



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA
VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL
NIVEL DEL MAR**

Jhaniel Osorio Silva

Luisa Fernanda Rodríguez Gómez

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Eficiencia Energética

Asesor

John Ramiro Agudelo Santamaría, Doctor (PhD) en Ciencias Térmicas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Eficiencia Energética

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Osorio Silva y Rodríguez Gómez [1]
Referencia	[1] J. Osorio Silva y L. F. Rodríguez Gómez, “Diferencias entre factores de emisión medidos y modelados para vehículos pesados en una megaciudad a gran altitud sobre el nivel del mar”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Eficiencia Energética, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Especialización en Eficiencia Energética, Cohorte I.

Grupo de Investigación Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).



Centro de Documentación (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Franciscos Vargas Bonilla

Jefe departamento: Pedro León Simanca

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y a la Universidad de Antioquia, por hacer posible este trabajo en el marco del proyecto *FECOC+ Fase 2.2: “Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados a las altitudes de Bogotá y Barranquilla”*. Convenio 001-2022. Un agradecimiento especial a la empresa Coordinadora Mercantil por facilitar la logística de la campaña experimental, por el préstamo de varios camiones para las pruebas, y por facilitar el conductor profesional para el seguimiento de los ciclos de conducción. A las empresas INTECCON y 3DATX, por facilitarnos el equipo portátil de medición de emisiones contaminantes. A todos gracias por hacer posible la realización de este trabajo.

Al profesor John Ramiro Agudelo por su constante apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto y por la motivación que nos brindó para trabajar en este campo de la eficiencia energética.

Al profesor José Ignacio Huertas, del Tecnológico de Monterrey (México), por brindarnos la posibilidad de interactuar con su prestigiosa universidad, y especialmente con sus estudiantes posgraduados Oscar Serrano y Gabriel Evangelista, quienes nos compartieron amable y abiertamente sus consejos y experiencias con los modelos IVE y MOVES.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE FIGURAS	6
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
II. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	12
III. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	13
3.1 Combustibles fósiles.....	13
3.2 Factores de emisión (FE).....	14
3.3 Modelos de cálculo de factores de emisión.	15
3.3.1 Modelo IVE.....	16
3.3.2 Modelo MOVES	19
3.3.3 Modelo COPERT	21
3.4 Clasificación del transporte de carga en Colombia y selección de vehículos de interés .	23
IV. METODOLOGÍA.....	26
4.1 Estimación de Factores de Emisión.....	26
4.1.1 Modelo IVE.....	26
4.1.2 Modelo MOVES	30
4.1.3 Modelo COPERT	34
4.2 Determinación de Inventarios de Emisión.....	36

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

V. RESULTADOS	37
5.1 Camiones pequeños de dos ejes (< 5 ton) - C2P	37
5.2 Autobuses – AB.....	39
5.3 Camiones grandes de dos ejes (\geq 5 ton) - C2G	42
5.4 Tractocamiones – TC.....	44
5.5 Inventarios de Emisiones.....	47
VI. CONCLUSIONES	50
VIII. REFERENCIAS	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Participación por clase de vehículo frente al total RUNT 2020 [29]</i>	25
Tabla 2. <i>Rangos de selección del modelo IVE para la determinación del divisor de velocidad utilizado para el cálculo del estrés del motor [21]</i>	29
Tabla 3. <i>Rango de determinación de los bins del ciclo de conducción dentro del modelo IVE [21].</i>	29
Tabla 4. <i>Índice de peso bruto del vehículo (GVWR) establecido por el modelo MOVES para la determinación de la categoría de la flota a evaluar [15]</i>	31
Tabla 5. <i>Actividad vehicular reportada por la SDA de Bogotá para los vehículos de interés [32].</i>	36
Tabla 6. <i>Comparación de resultados modelados de vehículos C2P respecto a datos medidos.</i>	38
Tabla 7. <i>Comparación de resultados estimados de vehículos AB de 2771 cc respecto a datos medidos.</i>	41
Tabla 8. <i>Comparación de resultados estimados de vehículos AB de 5123-5193 cc respecto a datos medidos.</i>	41
Tabla 9. <i>Comparación de resultados estimados de vehículos C2G respecto a datos medidos.</i> ...	43
Tabla 10. <i>Comparación de resultados estimados de vehículos TC respecto a datos medidos.</i>	45
Tabla 11. <i>Inventario de Emisiones comparativo para los vehículos evaluados.</i>	48

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. <i>Interfaz de usuario del software del modelo IVE.</i>	16
Fig. 2. <i>Diagrama de cuerpo libre para un vehículo de carga, en donde se presentan las cuatro fuerzas implicadas en la obtención del VSP [23].</i>	18
Fig. 3. <i>Interfaz de usuario del software del modelo MOVES.</i>	19
Fig. 4. <i>Interfaz de usuario del software del modelo COPERT.</i>	21
Fig. 5. <i>Clasificación y pesos brutos vehiculares para transporte de carga en Colombia.</i>	24
Fig. 6. <i>Diagrama de Pareto según clase de vehículos [29]</i>	25
Fig. 7. <i>Datos originales medidos para uno de los vehículos en evaluación.</i>	27

Fig. 8. <i>Cálculos complementarios de aceleración, distancia acumulada y la pendiente de la carretera para uno de los vehículos en evaluación.</i>	27
Fig. 9. <i>Cálculos de VSP, estrés de motor y distribución de los bins para ingresar el análisis en el modelo IVE.</i>	29
Fig. 10. <i>Proceso de ingreso de datos en la interfaz del modelo IVE para uno de los vehículos en evaluación.</i>	30
Fig. 11. <i>Proceso de selección de la flota dentro del modelo MOVES, con uno de los vehículos medidos.</i>	31
Fig. 12. <i>Proceso de selección de las emisiones de interés dentro del modelo MOVES.</i>	32
Fig. 13. <i>Ventana del MOVES Project Data Manager con toda la información ya ingresada para poder realizar la simulación de uno de los vehículos en evaluación.</i>	33
Fig. 14. <i>Ejemplos de datos cargados en el MOVES Project Data Manager. a) Información del combustible, b) Distribución de edades, c) Información sobre el ciclo de conducción (velocidad, pendiente y tipo de carretera) y d) Condiciones ambientales de temperatura y humedad.</i>	34
Fig. 15. <i>Ventanas de interacción del modelo COPERT. a) Información ambiental, b) Actividad y stock vehicular, c) Información sobre actividad de circulación, d) Características del viaje y e) Configuración del stock vehicular.</i>	35
Fig. 16. <i>Factores de emisión para vehículos C2P. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.</i>	39
Fig. 17. <i>Factores de emisión de autobuses. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.</i>	42
Fig. 18. <i>Factores de emisión para la categoría C2G. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.</i>	44
Fig. 19. <i>Factores de emisión de Tractocamiones. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.</i>	46
Fig. 20. <i>Inventarios de Emisión tomando como base los F.E. obtenidos.</i>	49

RESUMEN

El uso de combustibles fósiles en el sector transporte representa una fuente importante de emisión de contaminantes que afectan la calidad del aire y contribuyen al calentamiento global. Se estima que el 12% del CO₂ emitido en Colombia podría provenir de este sector y, por otro lado, cada vez son más las enfermedades respiratorias y cardiovasculares relacionadas con las emisiones de material particulado (PM) y otros contaminantes como el CO y NO_x que son generados en los procesos de combustión.

El calentamiento global y la contaminación del aire son dos de las problemáticas que más relevancia han cobrado en el mundo en los últimos años, por lo que desde la OMS y varias autoridades medioambientales han buscado recomendar límites más bajos de estos contaminantes, para reducir los gases de efecto invernadero y la mortalidad prematura causada por la mala calidad del aire. Debido a la dificultad para medir los factores de emisión (FE) de los contaminantes criterio para el parque automotor de las ciudades, se han desarrollado varios modelos como IVE, COPERT y MOVES que permiten simular estos FE para diversos tipos de vehículos.

El objetivo de este trabajo consistió en realizar una comparación entre los FE obtenidos a partir de los modelos IVE, MOVES y COPERT con los medidos en carretera para vehículos de carga y de pasajeros en la ciudad de Bogotá. Se presenta una descripción de las consideraciones involucradas en cada modelo, así como la estimación del porcentaje de diferencia para los FE de CO₂, CO, NO_x y PM_{2.5}.

Se identificó que, independientemente del modelo utilizado, el FE que más se aproxima a las mediciones en carretera es el CO₂, presentando un error máximo de 30%. Para todos los demás contaminantes, la diferencia entre las mediciones y los modelos alcanza valores entre 80% y 90%, y en el caso específico del PM_{2.5} y los NO_x pueden llegar a superar el orden de magnitud, por lo que puede concluirse que los modelos IVE, MOVES y COPERT no son acertados en estas estimaciones para el caso de este segmento de vehículos en la ciudad de Bogotá.

***Palabras clave* — Factores de emisión, contaminantes, transporte de carga, modelo IVE, modelo MOVES, modelo COPERT.**

ABSTRACT

The use of fossil fuels in the transportation sector represents an important source of pollutant emissions that affect air quality and contribute to global warming. It is estimated that around 12% of the CO₂ emitted in Colombia could come from this sector and, on the other hand, there are more respiratory and cardiovascular diseases related to the emissions of particulate matter (PM) and other pollutants such as CO and NO_x which are generated in combustion processes.

Global warming and air pollution are two of the most relevant problems in the world in recent years, which is why the World Health Organization and several environmental authorities have sought to recommend lower limits for these pollutants, to reduce greenhouse gases and premature mortality caused by poor air quality.

Due to the difficulty in measuring the actual emission factors (EF) of the criterion pollutants for the vehicle fleet of the city, several models have been developed such as IVE, COPERT and MOVES that allow these EF to be simulated for various types of vehicles.

The objective of this work was to carry out a comparison between the EF obtained from the IVE, COPERT and MOVES models against those measured under real conditions for the cargo and passenger vehicles in Bogotá city. A description of the considerations involved in each model and the estimation of the percentage of difference on EF of CO₂, CO, NO_x and PM_{2.5} obtained for each vehicle is presented and discussed.

It was identified that independently of the model used, the EF of CO₂ was the closest to the measured one, with a maximum difference of 30%. For all the other pollutants (CO, NO_x and PM_{2.5}), the differences for all the models reached values between 80% and 90%, and specifically for PM_{2.5} and NO_x the differences could reach above one order of magnitude. From these results it can be concluded that the IVE, COPERT and MOVES models are not as accurate in the estimation of EF for these vehicle categories in the Bogotá basin.

Keywords — Emission factors, pollutants, heavy duty transport, IVE model, MOVES model, COPERT model.

I. INTRODUCCIÓN

El alto impacto que ha tenido la contaminación generada por vehículos impulsados por motores de combustión interna sobre la salud de los individuos, el alto consumo energético del sector transporte (40% para el 2019 - Plan energético nacional [1]), la elevada ineficiencia que también presenta este sector (66% para el 2019 - Balance de Energía Útil [2], [3]) y los compromisos adquiridos por Colombia, como miembro de los países que hicieron parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para disminuir los gases de efecto invernadero (GEI), han impulsado a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y a la Universidad de Antioquia a desarrollar varios proyectos conjuntos que buscan determinar los Factores de Emisión de Combustibles Colombianos (FECOC) usados en vehículos de todas las categorías y a diferentes altitudes sobre el nivel del mar.

