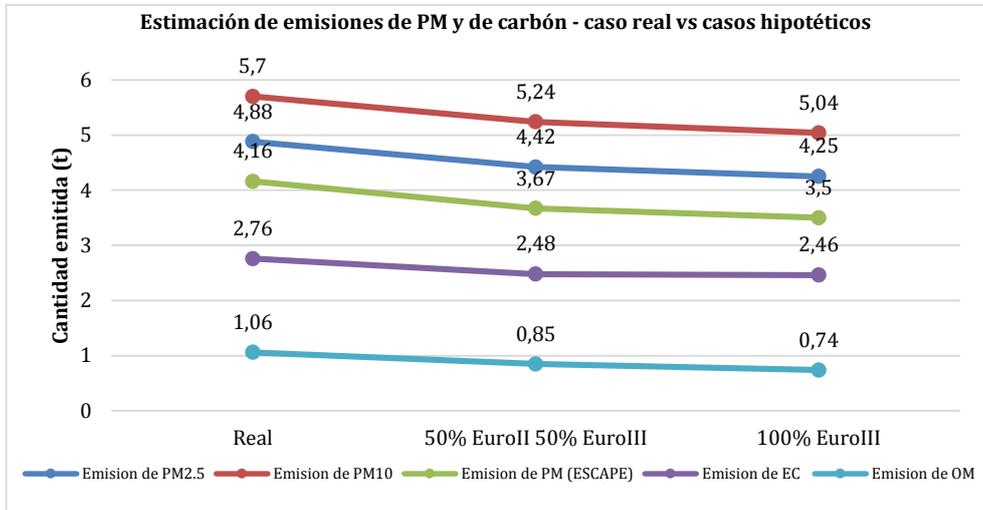


Figura 6.35. Proyección de emisiones de PM y de carbono – Ambato real vs casos hipotéticos

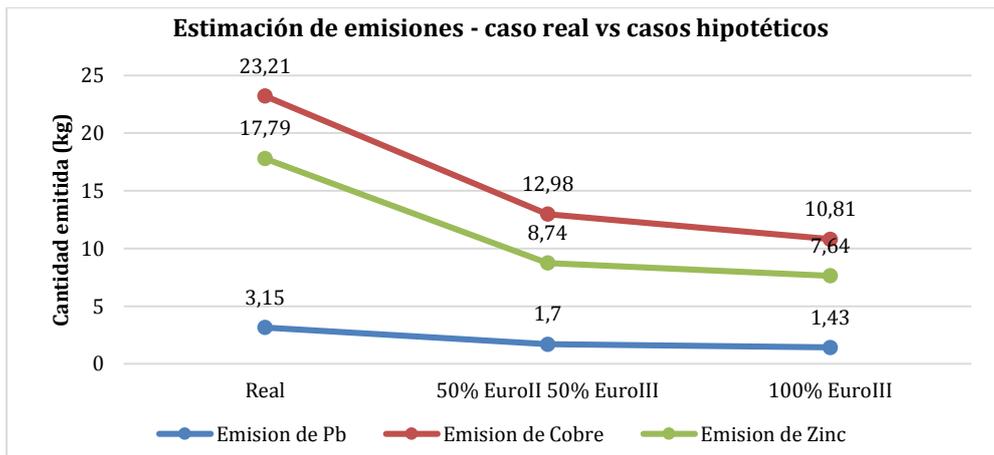


Figura 6.36. Proyección de emisiones de Pb, Cu y Zn – Ambato real vs casos hipotéticos

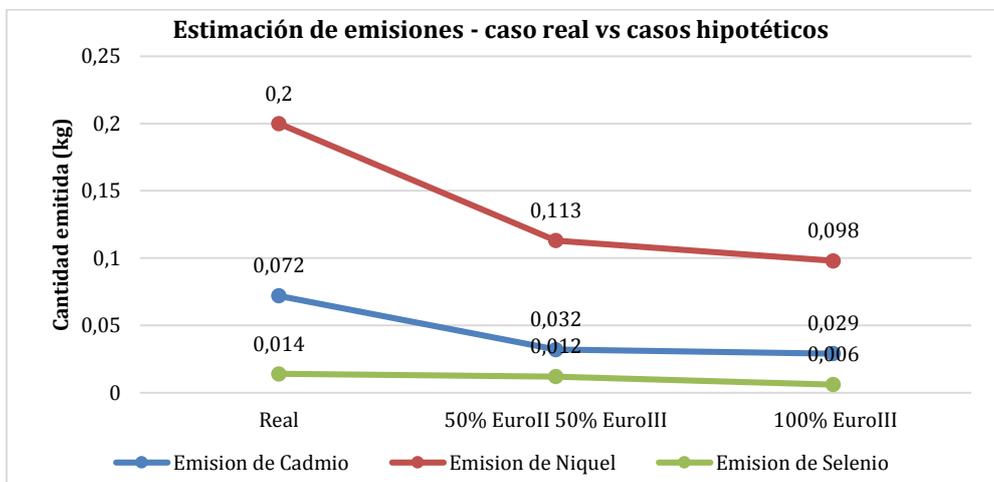


Figura 6.37. Proyección de emisiones de Cd, Ni y Se – Ambato real vs casos hipotéticos

7. CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones.

Se ha realizado una descripción metodológica y de funcionamiento del **software COPERT 4**, específicamente para la clasificación de buses tipo con uso de combustible diésel, utilizados dentro de la flota de transporte de la ciudad de Ambato, primero bajo manejo de un **caso inicial modelo** (1 vehículo – recorrido 1km), para posteriormente ubicar la simulación de consumo de combustible, emisiones gaseosas, de material particulado, de carbón y metálico para el **caso específico local**.

Tomando como directriz investigativa la guía de inventario de emisión contaminante EMEP/EEE de aire para el cálculo de las emisiones de contaminante, se ha comprendido mayoritariamente la **metodología empleada** dentro del software COPERT4.

Dentro de la caracterización de las simulaciones de COPERT en condiciones de referencia, los resultados de **consumo de combustible y emisiones de CO₂** a la atmósfera del caso modelo inicial mantienen un comportamiento lineal en el transcurso del tiempo, debido en gran parte a la no inclusión por los desarrolladores de parámetros de factores de emisión en frío, factores de emisión por evaporación, así como la no participación de factores de degradación por recorrido cumplido en el tiempo.

De forma estadística, según la metodología de COPERT, se presencia de forma clara una **diferencia del comportamiento del consumo de combustible y emisiones de CO₂ por unidad de transporte público**, con un estimado de: 55,18 l/100km de recorrido para convencional (produciendo 1,45 kg/km de CO₂), 47,17 l/100km de recorrido para Euro I (produciendo 1,243 kg/km de CO₂), 45,42 l/100km de recorrido para Euro II (produciendo 1,97 kg/km de CO₂) y 47,32 l/100km de recorrido para Euro III (produciendo 1,24 kg/km de CO₂).

Los resultados de las simulaciones presentados por COPERT en el caso de **CO, VOC, NMVOC** siguen una curva creciente con respecto al paso de los años de recorrido del vehículo; para **CH₄** y la emisión de **metales** a la atmósfera (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se y Zn) su comportamiento es estrictamente lineal; mientras que para **NO_x, NO y NO₂** se visualiza un decrecimiento en el rango temporal anual con excepción de **N₂O** que se mantiene lineal.

Direccionando el estudio hacia la percepción de cambios de las estimaciones por **influencia de varios factores propios del transporte urbano** se constató que:

- Por efectos de la variación de la **pendiente**, tanto el consumo de combustible (FC) como la emisión de CO₂ experimentan una curva creciente desde su punto de menor pendiente (-6°) hasta su pico de consumo por pendiente (6°), no afectando este parámetro a la emisión de VOC, NMVOC, CH₄, N₂O y emisiones de Pb, Cu y Ni que se mantienen lineales.
- Por efectos de la variación de la **carga de los vehículos**, existe una reducción del consumo de combustible (FC) y emisiones de CO₂, SO₂, CO, NO_x, NO, NO₂, material particulado y de carbón desde su carga máxima (100%) hasta su carga mínima (0%), tomando en cuenta que este último porcentaje no quiere decir que el autobús urbano solo tiene carga del motor, sino que no incluye el aumento de peso de los ocupantes del mismo, consumiendo lo indicado cuando el autobús está recorriendo sin pasajeros.
- Por efectos de la variación de la **velocidad media del recorrido** se expresa de igual forma una reducción de tipo lineal en el rango entre 20 km/h y 35 km/h, tanto para el consumo de combustible (FC) como en la consiguiente emisión de CO₂, tomando como referencia adicional que por legislación de control local un autobús urbano en Ambato no puede sobrepasar los 35 km/h, por lo que sería no práctico el uso de un rango más amplio de velocidades.

El estudio analítico de **simulación de consumo de combustible, emisiones gaseosas, material particulado y metálico** para el caso específico local, parte previo ajuste del modelo empleado dentro **CONSUMO Y EMISIONES DEL TRANSPORTE PÚBLICO EN AMBATO.**

de COPERT a una situación real, tomando en cuenta primero una configuración inicial simplificada (plana), pasando a un desarrollo posterior explícito que incluye las circunstancias de porcentajes de pendientes dentro del recorrido total, reproduciendo así las características orográficas de la ciudad de Ambato.

Al existir una diferencia en el número de autobuses dentro de cada cooperativa de transporte urbano en la ciudad de Ambato, los resultados de la simulación en el caso específico solamente indican la evolución del consumo de combustible, las emisiones gaseosas, de material particulado, de carbón y metálico a la atmósfera en el rango temporal desde el año 2000, hasta el año 2015 pasando por un registro intermedio correspondiente al año 2007, diferenciando por un lado cómo sería este comportamiento de estimaciones si la ciudad tuviera una **superficie plana** con respecto a la **orografía irregular real**.

Los resultados **del estudio comparativo de la configuración plana con respecto a la real** de la ciudad de Ambato, muestran para la orografía real un mayor consumo de combustible (FC) y aumento de emisiones de CO₂, CO, NO_x, NO, NO₂, N₂O, material particulado y de carbón en el caso real, experimentándose solamente una reducción de emisión de VOC y NMVOC para todos los años registrados (2000, 2007 y 2015).

Bajo establecimiento de **valores normalizados**, a partir de los resultados obtenidos del caso específico real de la ciudad de Ambato, se concluye que bajo esta configuración aproximada que ejemplifica la influencia de la orografía propia de la urbe central del Ecuador, en los casos de consumo de combustible y emisión de CO₂ a la atmósfera, **por autobús por kilómetro recorrido a velocidad de 25 km/h**, siguiendo el mismo patrón lineal expuesto en el caso modelo inicial, para la normativa **convencional** (2000, 2007) existe un consumo de combustible de 50,13 l/100km de recorrido con una emisión de 1,32 kg/km de CO₂, para **Euro I** (2000, 2007, 2015) se mantiene un consumo de combustible de 43,82 l/100km de recorrido con emisión de 1,16 kg/km de CO₂, para la **Euro II** (2007, 2015) el consumo de combustible es de 42,67 l/100km de recorrido con emisión de 1,12 kg/km de CO₂ y, finalmente para **Euro III** (2015) se experimenta un consumo de combustible de 44,37 l/100km de recorrido con una emisión de 1,17 kg/km de CO₂.

La proyección según la metodología empleada por COPERT del consumo de combustible y emisiones en **escenarios hipotéticos**, de flota potencial 50% Euro II – 50% Euro III o flota potencial 100% Euro III, demuestran que si bien es cierto que el **consumo de combustible (FC) y emisión de CO₂ aumenta**, las estimaciones de **emisiones** de CO, VOC, NMVOC, CH₄, NO_x, NO, N₂O, material particulado, de carbón y metálico, representan una **reducción porcentual** favorable que, teóricamente, apoyarían la toma de decisiones políticas hacia la actualización o renovación de la flota de transporte público en la ciudad de Ambato.

7.2 Principales aportaciones del autor.

Tomando en cuenta que el presente trabajo parte de procesos investigativos previos realizados en la Universidad, las principales **aportaciones** que se agregan a los lineamientos de metodologías de estimación de emisiones son:

- Se direcciona el trabajo expuesto por [Almodóvar, 2015] al **caso específico de las líneas de transporte público** con tipología de buses estándar de 15 toneladas solamente.
- Se aplica la metodología de COPERT 4 a un **caso específico en la República del Ecuador, la ciudad de Ambato**, estableciendo el punto de partida hacia la inclusión de modelos de estimación en los análisis de consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes en la gestión inicial de control de las flotas de transporte locales.
- Se propone un **estudio inicial mediante un caso ejemplo** que clarifica la comprensión del sistema informático, promueve la validación y correlación de información y verifica la variación lógica de resultados obtenidos de acuerdo a distintos **casos de influencia**.

- Se adjuntan 3 libros de Excel con todos los casos desarrollados en el documento, con sus respectivos gráficos explicativos y cuadros de correlación de datos.
- Se escenifica **situaciones de aplicación futuras**, dentro de casos hipotéticos que ayudarían a la toma de decisiones sobre la renovación o actualización dentro del conjunto de unidades de transporte público, por aquellas con normativas que promuevan una **mayor restricción en el consumo de combustible y emisión de contaminantes** a la atmósfera, en urbes con características similares a las presentadas por la ciudad de Ambato, en la República del Ecuador.

7.3 Sugerencias para trabajos futuros

Se sugiere desde una perspectiva de mediano alcance, realizar un estudio de comparación entre la metodología empleada por COPERT y modelos mencionados como el modelo *FLEET*, el modelo de *Descarbonización*, el modelo *PNUMA – TNT* y la herramienta de *Camiones y Transportes Verdes para Asia*, con la finalidad de establecer cuáles serían aplicables y bajo que configuraciones sería aconsejable su uso para obtener la mayor aproximación a la realidad de estimaciones de consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Finalmente, se recomienda desde un enfoque más profundo, el estudio comparativo de las **estimaciones expuestas por COPERT 4** para la ciudad de Ambato con respecto a un **análisis de datos reales** realizado directamente sobre las unidades de transporte, bajo patrones de conducción específicos de la urbe y seguimiento completo detallado de la afección real de la variación de la pendiente, por influencia de la orografía irregular de la urbe, en la estimación de consumo de combustible y emisiones contaminantes.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1. Software.

COPERT 4, versión 11.3 (Octubre 2015), desarrollado por Emisia S.A., Thessaloniki, Grecia.

8.2 Documentación de apoyo para el software COPERT.

D. Gkatzoflias (Emisia S.A.), C. Kouridis (Emisia S.A.), L. Ntziachristos (LAT/AUTH), Z. Samaras (LAT/AUTH). (2012). COPERT IV Users Manual. Thessaloniki, Grecia: Emisia S.A.

L. Ntziachristos, P. Boulter (2009). EMEP/CORINAIR Atmospheric Emissions Inventory Guidebook chapter on tyre, break and surface wear. EEA.

L. Ntziachristos, Z. Samaras (2014). EMEP/CORINAIR Atmospheric Emissions Inventory Guidebook chapter on exhaust emissions from road transport. EEA.

G. Mellios, L. Ntziachristos (2009). EMEP/CORINAIR Atmospheric Emissions Inventory Guidebook chapter on fuel evaporation from gasoline vehicles. EEA.

8.3 Documentación científica consultada.

Almodóvar, J. A. (2015). *Simulación de emisiones y consumo de combustible de la flota de Valladolid con COPERT 4*. Valladolid, España: UVa.

Baumert, K., Herzog, T., & Pershing, J. (2005). *Navigating the number: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. Washington D.C., Estados Unidos: Instituto de Recursos Mundiales.

Bahamonde, A. (2001). *Eliminación de NOX en gases de combustión, reducción catalítica selectiva*. Madrid: CSIC.

Cives Vilar, J. (2011). *La sonda lambda como elemento de control de emisiones*. Leganés, España: Universidad Carlos III de Madrid.

Clean Air Institute. (2013). *Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano y de carga y guías para la recompilación y organización de datos*. Washington D.C., Estados Unidos: CAI Clean Air Institute.

González, R. (2005). *Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte*. México Distrito Federal, México: UNAM MX.

Macías, J., Martínez, H., & Unal, A. (2010). Bus Technology Meta-Analysis. *Bus Technology Meta-Analysis*. Reunión anual del Consejo de Investigación sobre el Transporte.