Estos factores de emisión (FE), definidos como la masa de un determinado contaminante emitido por un vehículo a lo largo de un kilómetro de recorrido, se calculan con la intención de establecer los inventarios de emisión, que suelen ser la herramienta clave para conocer el impacto ambiental del sector y tomar decisiones de política pública a nivel ciudad, región o país. La importancia de los FE, y por ende de los inventarios de emisión radica en que con ellos se pueden establecer criterios objetivos que justifican por ejemplo la necesidad de renovación tecnológica de una flota de vehículos, la implementación de regulaciones orientadas a establecer restricciones de funcionamiento por motivos ambientales, planificar escenarios de reducción de consumo de combustible y emisiones, orientar programas de financiación estatal en materia ambiental, entre otros. Mediante estudios previos, la UPME se señaló la necesidad de cuantificar la eficiencia de conversión de los combustibles colombianos a energía útil, según la actividad donde son usados, principalmente la industria y el transporte. Para esto la UPME aunó fuerzas con la Universidad de Antioquia para hacer una caracterización del parque automotor terrestre de carretera colombiano, su distribución, sus ciclos de conducción (FECOC+ Fase 1), y así determinar los factores de emisión por actividad para Colombia, iniciando con los vehículos de transporte de carga y pasajeros, medidos en sendas campañas experimentales en tres ciudades estratégicas ubicadas a

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

diferentes altitudes sobre el nivel del mar: Bucaramanga (FECOC+ Fase 2.1), Bogotá y Barranquilla (FECOC+ Fase 2.2).

La diversa geografía nacional y su variedad en microclimas y pisos térmicos hace que sea necesario la evaluación a diferentes alturas para tener un acercamiento más preciso del comportamiento de la emisión de los vehículos, ya que la altitud tiene un efecto importante sobre los sistemas térmicos. Debido a esto, dentro del proyecto FECOC+ se determinó que la medición se debería realizar a tres alturas diferentes sobre el nivel del mar, evaluando así el área metropolitana de Barranquilla a nivel del mar, la de Bucaramanga a 1000 msnm y la de Bogotá a 2600 msnm. Se determinaron los factores de emisión de GEI (CO₂ y CH₄), gases regulados (CO, NO₂, NO_x, THC y NMHC) y material particulado (en masa - PM y en número de partículas PN).

En este trabajo de monografía se propuso realizar un análisis comparativo de los datos de los FE obtenidos experimentalmente específicamente en la ciudad de Bogotá, con los obtenidos mediante el uso de herramientas computacionales para la estimación emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero más comúnmente utilizados en el ámbito internacional, a saber, International Vehicle Emissions model (IVE), MOVES propuesto por la Agencia de protección del medioambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA), y COPERT propuesto por la Agencia europea de protección del medioambiente (EEA).

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Desarrollar un comparativo de Factores de Emisión entre aquellos obtenidos a partir de mediciones en carretera con los estimados a partir de los modelos internacionales IVE, MOVES y COPERT para vehículos de carga y de pasajeros en la ciudad de Bogotá.

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1 Cuantificar las diferencias entre los factores de emisión más relevantes obtenidos mediante modelos ampliamente usados en el ámbito internacional y los medidos experimentalmente.
- 2.2.2 Establecer diferentes escenarios de inventarios de emisión a partir de los factores de emisión medidos y los modelados.

III. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 Combustibles fósiles

El aumento de la población, el elevado consumo de bienes y materias primas, y el crecimiento sostenido de la industrialización ocasionado por el incremento demográfico, han impulsado el aumento de la demanda energética global. Actualmente en Colombia el 79% de la energía consumida proviene de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo o el carbón [4] que además de generar gases de efecto invernadero (CO_2), producen emisiones de diferentes contaminantes como material particulado (PM), dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO), los cuales afectan la calidad del aire, aumentando así el riesgo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón, lo que disminuye la esperanza de vida de cada colombiano en aproximadamente 2.2 años [5], [6].

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), a estas enfermedades cardiovasculares y respiratorias causadas por la contaminación ambiental y la mala calidad del aire, se les atribuye aproximadamente 7 millones de muertes prematuras en el año a nivel mundial [7], razón por la cual representa una de las principales amenazas para la salud humana. El material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) tiene la capacidad de ingresar a los pulmones y en el caso de el más pequeño ($\text{PM}_{2.5}$), al torrente sanguíneo, generando afectaciones en el sistema cardiovascular, respiratorio e incluso en otros órganos [8], [9]. Estas partículas han sido clasificadas como carcinógenas por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) de la OMS y son generadas principalmente en la combustión de combustibles en diferentes sectores, entre ellos el transporte.

Al convertirse en uno de los principales problemas para la salud, la OMS busca definir directrices para disminuir los niveles de contaminantes en el aire que, aunque en la actualidad son medidos en más de 6000 ciudades de 117 países, los controles no han sido suficientes para mejorar la calidad del aire que se respira, ya que el 99% de la población mundial respira un aire que supera los límites de calidad recomendados por la OMS [10].

El sector transporte en Colombia es responsable de emitir a la atmósfera cerca del 12% de los gases de efecto invernadero [11], mientras que algunos países como Estados Unidos, su

contribución es cercana al 27% [12], presumiblemente puede tener incidencia directa en el aumento de la temperatura media del planeta y acelerar así el cambio climático [9], [13].

Por la importancia que tienen, se vuelve indispensable cuantificar de la manera más precisa y confiable posible los factores de emisión que producen las fuentes móviles en el país. Es por esto por lo que la UPME se ha aliado con la Universidad de Antioquia para determinar los FE de vehículos pesados de transporte de pasajeros y de carga en el país. La tecnología de equipos portátiles de medición de emisiones contaminantes para vehículos ha sufrido un gran desarrollo en los últimos años, lo que permitió realizar una campaña de medición de FE en estas categorías vehiculares en el país. Con esta monografía se pretende realizar una comparación de estos FE medidos con los que se obtienen a través de modelos ampliamente conocidos y usados en el ámbito internacional: IVE, MOVES y COPERT.

3.2 Factores de emisión (FE)

La relación entre la masa de un contaminante determinado y la unidad característica de la fuente que lo genera, se denomina factor de emisión (FE). En el caso de los vehículos, el FE es la masa de emisión contaminante dividido entre cada kilómetro recorrido, en el caso de una industria, el FE es la masa de emisión contaminante dividido entre cada unidad de energía consumida (MJ). Estos factores de emisión se usan como elemento central para construir los inventarios de emisión, usualmente determinados para un área geográfica específica (ciudad, región o país), en función de la fuente que genera la contaminación (fija o móvil), del tipo de contaminante emitido (FE) y para un tiempo determinado (normalmente por cada año). Los inventarios de emisión son utilizados para análisis comparativos y buscan determinar los impactos asociados a la fuente generadora, por lo que son de vital importancia para la determinación de política pública y como herramienta de planificación de la respectiva región. Su uso se extiende también a la evaluación y el diseño de acciones regulatorias sobre la calidad del aire y el cambio climático, además de que permiten evaluar las reducciones de emisiones asociadas a la renovación tecnológica en el parque automotor [14], [15].

Los factores de emisión se ven afectados por el ciclo de conducción y por las diferentes condiciones ambientales de operación. La literatura muestra que también la altitud tiene un efecto importante en los factores de emisión, ya que con el aumento de esta, se espera una reducción en

la concentración de oxígeno que entra a la combustión del motor, una reducción de la presión con la que entra el aire del ambiente y también una reducción en las temperaturas del ambiente [16], [17]. Esto hace que, para regiones con alta diversidad geográfica de altitudes, sea necesario la realización de evaluaciones a diferentes altitudes, para así, obtener los inventarios de emisión más precisos y confiables.

Por otro lado, es importante caracterizar previamente de la manera más acertada posible la flota vehicular del país en sus diferentes categorías. Un ejemplo son los vehículos pesados, ya que pueden llegar a emitir el 24, 37 y 21 veces más material particulado, carbón negro y sulfatos por cada kilómetro recorrido, respectivamente que vehículos livianos [18]. Un ejemplo de una evaluación de factores de emisión medidos de forma categorizada para autobuses en una megaciudad a gran altitud es la reportada por Giraldo et al. [19], quienes evaluaron 15 buses en la Ciudad de México (altitud 2240 m), utilizando un sistema de medición de emisiones portátil (PEMS) obteniendo emisiones de CO₂, CO y NO_x de 965.8, 41.4, and 5.3 g/km respectivamente.

3.3 Modelos de cálculo de factores de emisión.

Realizar estimaciones de las emisiones generadas por el parque automotor no es trivial por la cantidad de variables que afectan las concentraciones de los gases de combustión y de material particulado liberados al ambiente. El tipo de tecnología del motor, la calidad de combustible utilizado, la topografía, las condiciones climatológicas, la altura de medición, la temperatura, el ciclo de conducción, etc. son algunas de estas variables que dan cuenta de la complejidad de estos modelos de cálculo. La manera adecuada para obtener estos FE consiste en realizar mediciones localmente de los gases emitidos utilizando un sistema de medición de emisiones portátil (PEMS) conectado *in-situ* a lo largo de un ciclo de conducción. Tener acceso a este tipo de evaluaciones, aunque deseable, no siempre es posible, y requiere de una inversión considerable por parte de los gobiernos locales, por lo que en muchas ocasiones se simplifica el proceso mediante la estimación de los factores de emisión utilizando diversos modelos computacionales de cálculo. Dentro de los modelos más utilizados se destacan: el *International Vehicle Emission Model* (IVE), desarrollado por el Centro internacional de investigación de sistemas sostenibles (ISSRC), el modelo *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), desarrollado por la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y el modelo *Computer Program to Calculate Emissions from Road*

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Transport (COPERT), desarrollado por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA). Cada modelo presenta ciertos beneficios y desventajas respecto a los otros, pero en general, todos se encuentran condicionados por supuestos y parámetros de corrección que no siempre logran establecer el cumplimiento de las realidades de las diferentes regiones a nivel mundial [14]. Debido a esto se pueden obtener diferencias significativas en el resultado final de la estimación de los factores de emisión, y por ende de los inventarios de emisión, por lo que lo es recomendable realizar una comparación entre datos reales medidos a bordo de los vehículos con los simulados en los modelos [20].

3.3.1 Modelo IVE

El *International Vehicle Emission Model* (IVE) es un modelo desarrollado en lenguaje *Java* por la Universidad de California y la ISSRC para la predicción de contaminantes de calentamiento global y de criterio tóxico, en cualquier región del mundo y específicamente para países en vía de desarrollo. El IVE cuenta con varias versiones desde el año 2000, hasta su última versión (2.02) de marzo del 2010 [21]. La interfaz del software del modelo se presenta en la Fig. 1.