Martínez Aguado, T., Ruiz Rúa, A., & Muro Rodríguez, A. (2008). *Modelo de consumo y emisiones en el transporte: Estado del Arte*. Castilla - La Mancha, España: EnerTrans.

Mataix González, C. (2010). *Movilidad Urbana Sostenible: Un reto energético y ambiental*. Madrid, España: Caja Madrid Obra Social.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). *Inventario Preliminar de las Emisiones de Contaminantes del Aire, de los cantones Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro*. Quito: Ministerio del Ambiente.

Nylund, N., & Erkkilä, K. (2005). *Evaluación de emisiones de autobuses: Informe resumido de 2002-2004*. Finlandia: VTT.

- Nevers, N. (1998). *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. México D.F., México: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., Eggleston, S., GoriBen, N., Hassel, D., Hickman, A., et al. (2000). *COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (Version 2.1)*. Copenhagen, Dinamarca: EEA.
- Ribeiro, S. K. (2000). *Transporte e mudancas climáticas*. Río de Janeiro, Brasil: Coepe/UFRJ.
- Villalobos, J., Salazar, C., Gavilán, C., & Rojas, C. (2013). *Eficiencia Energética en el Transporte de Carga. Impacto de la carga en el consumo*. Santiago de Chile: AChEE.
- Waldron, C., Harnisch, J., Lucon, O., Mckibbon, S., Saile, S., Wagner, F., et al. (2006). Combustión móvil. In *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 3.1 - 3.78). Washington, Estados Unidos: IPCC.

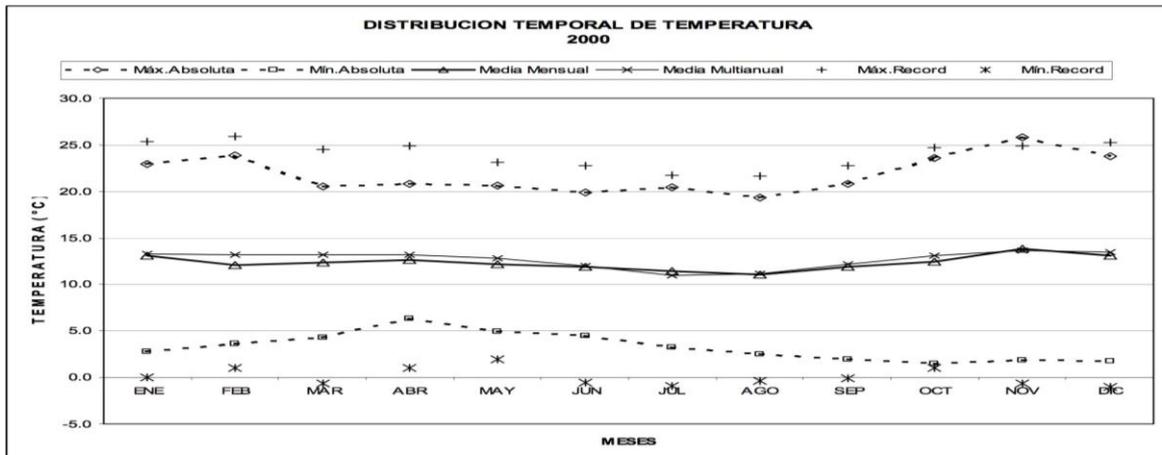
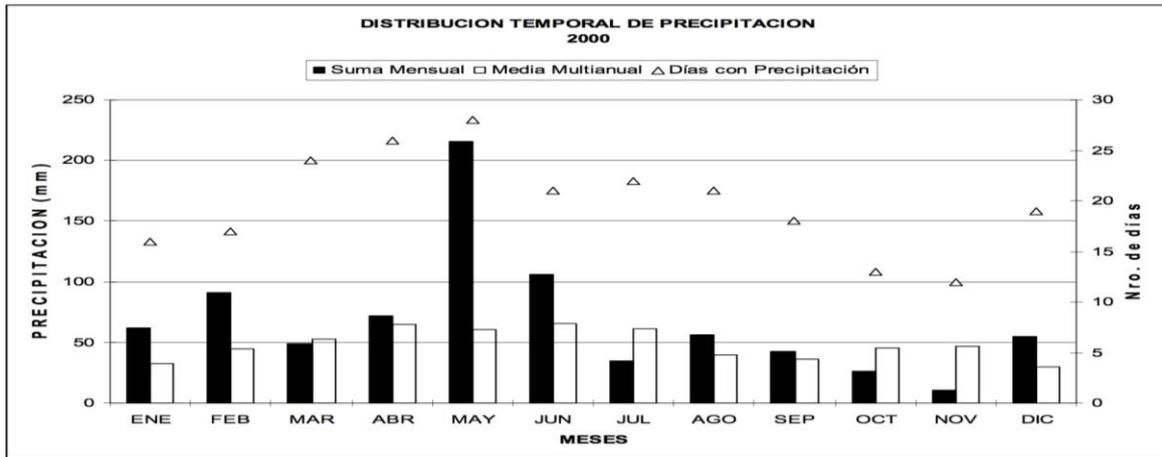
8.4 Páginas web consultadas.

- Agencia de protección ambiental EPA. (23 de Julio de 2012). *www.epa.gov*. Consultada en 3 de Enero de 2015 desde Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos: <http://www.epa.gov/air/airpollutants.html>
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. (15 de Agosto de 2010). *www.ciemat.es*. Consultada en 3 de Enero de 2016 from Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas: <http://www.ciemat.es/MCAportal/portal.do;jsessionid=00E311752EB002FEF89C08EFE62E7DE6?IDM=114&NM=4>
- Economiasimple.net. (18 de Agosto del 2011). Consultada en 21 de diciembre de 2015 desde Economía doméstica, factores a tomar en cuenta para ahorrar combustible: <http://www.economiasimple.net/factores-a-tener-en-cuenta-para-ahorrar-combustible.html>

ANEXO 1. Registro de temperatura (Universidad Técnica de Ambato).

M258 QUEROCHACA(UTA) INAMHI																			
MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)							HUMEDAD RELATIVA (%)				PUNTO DE ROCIO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)			Número de días con precipitación	
		ABSOLUTAS			M E D I A S				Máxima día	Mínima día	Media	Mensual			Mensual	Máxima en 24hrs	día		
		Máxima	Mínima	día	Máxima	Mínima	Mensual												
ENERO	152.7	22.9	5	2.8	14	19.5	7.9	13.1	95	21	42	15	73	8.0	10.8	61.9	14.7	29	16
FEBRERO	106.3	23.9	10	3.6	9	18.4	7.0	12.1					74	7.5	10.4	91.1	30.9	29	17
MARZO	106.2	20.5	10	4.3	27	17.8	8.0	12.4	96	9	45	11	77	8.1	10.8	49.1	9.1	24	24
ABRIL	97.2	20.8	14	6.3	22	18.1	8.4	12.6	96	7	53	4	77	8.5	11.1	72.2	13.7	9	26
MAYO	102.8	20.6	1	4.9	16	17.4	7.9	12.2	98	20	49	1	79	8.5	11.1	215.6	37.3	9	28
JUNIO	107.9	19.9	15	4.5	19	16.9	7.4	11.9	96	10	53	24	77	7.8	10.6	106.0	38.3	16	21
JULIO	145.2	20.4	19	3.3	31	16.5	7.1	11.4	97	4	47	28	76	7.1	10.1	34.7	5.7	23	22
AGOSTO	117.3	19.3	29	2.5	25	15.9	6.6	11.1	96	25	52	29	76	6.8	9.9	56.0	12.6	3	21
SEPTIEMBRE	133.6	20.8	3	2.0	2	17.7	6.5	11.9	94	4	46	2	73	6.9	10.0	42.6	19.9	3	18
OCTUBRE	161.0	23.6	26	1.5	26	18.8	6.9	12.5	94	9	29	25	72	7.3	10.3	26.0	7.4	7	13
NOVIEMBRE	185.3	25.8	12	1.9	13	21.6	7.0	13.8	93	29	27	13	65	6.8	10.0	10.6	7.0	1	12
DICIEMBRE	161.5	23.8	13	1.8	16	19.7	7.4	13.1	96	6	39	16	74	8.1	10.8	54.6	29.4	27	19
VALOR ANUAL	1577.0	25.8		1.5		18.2	7.3	12.3					74	7.6	10.5	820.4	38.3		