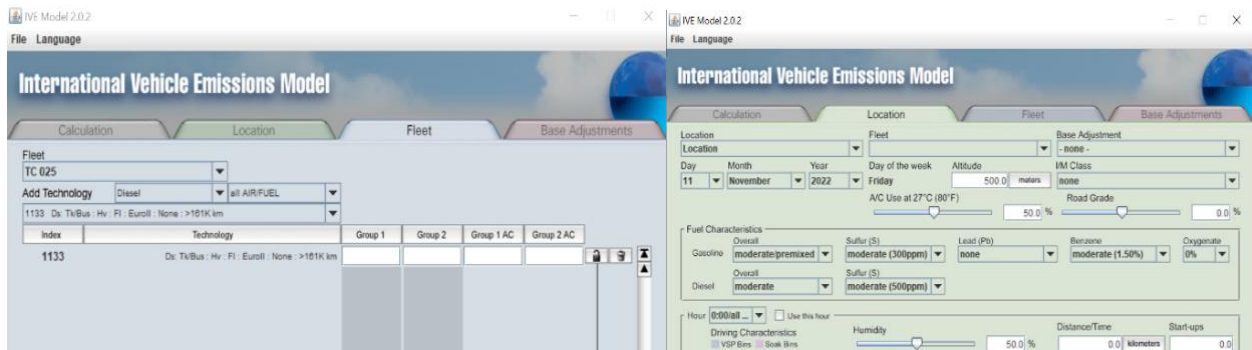


Fig. 1. Interfaz de usuario del software del modelo IVE.

El software tiene las siguientes consideraciones para la estimación de FE:

- **Información de la flota vehicular:** Clase regulatoria (ej. Tipo de norma Euro), combustible que utiliza, tecnología del motor, kilometraje, si tiene o no aire acondicionado y cantidad de vehículos a modelar.
- **Información de la actividad vehicular de la flota:** Se determina el porcentaje o frecuencia de actividad a partir del ciclo de conducción expresado en la potencia específica vehicular (VSP), el cual se distribuye en 60 bins que involucran también el estrés del motor.

También se puede establecer el tiempo que estuvo detenido el vehículo antes de ser operado.

- **Información de las condiciones geográficas y ambientales:** Ciudad, fecha, pendiente promedio, altitud sobre el nivel del mar, temperatura y humedad relativa del aire.
- **Información sobre el tipo de combustible utilizado:** Tipo de combustible (gasolina, diésel, etc.), con su contenido de azufre, de plomo, de benceno y de oxígeno.

El software realiza su estimación mediante las ecuaciones 1 y 2, con lo que se obtienen las emisiones totales de los contaminantes en toneladas [21]. Para obtener los factores de emisión en unidades de [g/km], se relaciona con la distancia recorrida.

$$Q_{running} = \frac{\sum_t \{f_{[t]} \cdot \sum_d [Q_{[t]} \cdot \bar{U}_{LA4} \cdot f_{[dt]} \cdot k_{[dt]}]\}}{\bar{U}_{DC}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$Q_{start} = \sum_t \{f_{[t]} \cdot Q_{[t]} \cdot \sum_d [f_{[dt]} \cdot k]\} \quad \text{Ecuación (2)}$$

En donde $Q_{[t]}$ es la tasa de emisión ajustada por cada tecnología, $f_{[t]}$ es la fracción de viaje por tecnología especificada, $f_{[dt]}$ es la fracción de tiempo de conducción o fracción de tiempo detenido de cada tecnología, $k_{[dt]}$ es un factor de ajuste de conducción, U_{LA4} es la velocidad promedio para el ciclo de conducción LA4 en [km/h] (un ciclo de conducción estandarizado en Estados Unidos) y U_{DC} es la velocidad promedio del ciclo de conducción aplicado en [km/h].

Es importante resaltar que éste y otros modelos, toman como la consideración principal el ciclo de conducción descrito por la potencia específica vehicular (VSP de sus siglas en inglés). Este parámetro introducido por Jiménez en 1999 [22], es bastante utilizado para la estimación de emisiones, ya que describe la potencia instantánea que el motor requiere para vencer la resistencia por rodadura, la resistencia aerodinámica y aumentar las energías cinética y potencial del vehículo (Fig. 2), de acuerdo a su velocidad y aceleración. En investigaciones previas se ha demostrado que es la mejor forma de describir un ciclo de conducción para la estimación de emisiones. Este se calcula mediante la ecuación 3, en donde se involucran las cuatro fuerzas previamente nombradas

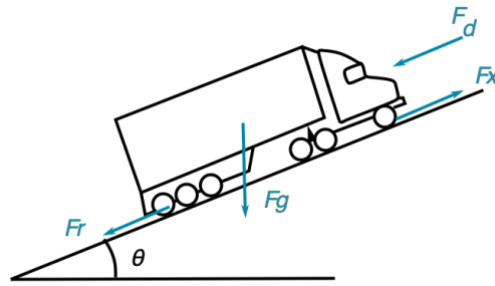


Fig. 2. Diagrama de cuerpo libre para un vehículo de carga, en donde se presentan las cuatro fuerzas implicadas en la obtención del VSP [23].

$$VSP [kW/ton] = \frac{potencia}{masa} = \frac{\frac{d}{dt}(E_c + E_p) + F_{rodadura} \cdot v + F_{aerodinámico} \cdot v}{m}$$

$$VSP_{[kW/ton]} = \frac{\frac{d}{dt}(\frac{d}{dt}m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot v^2 + mgh) + C_R mg \cdot v + \frac{1}{2} \rho_a C_D A (v + v_w)^2 \cdot v}{m}$$

$$VSP_{[kW/ton]} = v \cdot (a \cdot (1 + \varepsilon_i) \cdot g \cdot grado + g \cdot C_R) + \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_D \cdot A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v \quad \text{Ecuación (3)}$$

donde m es la masa del vehículo, v es la velocidad del vehículo, a es la aceleración del vehículo, ε_i es el “factor de masa” o masa equivalente de los elementos rodantes, el cual es equivalente a la masa traslacional de los componentes, h es la altitud del vehículo, $grado$ es la pendiente, g es la aceleración de la gravedad, C_R es el coeficiente de la resistencia a la rodadura, C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámico, A es el área frontal del vehículo, ρ_a es la densidad del aire y finalmente v_w es la velocidad del viento contra el vehículo.

Algunas investigaciones previas han mostrado aplicaciones que ha tenido el modelo IVE. Patiño-Aroca et al. [24], por ejemplo, utilizaron el modelo para realizar una estimación de las emisiones presentadas día a día, y mes a mes en un año de inspección en la ciudad de Guayaquil, determinando qué tipos de vehículos realizarían mayor aporte a diferentes contaminantes, aunque, por otro lado, como Guo et al. [25] reportaron en su artículo, el modelo IVE presentó diferencias con las mediciones a bordo. Ellos mostraron que el IVE tendía a subestimar las emisiones de CO y a sobreestimar entre 1.5 y 3.5 veces las emisiones de NO_x, respecto a mediciones realizadas en campo.

3.3.2 Modelo MOVES

El *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES) es un modelo desarrollado para la estimación de contaminantes de diferentes fuentes móviles que circulen en carretera, así como para maquinaria no de carretera dentro de los Estados Unidos. El MOVES fue desarrollado por la EPA con versiones desde el año 2010. Este *software* permite realizar una simulación a nivel nacional, nivel condado y a nivel proyecto [15]. La estimación realizada por el software se apoya en bases de datos desarrolladas en Java/MySQL por la EPA de cada región del país, pero se tiene la posibilidad de ajustar algunos parámetros con las condiciones locales de cada usuario y realizar estimaciones incluso por fuera de Estados Unidos. La interfaz del software del modelo se presenta en la Fig. 3.

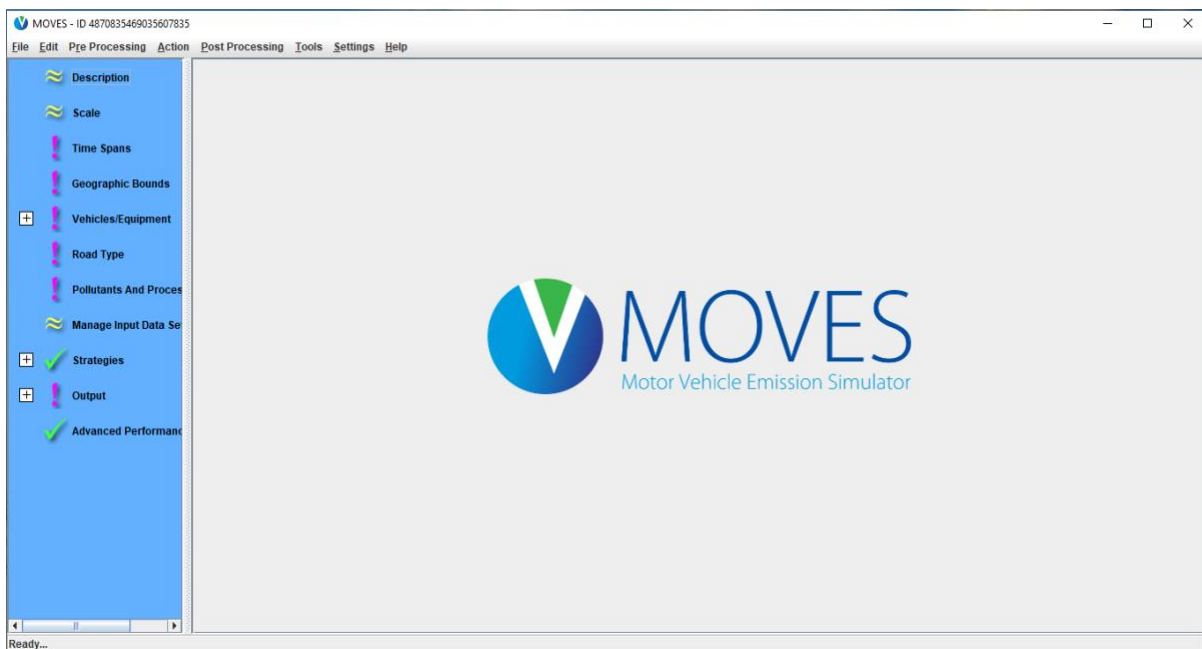


Fig. 3. Interfaz de usuario del software del modelo MOVES.

El software en su modo “proyecto” tiene condiciones similares a las del modelo IVE para la realización de su estimación:

- **Información de la flota vehicular:** Clase regulatoria (normas EPA), año/modelo, edad vehicular, combustible que utiliza y cantidad de vehículos a modelar.

- **Información de la actividad vehicular de la flota:** Definido con las millas recorridas por vehículo al año (VMT) o el ciclo de conducción expresado en la potencia específica vehicular (VSP), en donde se involucra la velocidad, aceleración, tiempo en el que el vehículo está operando, el tiempo en que el vehículo está estacionado y fracción o porcentaje de ralentí.
- **Información de las condiciones geográficas y ambientales:** Tipo de carretera, temperatura, humedad relativa del aire y pendiente promedio.
- **Información sobre el tipo de combustible utilizado:** Tipo de combustible (gasolina, diesel, etc.), con su participación de azufre en ppm, volumen de etanol, volumen de metil ter-butyl éter (MTBE), volumen de etil ter-butyl éter (ETBE), volumen de terc-amil metil éter (TAME), contenido de aromáticos, olefinas y benceno, E20, E30, volumen de biodiesel, índice de cetano, contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y finalmente las temperaturas de destilación T50 y T90.

Los datos que se pueden estimar con el software son las emisiones totales [ton] de los contaminantes analizados y se obtienen mediante la tasa de emisión [g/s], en conjunto con los bins del VSP [kw/ton] esto se obtiene mediante la ecuación (4). Para obtener los factores de emisión, se relaciona con la distancia recorrida para así tener [g/km]:

$$EF_v = \sum_f \left(\sum_y \left(\sum_s EI_{s,y,f} \cdot X_s \right) X_y \right) X_f \quad \text{Ecuación (4)}$$

En donde f , y y s , son los diferentes parámetros de entrada del ciclo de conducción y el tipo de vehículo utilizado, y X_s , X_y y X_f son factores de corrección establecidos por el modelo.