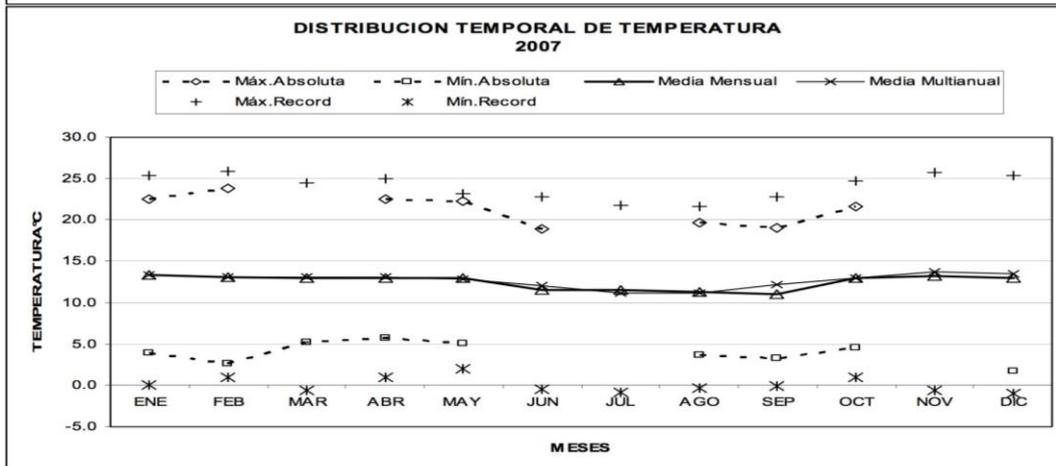
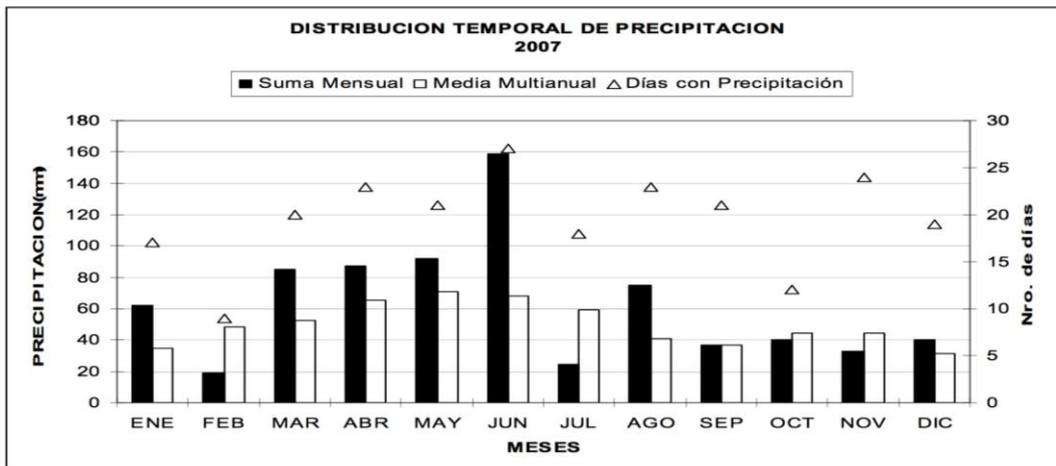
MES	EVAPORACION (mm)		NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO																Vel.Mayor Observada (m/s)	VELOCIDAD MEDIA (Km/h)				
	Suma Mensual	Máxima en 24hrs día		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA	Nro OBS												
	(m/s)	%		(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%										
ENERO	113.5	6.5	4	8	3.3	4	3.5	4	5.5	16	3.9	10	2.1	19	2.8	17	3.3	7	1.0	1	22	93	10.0	E	2.5
FEBRERO	84.0	5.0	10	8	4.5	7	3.8	7	4.4	12	2.0	6	2.9	24	2.5	13	2.8	9	4.7	3	20	87	8.0	E	2.1
MARZO	81.7	4.5	27	8	4.0	1	4.4	5	5.4	15	3.3	8	2.6	22	3.3	14	3.9	8	4.0	1	27	93	12.0	E	2.0
ABRIL	87.9	4.7	4	8	3.4	6	5.0	1	5.9	10	3.0	19	2.4	18	2.1	13	2.8	4	0.0	0	29	90	8.0	E	2.1
MAYO	71.0	4.3	2	8	5.0	2	0.0	0	4.5	20	2.6	5	2.5	23	3.0	18	4.8	7	4.0	1	24	93	10.0	W	1.8
JUNIO	74.8	4.2	29	7	2.5	2	2.5	2	7.2	14	2.6	14	3.2	27	2.8	12	4.0	4	6.0	1	22	90	14.0	E	2.1
JULIO	93.0	5.2	17	7	0.0	0	5.0	2	7.1	27	3.8	14	2.6	23	3.4	18	4.0	2	0.0	0	14	93	14.0	E	2.5
AGOSTO	79.7	5.2	30	7	5.0	2	2.7	3	6.2	20	4.4	24	3.0	29	2.0	8	2.7	3	0.0	0	11	93	14.0	E	2.5
SEPTIEMBRE	89.3	5.5	28	7	2.5	2	3.3	3	4.0	10	3.4	20	1.9	11	1.8	23	1.0	1	0.0	0	29	90	8.0	SE	2.5
OCTUBRE	115.1	6.3	24	7	2.0	1	4.0	2	6.6	29	3.7	10	2.3	26	3.0	14	3.7	8	0.0	0	11	93	14.0	E	2.8
NOVIEMBRE	123.8	7.0	10	7	3.5	9	3.8	4	6.1	18	3.6	6	2.1	24	2.3	27	3.3	4	3.5	2	6	90	12.0	E	2.8
DICIEMBRE	113.2	5.5	16	7	4.0	4	4.0	3	6.1	18	3.8	16	2.3	16	2.7	24	3.3	7	4.0	2	10	93	14.0	E	3.0
VALOR ANUAL	1127.0	7.0		7	3.3	3	3.5	3	5.8	17	3.3	13	2.5	22	2.6	17	3.3	5	2.3	1	19		14.0	E	2.0



M258 QUEROCHACA(UTA) INAMHI

MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)						HUMEDAD RELATIVA (%)					PUNTO DE ROCIO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)			Número de días con precipitación			
		ABSOLUTAS		M E D I A S		Mensual	Máxima	día	Mínima	día	Máxima	día			Mínima	día	Media		Mensual	Máxima en 24hrs	día
		Máxima	Mínima	Máxima	Mínima																
ENERO	109.2	22.5	16	3.9	29	19.1	9.3	13.3	97	19	49	13	77	9.0	11.5	62.2	17.3	26	17		
FEBRERO	167.1	23.8	7	2.6	6	20.2	7.0	13.1	96	14	34	13	70	7.1	10.1	19.1	7.1	13	9		
MARZO	80.8			5.2	11	18.7	8.5	12.9	99	4	40	21	76	8.4	11.0	84.9	17.1	27	20		
ABRIL	97.2	22.5	4	5.7	24	18.7	8.7	13.0	98	7	47	4	79	9.2	11.7	87.4	12.5	24	23		
MAYO	148.2	22.3	22	5.1	28	19.0	8.5	13.0	97	4	39	27	78	8.8	11.4	92.3	14.9	5	21		
JUNIO	80.2	18.9	2			16.0	8.3	11.5					83	8.4	11.1	158.8	30.3	6	27		
JULIO	171.1					18.0	6.0	11.5	98	15	45	22	77	7.3	10.3	24.4	9.1	26	18		
AGOSTO	122.3	19.7	7	3.7	7	17.0	6.8	11.3	98	18	49	25	79	7.5	10.4	74.9	8.5	27	23		
SEPTIEMBRE	73.6	19.0	23	3.3	18	16.0	6.8	11.0	98	16	54	17	80	7.6	10.5	36.9	7.9	25	21		
OCTUBRE	147.5	21.6	15	4.5	2	19.6	7.1	13.0	98	23	41	5	76	8.4	11.1	40.1	11.8	18	12		
NOVIEMBRE	129.7					19.8	7.7	13.2					77	8.8	11.4	32.9	6.1	2	24		
DICIEMBRE	107.8			1.7	5	19.7	7.9	13.0	98	13	28	5	77	8.7	11.3	40.0	8.9	12	19		
VALOR ANUAL	1434.7					18.5	7.7	12.5					77	8.3	11.0	753.9	30.3				