En la literatura, se han presentado algunas evaluaciones utilizando el modelo MOVES, así como la de Zavala et al. [26], el cual concluyó que el software subestima las emisiones de monóxido de carbono (CO), al igual que las de compuestos orgánicos volátiles (VOC) de los vehículos diésel mexicanos, en las que utilizó la técnica de medición en carretera por persecución y un dispositivo de detección remota.

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

3.3.3 Modelo COPERT

El *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport* (COPERT) es un modelo desarrollado por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA) en el marco de las actividades del centro europeo de asuntos del aire y cambio climático. Fue programado en lenguaje *Visual Studio* para la estimación de diferentes contaminantes en frío, caliente, evaporativas y las no asociadas al tubo de escape; de diferentes fuentes móviles y fuera de carretera que estén bajo la legislación europea. La metodología del software permite la compilación de inventarios de emisión nacionales anuales. La interfaz del software del modelo se presenta en la Fig. 4.

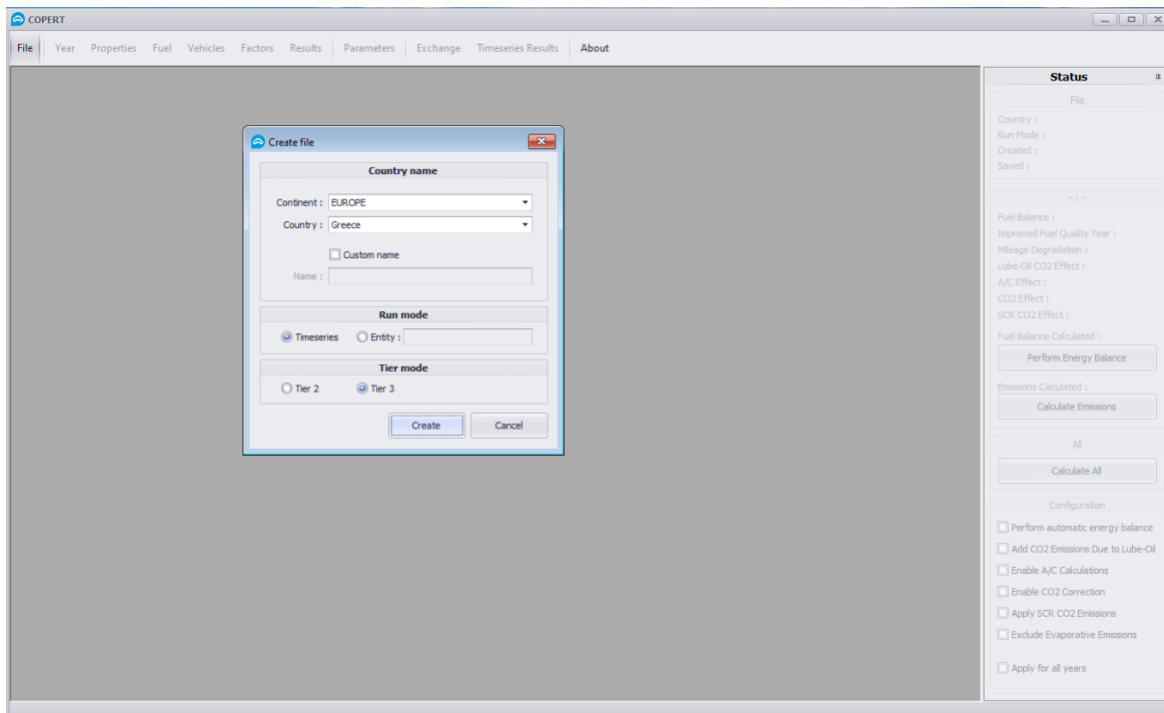


Fig. 4. Interfaz de usuario del software del modelo COPERT.

El software presenta los siguientes requerimientos para realizar las estimaciones de las emisiones:

- **Información de la flota vehicular:** Clase regulatoria (normas Euro), tamaño, kilometraje, combustible que utiliza, si tiene o no aire acondicionado y cantidad de vehículos.

- **Información de la actividad vehicular de la flota:** Definido con los kilómetros recorridos por vehículo al año (VKT), velocidad media anual de los vehículos.
- **Información de las condiciones geográficas y ambientales:** Distancia recorrida, Tipo de carretera, temperatura mínima y máxima promedio, y humedad relativa promedio del aire.
- **Información sobre el tipo de combustible utilizado:** Tipo de combustible (gasolina, diésel, etc.), con su participación de azufre en ppm, contenido de plomo, cadmio, cromo, níquel, selenio, zinc, mercurio, etc.

El modelo COPERT realiza una estimación del factor de emisión de los vehículos [g/km] en caliente, frío y en estado de pérdidas evaporativas por separado, los cuales juntos conforman las emisiones totales como se ve en la ecuación 5. El software realiza la aproximación de estas emisiones mediante las ecuaciones 6 y 7.

$$E_{total} = E_{hot} + E_{cold} + E_{evap} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$E_{i,k} = \sum_{k=0}^n \#vehicles_k VKT_k EF_{i,k,m} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$E_{i,k,m} = \frac{\alpha V^2 + \beta V + \gamma + \frac{\delta}{V}}{\epsilon V^2 + \zeta V + \eta} \cdot (1 - \theta) \quad \text{Ecuación (7)}$$

donde se tiene que $E_{i,k}$ es la emisión del contaminante i y para el tipo de vehículo k [g/año], VKT es la actividad del vehículo y $EF_{i,k}$ es el factor de emisión [g/vehículo*km]. Finalmente para la ecuación 7, se tiene $EF_{i,k,m}$ es el factor de emisión del contaminante i , para el tipo de vehículo k y con combustible m [g/km], V es la velocidad promedio de circulación y finalmente $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta$ y θ son constantes del modelo para cada tipo de vehículo y contaminante.

Smit et al. [27] realizaron una comparación de las emisiones en caliente utilizando mediciones reales de un PEMS en Australia y los obtenidos con el modelo COPERT. Los resultados mostraron que el modelo tuvo un buen comportamiento para las emisiones de CO₂, pero, por otro lado, para las emisiones de NO_x, NO₂, CO y THC, los autores recomendaron que el modelo debía ser revisado. Por otro lado, López et al. [28] realizaron una comparación de CO, HC, NO_x, PM y gases

de efecto invernadero para buses urbanos con diferentes tecnologías de control de emisiones en la ciudad de Madrid (España). Los resultados mostraron una subestimación significativa por parte del modelo, donde las mayores discrepancias se presentaron en HC, NO_x y CO.

3.4 Clasificación del transporte de carga en Colombia y selección de vehículos de interés

Este proyecto sólo se centró en la evaluación de factores de emisión generados por el transporte de carga y el transporte de pasajeros los cuales hacen parte del transporte terrestre automotor. La movilización de carga por carretera es uno de los indicadores que muestran el comportamiento del sector económico nacional, ya que es el transporte que satisface las necesidades de movilización de productos y bienes de un lugar a otro. Su clasificación se encuentra en la resolución 4100 de 2004 del Ministerio de Transporte (Fig. 5), en donde en su artículo 5 los vehículos se clasifican acorde a su sistema de propulsión como:

- Automotores:
 - Vehículo rígido: camioneta y camión
 - Tractocamión
- No automotores:
 - Semirremolque
 - Remolque
 - Remolque balanceado

Las categorías vehiculares para el transporte de pasajeros se clasifican según el Decreto Nacional 1079 de 2015, como se presenta a continuación:









- Grupo A: 4 - 9 pasajeros (automóvil, campero, camioneta)
- Grupo B: 10 - 19 pasajeros (microbús)
- Grupo C: más de 19 pasajeros (bus, buseta)

Con los sistemas de transporte masivo se incluyeron, además:

- BRT (*Bus Rapid Transit*): Buses tipo padrón entre 80 y 120 pasajeros

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

- Articulados: Entre 120 y 170 pasajeros
- Biarticulados: Hasta 260 pasajeros

Designación	Configuración	Descripción	Designación	Configuración	Descripción
2		Camión de dos ejes Camión Sencillo	2S3		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de tres ejes
3		Camión de tres ejes Dobletroque	3S1		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de un eje
4		Camión de cuatro ejes	3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje	3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Vehículos	Designación	Máximo PBV, kg	Tolerancia positiva de medición kg.
Camiones	2	16 000	+ 400 --
	3	28 000	+ 700 --
	4	31 000 (1)	+ 775 --
	4	36 000 (2)	+ 900 --
	4	32 000 (3)	+ 800 --
Tracto-camión con semirremolque	2S1	27.000	+ 675 --
	2S2	32.000	+ 800 --
	2S3	40.500	+ 1013 --
	3 S1	29.000	+ 725 --
	3 S2	48.000	+ 1200 --
	3S3	52.000	+ 1300 --

Fig. 5. Clasificación y pesos brutos vehiculares para transporte de carga en Colombia.

En el proyecto FECOC + Fase 1 [29], el cual fue una fase previa al proyecto actual que enmarca este trabajo de monografía, se caracterizó la flota vehicular colombiana como se presenta en la Tabla 1 y en la Fig. 6. Dentro de esta caracterización se encontró que la categoría de vehículos de carga, en Colombia representa el 2.28% del total del parque automotor, con 348,219 vehículos distribuidos entre camiones (74%), volquetas (13%) y tractocamiones (13%), mientras que los buses representan el 0.197% con un total de 29,917 vehículos, además, para el caso específico de Bogotá, los vehículos de carga representan el 1% que equivale a 25,675 vehículos divididos en camiones (92%), tractocamiones (3%) y volquetas (5%) y 15,469 buses que corresponden al 0.61% de la flota total de la ciudad.

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Tabla 1. Participación por clase de vehículo frente al total RUNT 2020 [29]

Vehículo	Participación %	Cantidad
Motocicleta	60.1	9'126,858
Automóvil	23.6	3'583,924
Camioneta	8.6	1'306,006
Campero	4.5	683,375
Camión	1.7	258,164
Motocarro	0.445	67,578
Tractocamión	0.298	45,255
Volqueta	0.295	44,800
Bus	0.197	29,917
Buseta	0.114	17,312
Cuatrimotor	0.104	15,973
Microbús	0.062	9,500

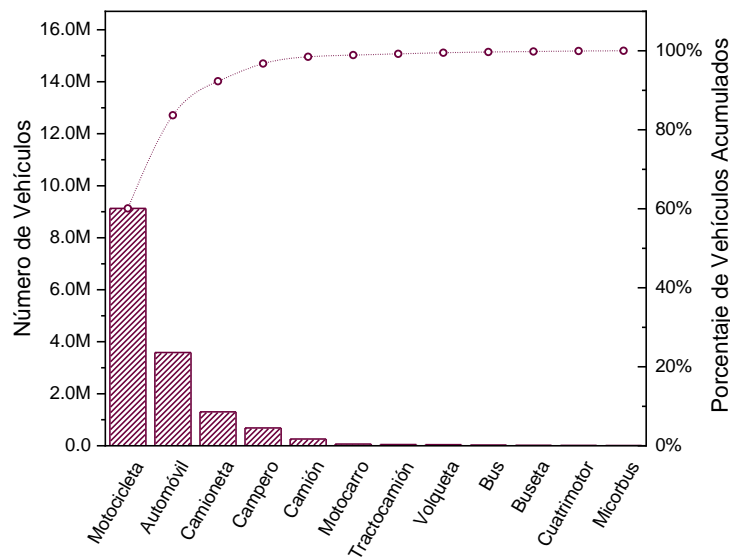


Fig. 6. Diagrama de Pareto según clase de vehículos [29]

En este trabajo se evaluaron 14 vehículos entre carga y pasajeros, para los cuales se realizó una recategorización según su peso y actividad. Esta categorización es la que se siguió usando durante el resto del manuscrito, la cual fue de la siguiente manera:

- C2P: Camiones pequeños de dos ejes (< 5 ton de capacidad de carga).
- AB: Autobuses.
- C2G: Camiones grandes de dos ejes (≥ 5 ton de capacidad de carga).
- TC: Tractocamiones.

IV. METODOLOGÍA

Teniendo como base previa los resultados obtenidos por el grupo de investigación GIMEL de la Universidad de Antioquia, durante la medición de factores de emisión a bordo *in situ* de las diferentes categorías vehiculares en la ciudad de Bogotá, se realizó la metodología descrita a continuación para la comparación de los modelos IVE, MOVES y COPERT con los datos experimentales. Adicionalmente, se ingresó a diferentes bases de datos como *ScienceDirect/Elsevier*, *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE*, y otras, para la obtención de información sobre análisis de factores de emisión e inventarios de emisión de vehículos de transporte de carga y pasajeros desarrollados en otros países.

4.1 Estimación de Factores de Emisión

Los factores de emisión para los vehículos de carga de interés evaluados en Bogotá fueron estimados a partir de los resultados medidos en el proyecto mediante la utilización de los modelos de la forma descrita a continuación:

4.1.1 Modelo IVE

Según los requisitos que el modelo requiere para la modelación y que fueron presentados en la sección anterior, el modelo IVE requiere la alimentación de 60 *bines* o segmentos que simulan la distribución que presenta el ciclo de conducción del vehículo a partir del VSP y el estrés del motor. Debido a esto, los datos de entrada utilizados corresponden al ciclo de conducción de cada vehículo, esto es, la información de velocidad y la ubicación real (longitud y latitud), como se muestra en la Fig. 7. Estos datos tuvieron un primer procesamiento de corrección en donde se multiplicó por (-1) la latitud, para dar la coordenada adecuada y además de esto se estableció un paso de tiempo de segundo a segundo, para suavizar el cálculo de parámetros posteriores para cada vehículo. A partir de estos datos de entrada se determinó: la aceleración, la distancia recorrida, la altitud y la pendiente de la carretera como se observa en la Fig. 8 (los datos mostrados empiezan desde la fila 35 para evitar mostrar los ceros asociados al vehículo antes de iniciar su movimiento).

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Tiempo [s]	Latitud [grados]	Longitud [grados]	Altitud [m]	Velocidad GPS [km/h]	Tiempo [s]	Longitud [grados]	Latitud [grados]	Velocidad	Altitud
0	4,506917	74,159307	2485,68	0	1	-74,159307	4,506917	0	2485,68
0,1	4,506917	74,159307	2485,68	0	2	-74,159307	4,506917	0	2486,146
0,2	4,506917	74,159307	2485,68	0	3	-74,159307	4,506917	0	2485,89
0,3	4,506917	74,159307	2485,68	0	4	-74,159307	4,506917	0	2485,018
0,4	4,506917	74,159307	2485,68	0	5	-74,159307	4,506917	0	2484,934
0,5	4,506917	74,159307	2485,68	0	6	-74,159307	4,506917	0	2484,954
0,6	4,506917	74,159307	2485,89	0	7	-74,159307	4,506917	0	2485,598
0,7	4,506917	74,159307	2485,89	0	8	-74,159307	4,506917	0	2485,79
0,8	4,506917	74,159307	2485,89	0	9	-74,159307	4,506917	0	2485,406
0,9	4,506917	74,159307	2485,89	0	10	-74,159307	4,506917	0	2484,87
1	4,506917	74,159307	2485,89	0	11	-74,159307	4,506917	0	2484,89
1,1	4,506917	74,159307	2485,89	0	12	-74,159307	4,506917	0	2485,086
1,2	4,506917	74,159307	2485,89	0	13	-74,159307	4,506917	0	2485,214
1,3	4,506917	74,159307	2485,89	0	14	-74,159307	4,506917	0	2484,83
1,4	4,506917	74,159307	2485,89	0	15	-74,159307	4,506917	0	2484,786
1,5	4,506917	74,159307	2485,89	0	16	-74,159307	4,506917	0	2484,848
1,6	4,506917	74,159307	2486,53	0	17	-74,159307	4,506917	0	2484,996
1,7	4,506917	74,159307	2486,53	0	18	-74,1593063	4,506917	0	2485,058
1,8	4,506917	74,159307	2486,53	0	19	-74,159306	4,506917	0	2485,21
1,9	4,506917	74,159307	2486,53	0	20	-74,159306	4,506917	0	2485,234
2	4,506917	74,159307	2486,53	0	21	-74,159306	4,506917	0	2485,488
2,1	4,506917	74,159307	2486,53	0	22	-74,159306	4,506917	0	2485,38
2,2	4,506917	74,159307	2486,53	0	23	-74,159306	4,506917	0	2485,102
2,3	4,506917	74,159307	2486,53	0	24	-74,159306	4,506917	0	2485,36
2,4	4,506917	74,159307	2486,53	0	25	-74,1593053	4,5069163	4,342772	2485,36
2,5	4,506917	74,159307	2486,53	0	26	-74,1593022	4,5069139	7,56518	2485,232
2,6	4,506917	74,159307	2484,93	0	27	-74,1592954	4,5069095	9,004184	2484,868
2,7	4,506917	74,159307	2484,93	0	28	-74,1592867	4,5069031	9,746836	2484,61
2,8	4,506917	74,159307	2484,93	0	29	-74,159277	4,5068961	10,504304	2484,782
2,9	4,506917	74,159307	2484,93	0	30	-74,1592663	4,5068891	11,809964	2485,168
3	4,506917	74,159307	2484,93	0	31	-74,1592532	4,5068807	13,245264	2485,232
3,1	4,506917	74,159307	2484,93	0	32	-74,1592385	4,5068717	13,965692	2485,252
3,2	4,506917	74,159307	2484,93	0	33	-74,1592242	4,5068627	13,743452	2485,186
3,3	4,506917	74,159307	2484,93	0	34	-74,1592109	4,5068537	12,932276	2484,61
3,4	4,506917	74,159307	2484,93	0	35	-74,1591993	4,5068461	12,013684	2484,61
3,5	4,506917	74,159307	2484,93	0	36	-74,1591883	4,5068384	11,196952	2484,782

Fig. 7. Datos originales medidos para uno de los vehículos en evaluación.

1	AB														
2	Medición: Bogotá														
3	Fecha: 21/06/22														
4	Jhaniel Osorio y Luisa Rodríguez														
5															
6															
7	Modelo aplicado: International Vehicle Emissions Model (IVE)														
8															
9	Serie de datos Velocidad vs tiempo														
10															
11	DeviceName	No. de viaje	Accum Time	Longitud	Latitud	Speed [km/h]	Speed [m/s]	Accel [m/s ²]	Accel suav [m/s ²]	Dist [m]	Accum dist [km]	Altitude [masl]	Road grade [rad]		
35	AB	1	24	-74,1605	4,5077	0,00	0,00	0,00	1,31	0,00	0,00	2499,63	0,00		
36	AB	1	25	-74,1605	4,5077	8,33	2,31	2,31	1,57	2,31	0,00	2499,63	0,00		
37	AB	1	26	-74,1605	4,5077	9,98	2,77	0,46	0,36	2,77	0,01	2500,8	0,00		
38	AB	1	27	-74,1605	4,5077	12,04	3,34	0,57	0,62	3,34	0,01	2500,38	0,00		
39	AB	1	28	-74,1605	4,5077	14,15	3,93	0,59	0,44	3,93	0,01	2500,06	0,00		
40	AB	1	29	-74,1605	4,5077	15,08	4,19	0,26	0,16	4,19	0,02	2500,48	0,00		
41	AB	1	30	-74,1604	4,5077	15,46	4,30	0,11	0,11	4,30	0,02	2499,84	0,02		
42	AB	1	31	-74,1604	4,5077	15,83	4,40	0,10	0,02	4,40	0,03	2500,38	0,02		
43	AB	1	32	-74,1604	4,5077	15,43	4,29	-0,11	-0,29	4,29	0,03	2500,27	0,02		
44	AB	1	33	-74,1604	4,5077	13,87	3,85	-0,43	-0,45	3,85	0,03	2500,27	0,02		
45	AB	1	34	-74,1604	4,5076	12,37	3,44	-0,42	-0,41	3,44	0,04	2500,27	0,02		
46	AB	1	35	-74,1604	4,5076	11,00	3,06	-0,38	-0,29	3,06	0,04	2500,06	0,02		
47	AB	1	36	-74,1603	4,5076	10,33	2,87	-0,19	-0,13	2,87	0,04	2499,84	0,02		
48	AB	1	37	-74,1603	4,5076	9,98	2,77	-0,10	-0,05	2,77	0,05	2500,48	0,02		
49	AB	1	38	-74,1603	4,5076	9,65	2,68	-0,09	-0,19	2,68	0,05	2500,16	0,02		
50	AB	1	39	-74,1603	4,5076	7,65	2,12	-0,56	-1,56	2,12	0,05	2500,27	0,02		
51	AB	1	40	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	-2,12	-1,19	0,00	0,05	2496,43	0,02		
52	AB	1	41	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,05	2496,01	0,02		
53	AB	1	42	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	2495,47	0,02		
54	AB	1	43	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	2496,43	0,02		
55	AB	1	44	-74,1603	4,5076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	2496,01	0,02		

Fig. 8. Cálculos complementarios de aceleración, distancia acumulada y la pendiente de la carretera para uno de los vehículos en evaluación.

La aceleración calculada a partir del cambio de velocidad respecto al tiempo aumentaba sustancialmente la frecuencia de generación de picos de aceleración, por lo cual se realizó un tratamiento de suavización de la aceleración con la implementación de la ecuación 8, basada en una serie de Taylor, además la pendiente se estimó a partir de un promedio de cada 200 metros recorridos por el vehículo.

$$a_{t=i} = \frac{(-a_{t=i+2} + 8 \cdot a_{t=i+1} - 8 \cdot a_{t=i-1} + a_{t=i-2})}{12 \cdot (t_i - t_{i-1})} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Posteriormente para la correcta obtención de la VSP, se calculó de forma independiente cada una de las cuatro fuerzas participantes. Por su parte el estrés del motor (ES), es un parámetro que tiene en cuenta las condiciones del motor (VSP y promedio), unos instantes antes del momento actual. Este parámetro influye en las emisiones estimadas para cada segundo del recorrido, y se calculó usando las ecuaciones 9, 10 y 11.

$$PPA_{\left[\frac{kW}{ton}\right]} = \frac{VSP_{t=-5s} + VSP_{t=-6s} + \dots + VSP_{t=-25s}}{n} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$Indice \ RPM = \frac{V_{t=0s}}{\text{Divisor de velocidad}} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

$$ES = Indice \ RPM + \left(0.08 \frac{ton}{kW}\right) \cdot PPA \quad \text{(Ecuación 11)}$$

donde *PPA* es la potencia promedio anterior en [kW/ton], la cual es un promedio de los VSP anteriores y el divisor de velocidad el cual se toma de la Tabla 2. El Índice RPM tiene un mínimo valor de 0.9 y no tiene unidades. Los *bines* se seleccionan mediante los datos presentados en la Tabla 3 y la fracción de viaje, representada en el porcentaje de distribución que se observan en rojo en la Fig. 9, son los valores que fueron ingresados en el modelo y que deben sumar un valor aproximado al 100%. Finalmente, *ES* representa el estrés del motor.