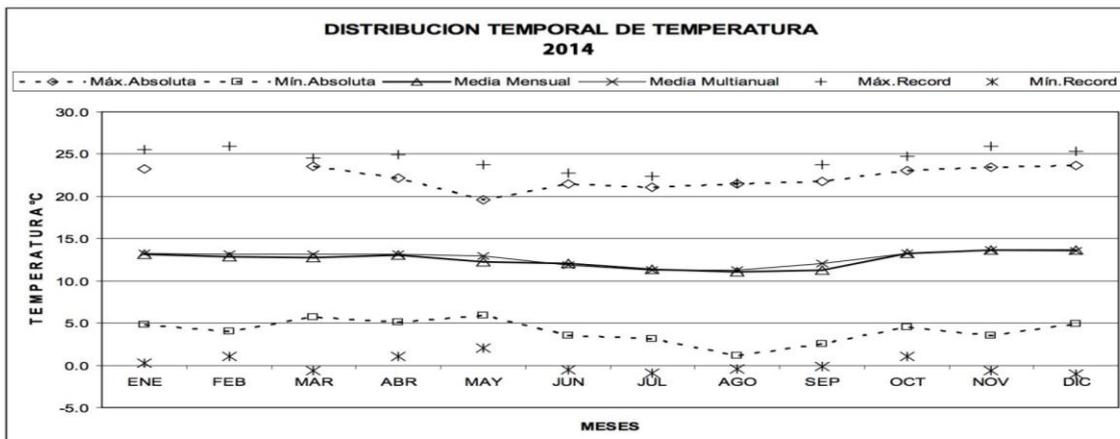
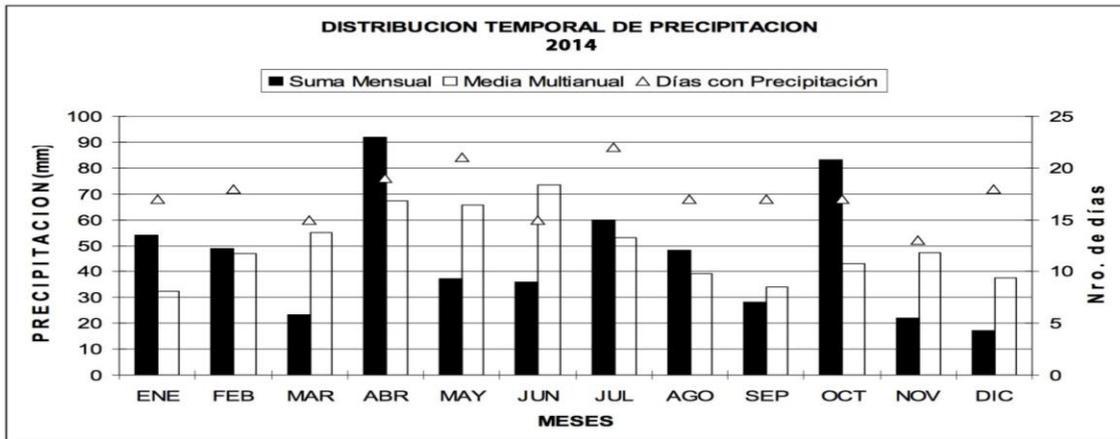
MES	EVAPORACION (mm)		NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO														Vel.Mayor Observada (m/s) DIR	VELOCIDAD MEDIA (Km/h)							
	Suma Mensual	Máxima en 24hrs día		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA	Nro OBS	%	%	%	%			%	%	%	%	%		
	(m/s)	(m/s)		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)												(m/s)	(m/s)
ENERO	88.9	4.7	14	7	2.3	3	2.3	3	5.4	24	2.2	32	3.1	18	4.0	2	0.0	0	0.0	0	17	93	10.0	E	2.0	
FEBRERO	112.0	6.2	14	7	5.5	2	3.0	5	4.9	30	2.7	25	3.2	24	3.0	4	0.0	0	2.0	1	10	84	10.0	E	2.8	
MARZO	87.3	5.2	13	8	2.0	2	2.7	3	4.6	25	2.4	30	2.8	23	0.0	0	8.0	1	0.0	0	16	93	14.0	E	1.9	
ABRIL	82.3	4.3	22	8	3.3	3	4.0	6	2.7	29	2.3	24	3.1	17	0.0	0	0.0	0	0.0	0	21	90	7.0	SE	1.8	
MAYO	100.7	5.1	27	7	0.0	0	4.0	7	3.6	27	3.3	19	2.8	25	3.0	2	0.0	0	0.0	0	20	93	9.0	E	2.1	
JUNIO	59.6	4.2	12	8	3.0	2	2.8	6	4.6	37	2.4	22	1.3	4	0.0	0	0.0	0	0.0	0	29	90	14.0	E	2.0	
JULIO	98.0	4.5	13	6	2.0	1	0.0	0	5.8	26	3.2	36	2.4	5	6.0	1	0.0	0	0.0	0	31	93	14.0	SE	2.3	
AGOSTO	85.7	4.9	1	7	0.0	0	4.0	3	4.5	39	3.6	33	4.4	8	0.0	0	0.0	0	0.0	0	17	93	10.0	E	2.1	
SEPTIEMBRE	68.2	4.3	17	8	4.0	1	0.0	0	4.4	40	3.5	24	4.1	16	1.0	1	0.0	0	0.0	0	18	90	10.0	E	1.8	
OCTUBRE	104.7	5.1	5	7	3.0	2	3.8	5	3.9	30	2.4	24	3.1	18	0.0	0	0.0	0	4.0	1	19	93	12.0	E	1.6	
NOVIEMBRE	96.1			7																						2.1
DICIEMBRE	94.0			7	1.8	4	3.4	10	2.9	38	2.2	14	4.2	10	0.0	0	6.0	1	0.0	0	24	93	8.0	E	1.7	
VALOR ANUAL	1077.5			7																						2.0