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Tabla 2. Rangos de selección del modelo IVE para la determinación del divisor de velocidad utilizado para el cálculo del estrés del motor [21]

Puntos de corte de Velocidad		Puntos de corte de Potencia		Divisor de velocidad
Min	Max	Min	Max	
0.0	5.4	-20	400	3
5.4	8.5	-20	16	5
5.4	8.5	16	400	3
8.5	12.5	-20	16	7
8.5	12.5	16	400	5
12.5	50	-20	16	13
12.5	50	16	400	5

Tabla 3. Rango de determinación de los bins del ciclo de conducción dentro del modelo IVE [21].

Bin	VSP (kW/ton)		Estrés de Motor (ES)		Bin	VSP (kW/ton)		Estrés de Motor (ES)		Bin	VSP (kW/ton)		Estrés de Motor (ES)		Bin	VSP (kW/ton)		Estrés de Motor (ES)	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior		Inferior	Superior	Inferior	Superior		Inferior	Superior	Inferior	Superior		Inferior	Superior	Inferior	Superior
0	-80,0	-44,0	-1,6	3,1	15	13,6	17,7	-1,6	3,1	30	-7,0	-2,9	3,1	7,8	45	-27,6	-23,4	7,8	12,6
1	-44,0	-39,9	-1,6	3,1	16	17,7	21,8	-1,6	3,1	31	-2,9	1,2	3,1	7,8	46	-23,4	-19,3	7,8	12,6
2	-39,9	-35,8	-1,6	3,1	17	21,8	25,9	-1,6	3,1	32	1,2	5,3	3,1	7,8	47	-19,3	-15,2	7,8	12,6
3	-35,8	-31,7	-1,6	3,1	18	25,9	30,0	-1,6	3,1	33	5,3	9,4	3,1	7,8	48	-15,2	-11,0	7,8	12,6
4	-31,7	-27,6	-1,6	3,1	19	30,0	1000,0	-1,6	3,1	34	9,4	13,6	3,1	7,8	49	-11,1	-7,0	7,8	12,6
5	-27,6	-23,4	-1,6	3,1	20	-80,0	-44,0	3,1	7,8	35	13,6	17,7	3,1	7,8	50	-7,0	-2,9	7,8	12,6
6	-23,4	-19,3	-1,6	3,1	21	-44,0	-39,9	3,1	7,8	36	17,7	21,8	3,1	7,8	51	-2,9	1,2	7,8	12,6
7	-19,3	-15,2	-1,6	3,1	22	-39,9	-35,8	3,1	7,8	37	21,8	25,9	3,1	7,8	52	1,2	5,3	7,8	12,6
8	-15,2	-11,0	-1,6	3,1	23	-35,8	-31,7	3,1	7,8	38	25,9	30,0	3,1	7,8	53	5,3	9,4	7,8	12,6
9	-11,1	-7,0	-1,6	3,1	24	-31,7	-27,6	3,1	7,8	39	30,0	1000,0	3,1	7,8	54	9,4	13,6	7,8	12,6
10	-7,0	-2,9	-1,6	3,1	25	-27,6	-23,4	3,1	7,8	40	-80,0	-44,0	7,8	12,6	55	13,6	17,7	7,8	12,6
11	-2,9	1,2	-1,6	3,1	26	-23,4	-19,3	3,1	7,8	41	-44,0	-39,9	7,8	12,6	56	17,7	21,8	7,8	12,6
12	1,2	5,3	-1,6	3,1	27	-19,3	-15,2	3,1	7,8	42	-39,9	-35,8	7,8	12,6	57	21,8	25,9	7,8	12,6
13	5,3	9,4	-1,6	3,1	28	-15,2	-11,0	3,1	7,8	43	-35,8	-31,7	7,8	12,6	58	25,9	30,0	7,8	12,6
14	9,4	13,6	-1,6	3,1	29	-11,1	-7,0	3,1	7,8	44	-31,7	-27,6	7,8	12,6	59	30,0	1000,0	7,8	12,6

Cálculos dinámicos de vehículo										Cálculos IVE										Frecuencias Bines IVE	
Fd	Fr	Fg	Fi	Fx	Px	VSP	Speed divider [s/n]	RPM Index [°]	Preaverage po	Engine stress	i	j	Bin IVE [-]								
20	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	6	0,00%						
21	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	7	0,00%						
22	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	8	0,10%						
23	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	9	1,57%						
24	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	10	5,59%						
25	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	11	63,98%						
26	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	12	23,37%						
27	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	13	5,12%						
28	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	14	0,26%						
29	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	15	0,00%						
30	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	16	0,00%						
31	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	17	0,00%						
32	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	18	0,00%						
33	0,00	1510,74	0,00	0,00	1510,74	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	19	0,00%						
34	0,00	1510,74	0,00	-4244,04	-2733,30	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	20	0,00%						
35	0,00	1510,74	0,00	28868,91	30379,65	0,00	3	0,90	0,000	0,9	12	1	11	21	0,00%						
36	13,87	1510,74	0,00	34537,23	36061,84	83480,75	3,79	3	0,90	0,000	0,9	13	1	12	22	0,00%					
37	19,89	1510,74	0,00	7884,84	9415,48	26107,13	1,19	3	0,92	0,000	0,92426296	12	1	11	23	0,00%					
38	28,93	1510,74	1,94	13543,61	15085,22	50442,28	2,29	3	1,11	0,000	1,11460741	13	1	12	24	0,00%					
39	39,97	1510,74	0,00	9582,39	11133,10	43756,29	1,99	3	1,31	0,000	1,3100963	13	1	12	25	0,00%					
40	45,38	1510,74	1,55	3423,63	4981,29	20859,21	0,95	3	1,40	0,000	1,39583704	12	1	11	26	0,00%					
41	47,75	1510,44	4316,40	2442,75	8317,34	35727,50	1,62	3	1,43	0,000	1,43184815	13	1	12	27	0,00%					
42	50,06	1510,44	4316,40	462,14	6339,04	27881,85	1,27	3	1,47	0,000	1,46614444	13	1	12	28	0,00%					

Fig. 9. Cálculos de VSP, estrés de motor y distribución de los bins para ingresar el análisis en el modelo IVE.

Finalmente, una vez el ciclo estuvo listo para ingresarlo al modelo, fue necesario determinar la flota vehicular (tecnología, tipo de vehículo, sistema de inyección, kilometraje, condiciones de arranque y peso), un factor importante para los resultados obtenidos, ya que, si se seleccionaban

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

tecnologías similares, pero con leves diferencias, el modelo tendía a realizar estimaciones con diferencias significativas, sobreestimando aún más las emisiones resultantes.

Para definir las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá, se tomaron datos promedio reportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [30] de la temperatura en seco durante el día de evaluación y la humedad relativa (21 de junio del 2022). Los parámetros sobre la composición del combustible utilizado fueron proporcionados por el grupo de investigación.

Todos estos datos se ingresaron al *software* como se presenta en la Fig. 10. De esta forma el modelo da estimación de los factores de emisión de CO₂, CO, VOC, VOC_{Evap}, NO_x, SO_x, y PM.

The screenshot shows the IVE Model 2.0.2 interface with the following settings:

- Location:** Bogotá
- Fleet:** C2P SNM050
- Base Adjustment:** - none -
- Day:** 06, **Month:** June, **Year:** 2022
- Day of the week:** Monday, **Altitude:** 2492.6 meters
- I/M Class:** none
- A/C Use at 27°C (80°F):** 50.0%
- Road Grade:** 0.0%
- Fuel Characteristics:**
 - Gasoline: Overall moderate/premixed, Sulfur (S) moderate (300ppm), Lead (Pb) none, Benzene moderate (1.50%), Oxygenate 0%
 - Diesel: Overall biodiesel, Sulfur (S) super low (15ppm)
- Hour:** 0:00/all, Use this hour
- Driving Characteristics:**
 - Humidity: 85.0%
 - Temperature: 13.0 °Celsius
 - Distance/Time: 9.9 kilometers
 - Start-ups: 0.0
- VSP Bin Table:**

Group 1		Group 2		Group 3		Group 4		Group 5		Group 6		Group 7		Group 8		Group 9				
VSP Bin 0	VSP Bin 1	VSP Bin 2	VSP Bin 3	VSP Bin 4	VSP Bin 5	VSP Bin 6	VSP Bin 7	VSP Bin 8	VSP Bin 9	VSP Bin 10	VSP Bin 11	VSP Bin 12	VSP Bin 13	VSP Bin 14	VSP Bin 15	VSP Bin 16	VSP Bin 17	VSP Bin 18	VSP Bin 19	
				0.04	0.08	0.04	0.21	0.25	0.63											
4.64	68.27	20.89	4.26	0.42	0.13	0.04	0.04	0.04												
VSP Bin 20	VSP Bin 21	VSP Bin 22	VSP Bin 23	VSP Bin 24	VSP Bin 25	VSP Bin 26	VSP Bin 27	VSP Bin 28	VSP Bin 29	VSP Bin 30	VSP Bin 31	VSP Bin 32	VSP Bin 33	VSP Bin 34	VSP Bin 35	VSP Bin 36	VSP Bin 37	VSP Bin 38	VSP Bin 39	
VSP Bin 40	VSP Bin 41	VSP Bin 42	VSP Bin 43	VSP Bin 44	VSP Bin 45	VSP Bin 46	VSP Bin 47	VSP Bin 48	VSP Bin 49	VSP Bin 50	VSP Bin 51	VSP Bin 52	VSP Bin 53	VSP Bin 54	VSP Bin 55	VSP Bin 56	VSP Bin 57	VSP Bin 58	VSP Bin 59	
15 min	30 min	1 hour	2 hours	3 hours	4 hours	6 hours	8 hours	12 hours	18 hours	Total	Vehicle Spec. Power Distribution		Soak Time Distribution		Total		100.0		%	

Fig. 10. Proceso de ingreso de datos en la interfaz del modelo IVE para uno de los vehículos en evaluación.

4.1.2 Modelo MOVES

El modelo MOVES requiere definir su escala de simulación dentro de las tres opciones que presenta, lo cual, dependiendo de la región evaluada por el usuario, puede ser útil o no, ya que como se mencionó previamente el modelo se desarrolló específicamente con las rutas, condiciones ambientales, tipo de combustible y tecnologías que se presentan dentro de los Estados Unidos de

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

América. En el caso de la evaluación realizada dentro de este trabajo, se seleccionó el modo “proyecto”, para así, tener mayor control de los parámetros simulados, estableciendo nuestras rutas evaluadas, el tipo de flota vehicular, las condiciones ambientales y geográficas de Bogotá y también las características propias de la carretera donde se realizó la campaña experimental.