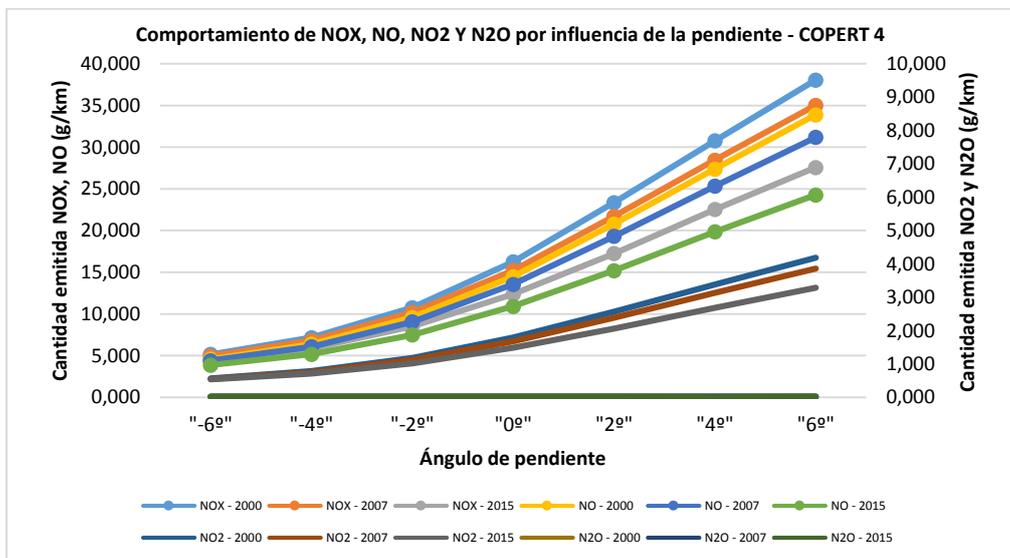
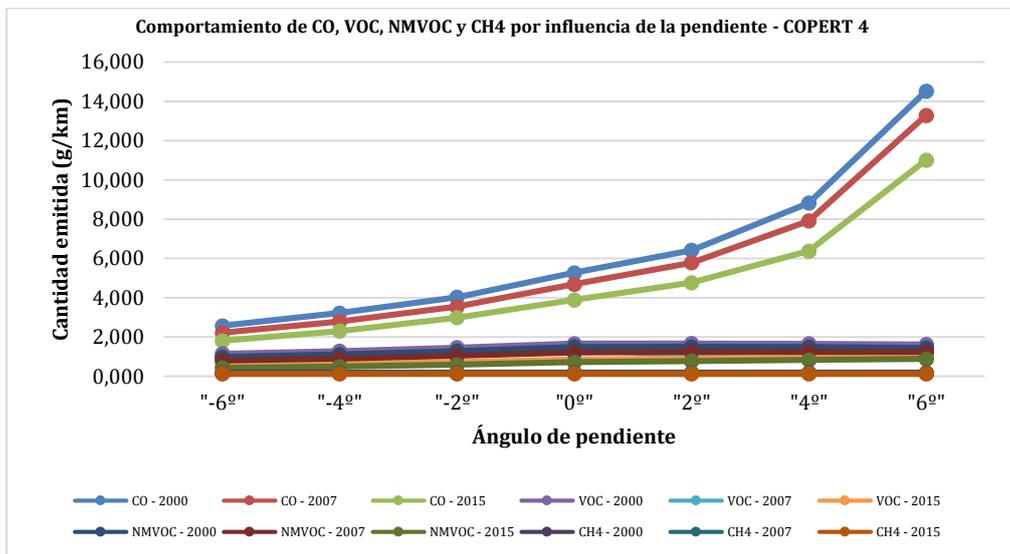
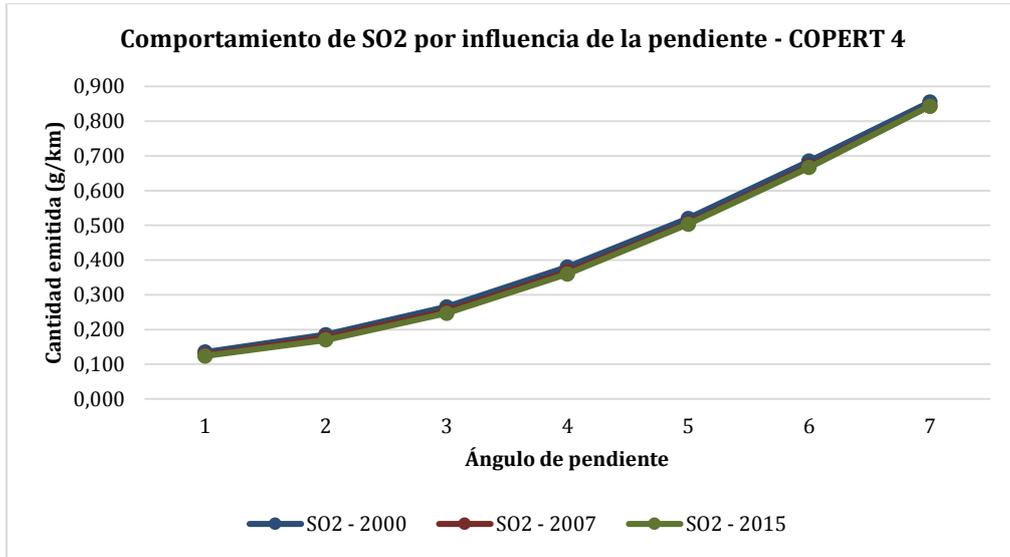
M0258 QUEROCHACA(UTA) INAMHI

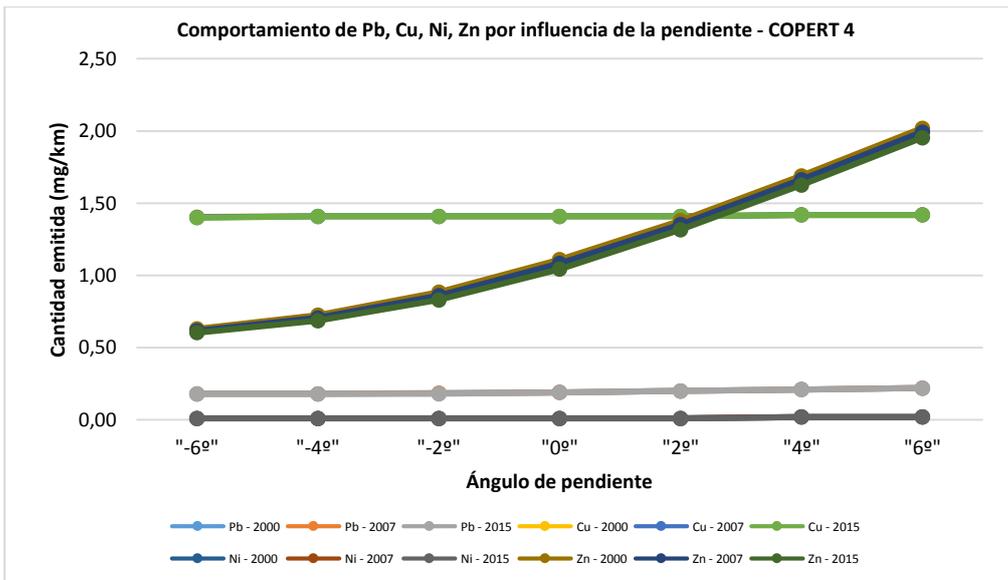
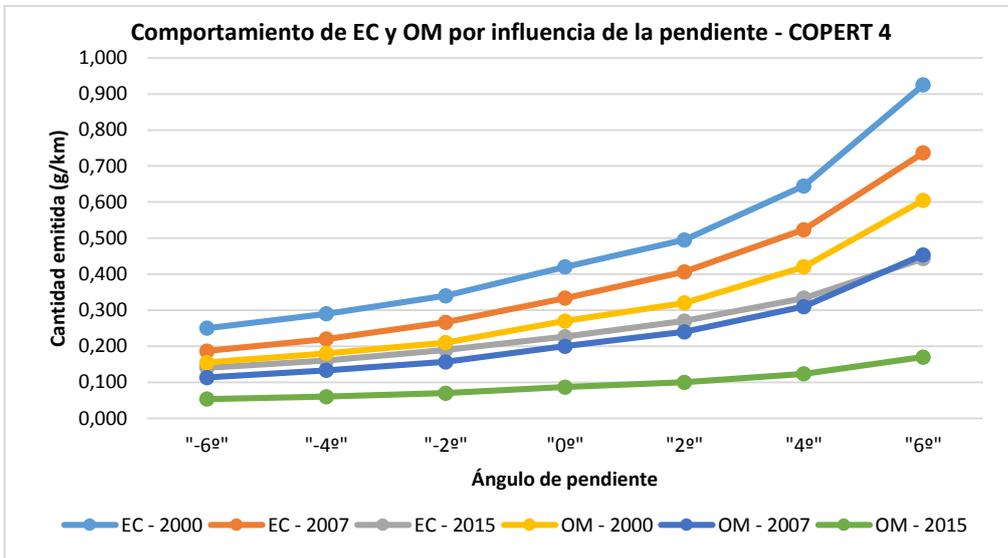
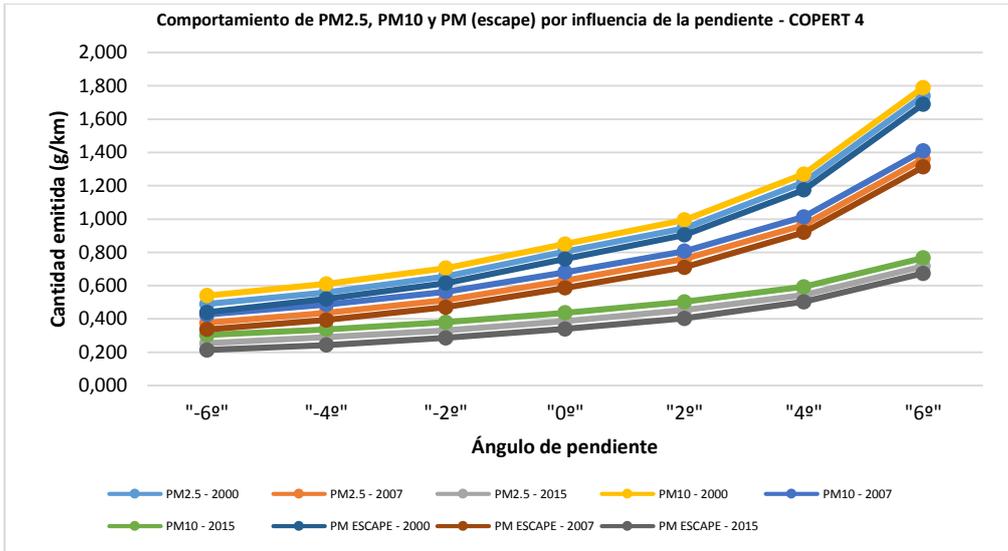
MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)							HUMEDAD RELATIVA (%)			PUNTO DE ROCÍO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)			Número de días con precipitación		
		ABSOLUTAS		M E D I A S					Máxima día	Mínima día	Media			Mensual	Mensual	Máxima en 24hrs		día	
		Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Mensual													
ENERO	132.5	23.3	24	4.8	24	19.7	8.4	13.1	99	29	43	23	76	8.6	11.2	53.9	19.3	5	17
FEBRERO	96.3			4.0	10	19.1	8.1	12.8	98	2	39	13	75	8.0	10.8	49.0	10.5	28	18
MARZO	108.5	23.6	18	5.7	14	18.8	8.4	12.7			77			8.4	11.1	23.3	7.5	24	15
ABRIL	112.8	22.2	7	5.1	28	19.3	8.1	13.0	98	2	42	7	78	8.8	11.4	91.9	18.5	1	19
MAYO	91.4	19.6	20	5.9	11	17.4	8.3	12.3	99	10	51	23	78	8.4	11.0	37.3	10.5	16	21
JUNIO	159.7	21.5	19	3.5	4	18.0	7.3	12.1	98	1	45	18	75	7.4	10.3	35.9	9.7	22	15
JULIO	135.3	21.1	11	3.1	21	16.8	7.1	11.4	98	4	37	12	76	7.0	10.1	59.8	13.3	22	22
AGOSTO	147.3	21.5	3	1.1	7	17.0	6.1	11.1	99	28	38	7	75	6.5	9.7	48.2	13.4	28	17
SEPTIEMBRE	130.1	21.8	20	2.5	17	17.3	6.4	11.3	99	24	39	28	75	6.7	9.8	28.1	11.8	9	17
OCTUBRE	136.1	23.1	16	4.5	1	19.5	7.8	13.2	100	14	36	11	74	8.1	10.8	83.1	24.2	16	17
NOVIEMBRE	145.9	23.5	28	3.5	18	20.4	7.8	13.6	99	6	38	28	74	8.4	11.0	21.9	8.9	4	13
DICIEMBRE	137.4	23.7	15	4.9	17	20.5	7.9	13.6	99	19	35	15	71	7.8	10.6	17.1	4.8	21	18
VALOR ANUAL	1533.3			1.1		18.7	7.6	12.5						7.8	10.7	549.5	24.2		

MES	EVAPORACION (mm)		NUBOSIDAD		VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO												Vel. Mayor Observada (m/s)	VELOCIDAD MEDIA (Kmh)								
	Suma	Máxima en	MEDIA		N		NE		E		SE		S		SW				W		NW		CALMA	Nro OBS		
	Mensual	24hrs	día	(Octas)	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%			(m/s)	%	(m/s)	%				
ENERO	97.7	5.9	23	7	2.6	8	2.0	4	3.0	27	2.3	10	1.6	8	1.0	3	4.0	1	2.0	2	38	93	7.0	N	1.7	
FEBRERO	92.1	5.9	17	7	2.3	9	3.6	6	3.3	26	3.7	3	1.9	17	3.5	5	2.0	3	0.0	0	30	87	8.0	E	2.1	
MARZO	96.9	6.2	4	7																						2.3
ABRIL	77.3	4.1	10	7	2.0	4	1.3	3	2.8	20	1.8	7	1.8	23	1.0	1	1.6	6	0.0	0	36	90	12.0	E	2.2	
MAYO	73.4	4.3	4	7	4.0	1	6.0	2	5.1	32	2.1	16	2.3	19	2.5	4	3.5	2	0.0	0	23	93	14.0	E	2.3	
JUNIO	88.7	4.7	18	7	2.0	1	0.0	0	5.5	41	3.4	16	2.7	26	1.5	2	1.0	1	0.0	0	13	90	12.0	E	2.7	
JULIO	77.3	4.1	13	7	0.0	0	1.5	2	3.4	34	2.0	16	1.8	16	1.5	2	2.0	2	0.0	0	27	93	6.0	E	2.8	
AGOSTO	85.2	5.2	21	7	8.0	1	0.0	0	3.5	26	2.4	15	1.6	13	1.3	3	2.5	2	0.0	0	40	93	8.0	E	2.7	
SEPTIEMBRE	85.0	4.9	20	6	0.0	0	3.0	1	2.6	38	1.7	10	1.6	19	1.7	3	1.0	2	0.0	0	27	90	7.0	E	2.9	
OCTUBRE	99.9	5.0	14	7	2.0	1	1.5	2	2.1	23	1.8	16	1.6	16	1.3	4	1.0	2	0.0	0	36	93	6.0	SE	2.3	
NOVIEMBRE	94.9	4.8	11	7	2.7	3	2.0	2	1.9	22	1.7	7	1.7	28	2.0	6	2.0	3	1.3	3	26	90	4.0	E	2.3	
DICIEMBRE	95.7	5.0	1	6	1.9	8	2.0	7	2.0	18	1.7	20	2.0	17	1.0	4	1.2	5	1.0	1	19	93	4.0	E	2.6	
VALOR ANUAL	1064.1	6.2		7																						2.0

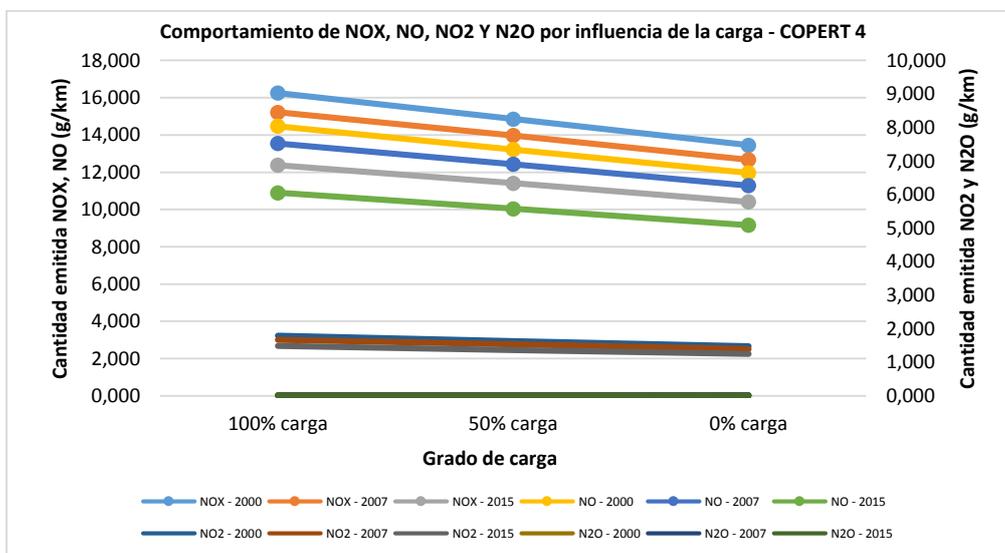
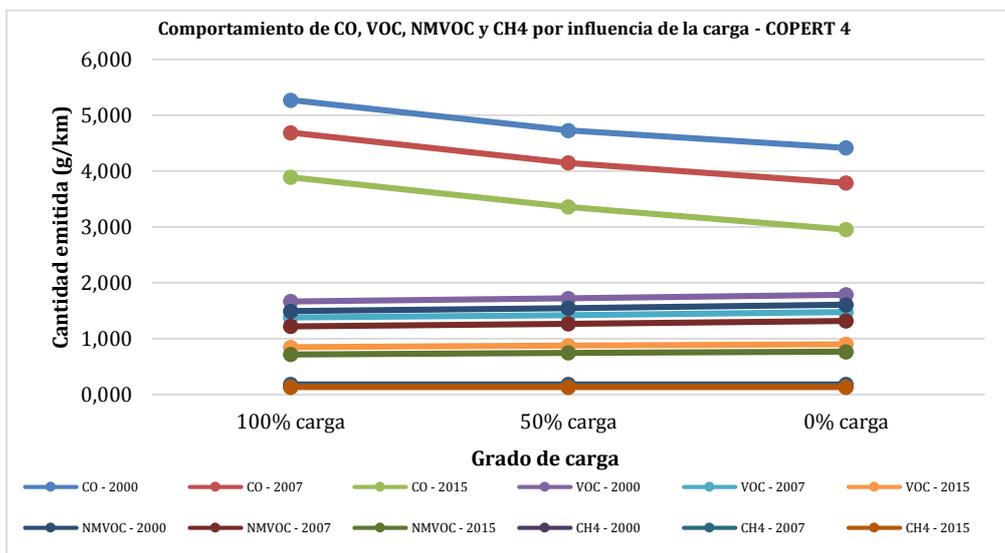
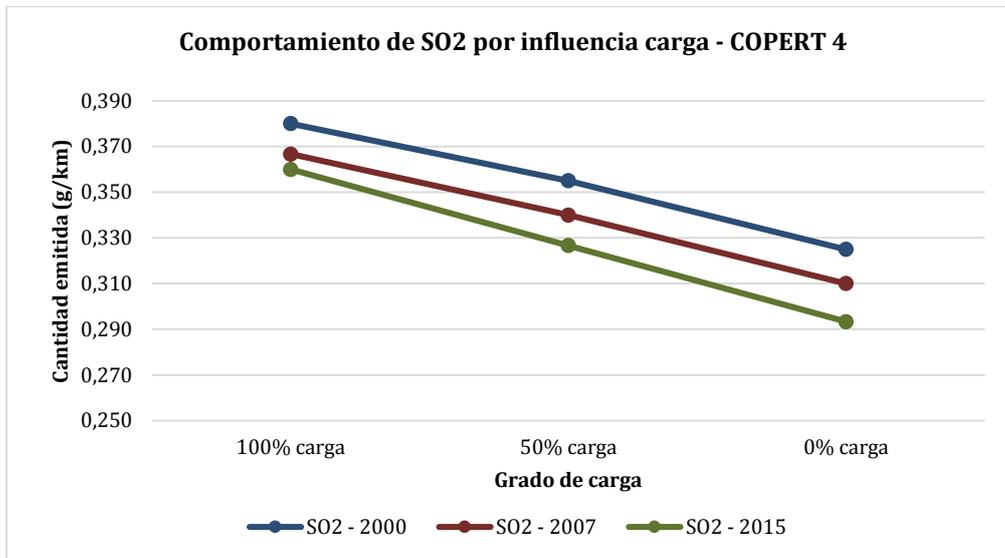