MOVES utiliza la información que se presenta en la Tabla 4 para identificar la categoría de la flota mediante el tipo de vehículo y rango de la capacidad de carga. Este parámetro, al igual que en el IVE, tiene efecto en los resultados finales obtenidos, por lo que es crítica la correcta selección teniendo en cuenta los vehículos medidos. Una vez seleccionado el vehículo, en la interfaz de “Vehicles/Equipment”, también se debe seleccionar el combustible como se muestra en la Fig. 11. Más adelante se tiene la forma de modificar la composición del combustible seleccionado.

Tabla 4. Índice de peso bruto del vehículo (GVWR) establecido por el modelo MOVES para la determinación de la categoría de la flota a evaluar [15]

GVWR (lb)	MOVES Source Type
0 – 4,300	Passenger Car
4,301 – 19,500	Light Commercial Truck
19,501 – 33,000	Single Unit Short Haul
33,001 – 60,000	Combination Short Haul

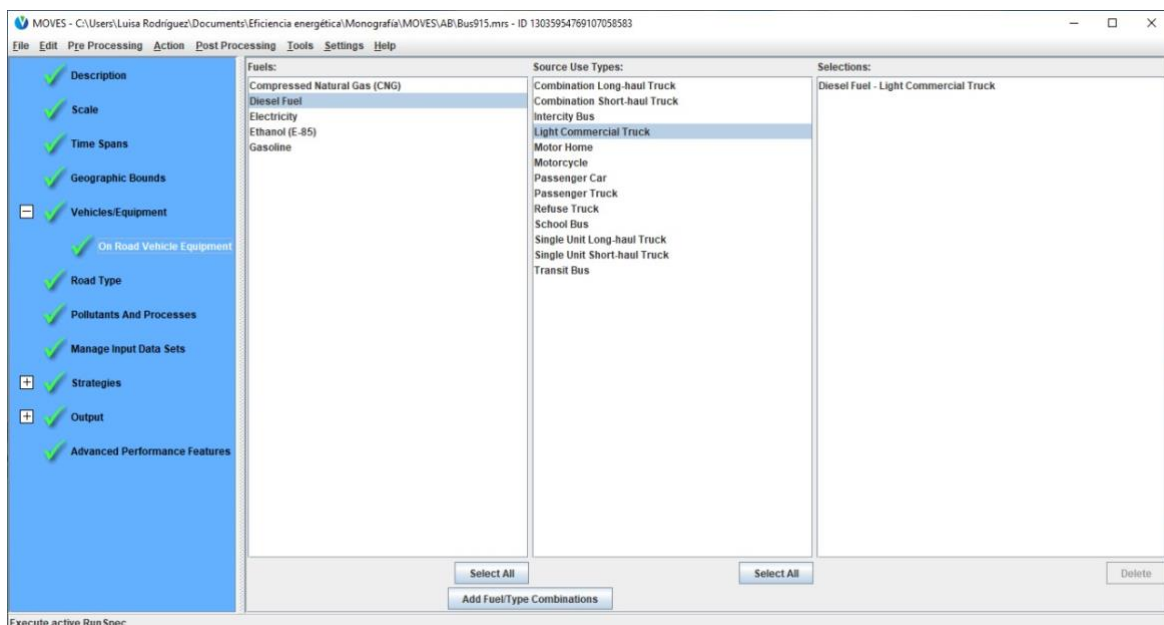


Fig. 11. Proceso de selección de la flota dentro del modelo MOVES, con uno de los vehículos medidos

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Posteriormente, se ingresó la información del tipo de ruta utilizada, la cual también más adelante fue alimentada al programa con las condiciones específicas de nuestra campaña experimental. Luego, dentro de la ventana “*Pollutants and Processes*”, se definieron los contaminantes que querían ser modelados en cada uno de los procesos: durante el movimiento del vehículo, durante el arranque, desgaste de los frenos y las llantas, entre otros. Para el caso actual, las mediciones de interés corresponden únicamente a las generadas mientras los vehículos se encuentran en movimiento, por lo que se estimaron CO, CO₂, PM y NO_x, como se observa en la Fig. 12. Finalmente, en las otras secciones del modelo, se escogieron algunos parámetros de salida, como la base de datos final y las unidades en las que fueron calculadas las estimaciones.

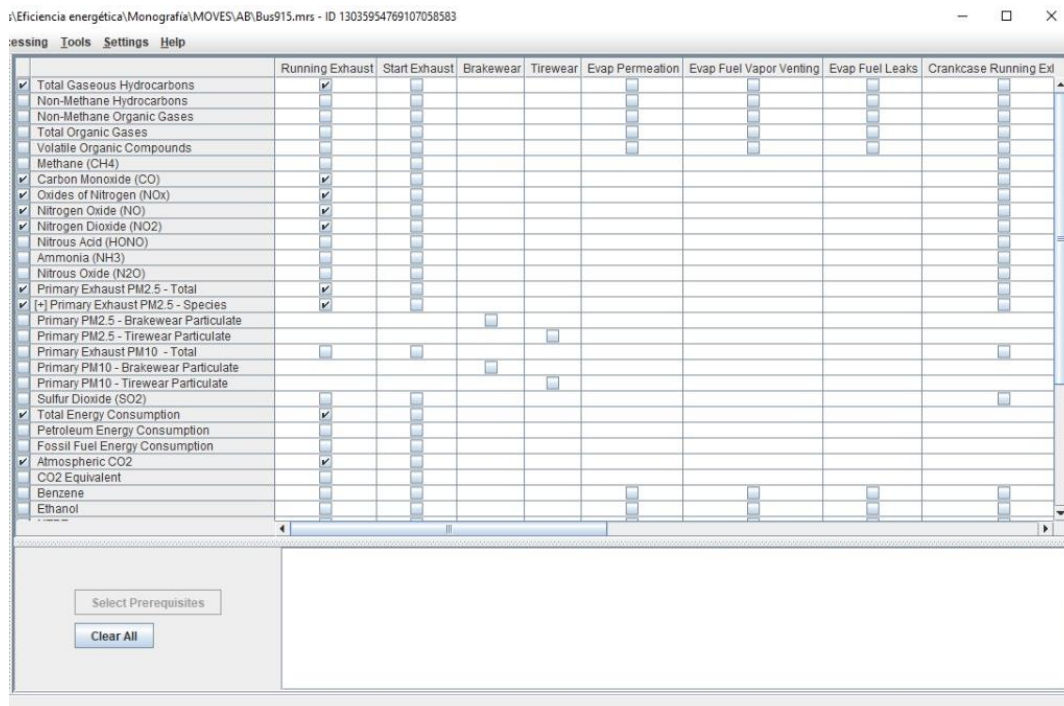


Fig. 12. Proceso de selección de las emisiones de interés dentro del modelo MOVES.

Dentro del modo *proyecto* en MOVES, se pueden caracterizar mejor las condiciones de evaluación mediante la modificación de la base de datos de entrada del modelo, la cual fue creada dentro del “*MOVES Project Data Manager*” como se ve en la Fig. 13. Se requirió habilitar cada una de las pestañas mediante el ingreso de los diferentes datos solicitados para la modelación mediante el llenado de diferentes plantillas de Excel generadas por el mismo MOVES, tales como:

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

- *Fuel*: se indica la composición del combustible específico que es utilizado. (Fig. 14a)
- *Age distribution*: se indica la distribución de años de antigüedad de los vehículos que componen la flota a ser estudiada. (Fig. 14b)
- *Links*: se especificó la velocidad promedio, pendiente promedio y longitud total de las vías o tramos considerados dentro del proyecto.
- *Link Drives Schedules*: se alimenta con la información de varias condiciones como Tramos y Vías, mediante la longitud del tramo, la velocidad y la pendiente promedio a lo largo de la vía definida. Ciclo de conducción por tramo, proporcionado con la información de velocidad y pendiente a lo largo de la vía segundo a segundo. (Fig. 14c)
- *Link Source Type*: tipo de vehículo en cada tramo, que se define con la proporción de cada tipo de vehículo que circula por la vía definida en el alcance del proyecto.
- *Off-Network*: información del vehículo por fuera de la vía, es decir, se indica la fracción de tiempo correspondiente al arranque, a inactividad y parqueo del vehículo
- *Meteorology Data*: Se proporcionan datos de temperatura ambiente y humedad relativa de la zona. (Fig. 14d)

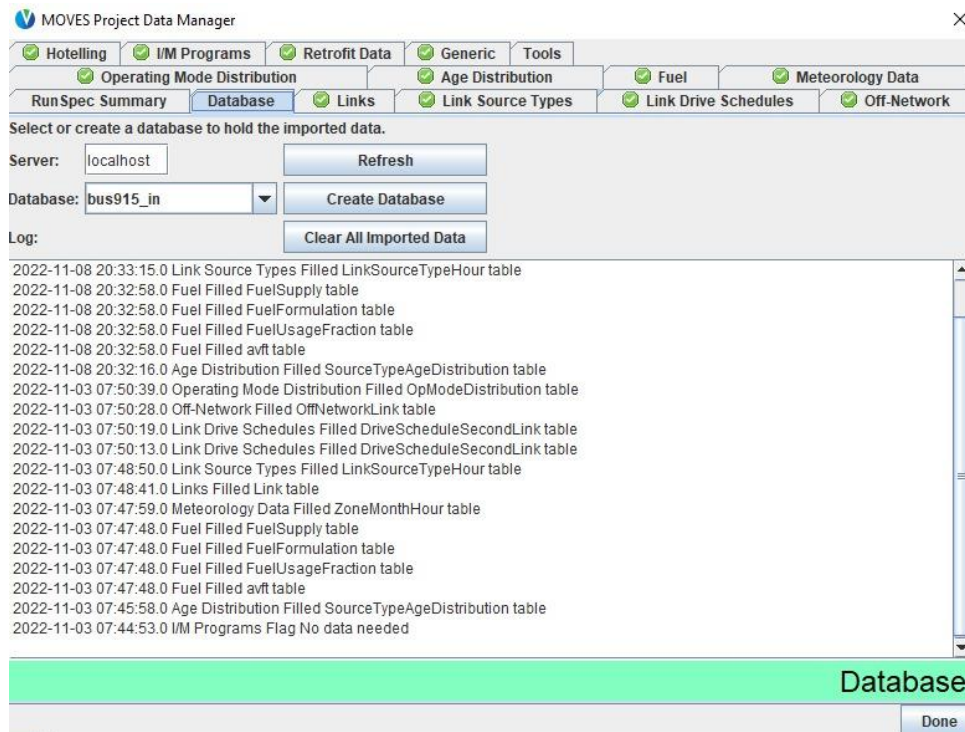


Fig. 13. Ventana del MOVES Project Data Manager con toda la información ya ingresada para poder realizar la simulación de uno de los vehículos en evaluación.