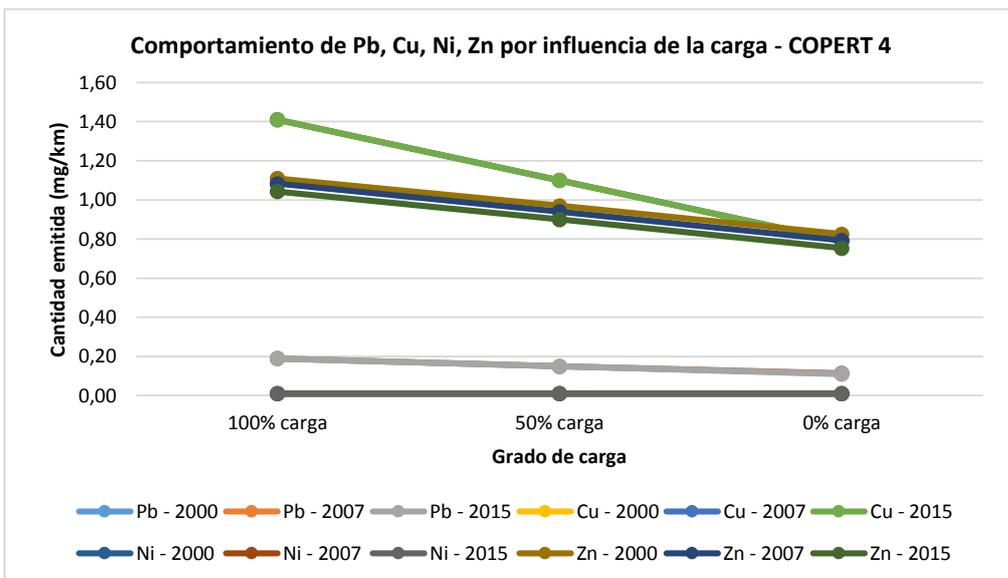
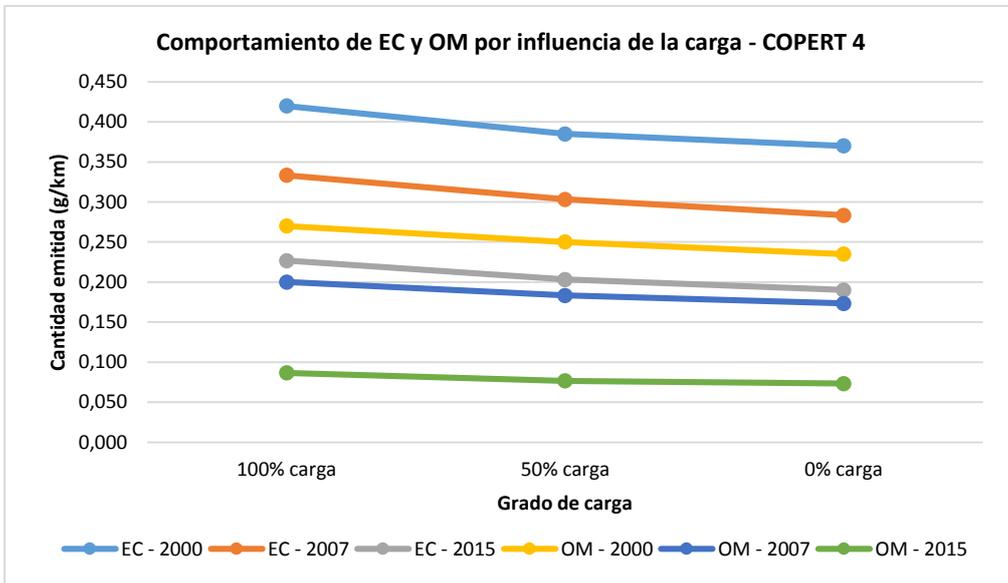
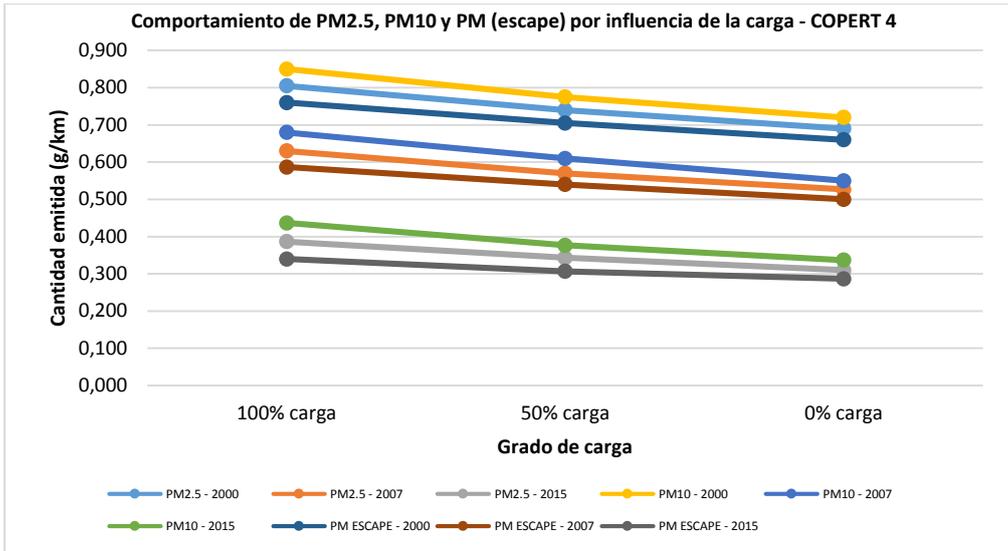
ANEXO 2. Gráficos de estimación de emisiones – influencia por variación de valor de pendiente.





ANEXO 3. Gráficos de estimación de emisiones – influencia por variación de la carga soportada.





ANEXO 4. Gráficos de estimación de emisiones – influencia por variación de la velocidad media de recorrido.