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	fuelFormul	fuelSubtyp	RVP	sulfurLevel	ETOHVolu	MTBEVolu	ETBEVolu	TAMEVolu	aromaticC	olefinCont	benzeneC	e200	e300	BioDieselE	CetaneInd	PAHConte	T50	T90
2	20	20	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	25005	21	0	15	0	0	0	0	27,5	5,3	0	0	0	10	50	10	573	680

b)

	A	B	C	D
1	sourceTyp	yearID	ageID	ageFraction
2	32	2022	0	0
3	32	2022	1	0
4	32	2022	2	0
5	32	2022	3	0
6	32	2022	4	0
7	32	2022	5	0
8	32	2022	6	0
9	32	2022	7	0
10	32	2022	8	0
11	32	2022	9	0
12	32	2022	10	0
13	32	2022	11	0
14	32	2022	12	0
15	32	2022	13	0
16	32	2022	14	0
17	32	2022	15	0
18	32	2022	16	1

c)

	A	B	C	D
1	linkID	secondID	speed	grade
29	5	28	2,914144	0
30	5	29	6,358804	0
31	5	30	8,014566	0
32	5	31	9,498092	0
33	5	32	11,08496	0
34	5	33	11,31231	0
35	5	34	10,32483	0
36	5	35	8,41645	0
37	5	36	6,66194	0
38	5	37	5,947734	0
39	5	38	5,660674	0
40	5	39	5,30472	0
41	5	40	2,057587	0

d)

	A	B	C	D	E
1	monthID	zoneID	hourID	temperatur	relHumidity
2	7	480150	22	55,4	84

Fig. 14. Ejemplos de datos cargados en el MOVES Project Data Manager. a) Información del combustible, b) Distribución de edades, c) Información sobre el ciclo de conducción (velocidad, pendiente y tipo de carretera) y d) Condiciones ambientales de temperatura y humedad.

Una vez ingresada toda la información en la base de datos generada para la evaluación dentro del modelo MOVES, el proceso es ejecutado para finalmente obtener los valores de cada factor de emisión seleccionado por tipo de vehículo y vía.

4.1.3 Modelo COPERT

Los requisitos del modelo COPERT son más simplificados que los que tienen los modelos anteriores, ya que no es necesario introducir el ciclo de conducción del vehículo, y los valores de entrada son, en general, valores promedio de las condiciones a las que se llevaron a cabo las mediciones. El *software* exigió además del año de evaluación, la siguiente información:

- *Environmental Information:* datos de temperatura ambiente y humedad relativa de la zona. (Fig. 15a)
- *Stock Configuration:* las características de la flota, como tecnología, las categorías (a partir de la categorización realizada por la *European Environmental Agency* en su libro guía [31]) y los combustibles (en otra ventana se pueden especificar además del contenido de metales, otras características de los combustibles) (Fig. 15b).
- *Trip Characteristics:* corresponde a kilómetros recorridos en el trayecto y su duración para el vehículo en evaluación (Fig. 15c).

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

- *Stock and Activity Data*: número de vehículos a evaluar, su respectivo kilometraje y el promedio de actividad en kilómetros del vehículo (Fig. 15d).
- *Circulation Activity*: información de los tipos de vía/carretera por los cuales se hace la estimación y la velocidad promedio en el trayecto (Fig. 15e).

Los datos obtenidos en la medición permitieron establecer fácilmente los valores de entrada del modelo. La información de las temperaturas y humedades relativas fueron tomados del IDEAM [30], usando la misma metodología empleada en los modelos IVE y MOVES.

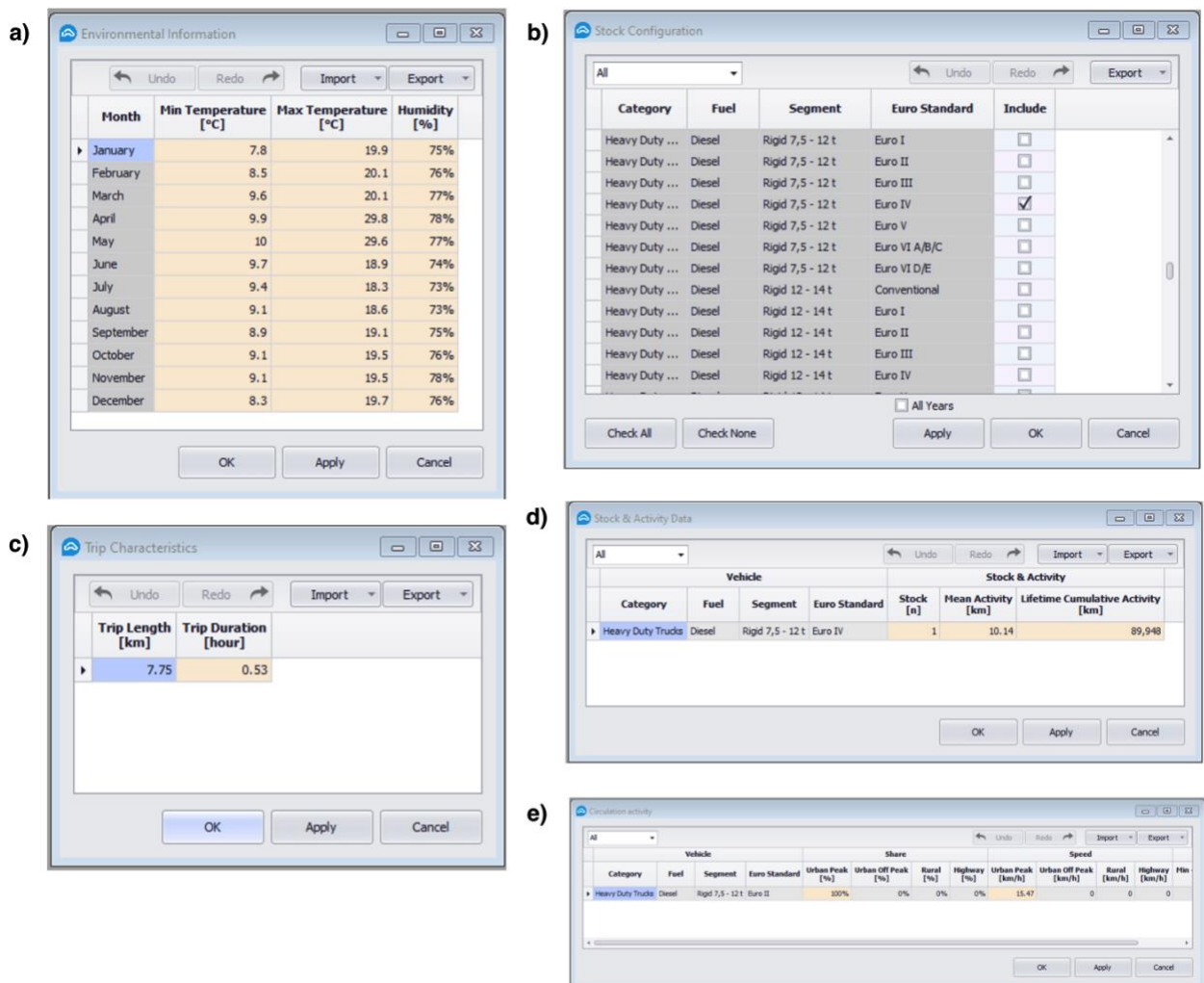


Fig. 15. Ventanas de interacción del modelo COPERT. a) Información ambiental, b) Actividad y stock vehicular, c) Información sobre actividad de circulación, d) Características del viaje y e) Configuración del stock vehicular.

4.2 Determinación de Inventarios de Emisión

Los inventarios de emisión se determinaron a partir de la ecuación 12 utilizando los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo con los modelos IVE, MOVES y COPERT. La actividad vehicular se tomó a partir de la actividad de las categorías vehiculares similares a las medidas en ruta, reportadas por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) para el año 2020 [32], en la Tabla 5 se presenta la actividad reportada para los vehículos de interés.

$$Inventario\ de\ Emisión_{[año]}^{[ton]} = F.E._{[km]}^{[g]} \cdot Actividad_{[año]}^{[km]} \cdot \frac{1_{[ton]}}{10^6_{[g]}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Tabla 5. Actividad vehicular reportada por la SDA de Bogotá para los vehículos de interés [32].

Categoría	Servicio	Tipología	Combustible	Capacidad o cilindraje	Estándar de emisión	Ejes	Número	Actividad (km/año)
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	entre 1 a 3 toneladas	EURO II	2	2,991	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	entre 3 a 5 toneladas	EURO II	2	2,462	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	entre 5 a 7 toneladas	EURO II	2	1,208	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	mayor a 7 toneladas	EURO II	2	2,147	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	mayor a 7 toneladas	EURO II	3	1,093	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	mayor a 7 toneladas	EURO II	4	18	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	entre 1 a 3 toneladas	EURO IV	2	1,828	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	entre 3 a 5 toneladas	EURO IV	2	1,746	22000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	entre 5 a 7 toneladas	EURO IV	2	693	22.000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	mayor a 7 toneladas	EURO IV	3	828	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	mayor a 7 toneladas	EURO IV	4	14	22,000
Transporte de carga	Particular	Camión	Diésel	mayor a 7 toneladas	EURO IV	2	1,627	22,000
Transporte de especial	Público	Bus	Diésel	No aplica	PRE-EURO	No aplica	1,826	28,864
Transporte de especial	Público	Bus	Diésel	No aplica	EURO IV	No aplica	1,304	28,864
Transporte de especial	Público	Buseta	Diésel	No aplica	PRE-EURO	No aplica	569	30,539
Transporte de especial	Público	Microbús	Diésel	No aplica	PRE-EURO	No aplica	2,393	28,978
Transporte de especial	Público	Microbús	Diésel	No aplica	EURO IV	No aplica	2,185	28,978

V. RESULTADOS

La estimación de los factores de emisión se realizó por cada una de las cuatro categorías vehiculares establecidas en el marco teórico de este documento, por lo que los resultados serán presentados y distribuidos en estos grupos vehiculares, a saber, C2P, Autobuses (AB), C2G y TC

5.1 Camiones pequeños de dos ejes (<5 ton) - C2P

En la figura 16 se muestran los factores de emisión obtenidos para los camiones pequeños de dos ejes C2P (< 5 ton). El factor de emisión de CO₂ (Fig. 16a), calculado por los tres modelos fue superior al obtenido mediante mediciones en carretera para tres de los vehículos C2P evaluados. El vehículo identificado como C2P4 presentó porcentajes de desviación bajos frente al valor experimental para los tres modelos de cálculo, siendo de 0.6% con MOVES y 3% con IVE, lo que disminuyó el valor promedio estimado del factor de emisión de CO₂ para vehículos Euro IV reportado en la Tabla 6. En este caso, a pesar de que los vehículos C2P3 y C2P4 tenían la misma tecnología y tamaño de motor, el valor medido en ruta del factor de CO₂ fue 40% inferior para C2P3 frente a C2P4. Era de esperarse que los FE de CO₂ calculados con los tres modelos fuera semejante, tal como se muestra en la Fig. 16a. La diferencia entre los valores medidos en estos dos vehículos pudo deberse a factores adicionales de operación y mantenimiento de cada vehículo, o a diferencias en el grado de puesta a punto en la calibración de la electrónica, que no son tenidos en cuenta en las simulaciones.

En la Fig. 16b se muestra el FE de CO. Este contaminante es subestimado por los tres modelos. Al vehículo C2P2 no se le logró medir la emisión de CO. La mayoría de los valores de FE calculados con el IVE arrojaron valores subestimados en más del 95% frente a los medidos. Con MOVES, la diferencia correspondió a 27% para el Euro II y más del 90% para vehículos Euro IV. Por su parte en COPERT la desviación se encuentra por encima del 83%. Una posible explicación para este comportamiento pudiera ser que los modelos de cálculo no alcanzan a simular efectos térmicos asociados a la baja temperatura ambiente, así como la posible deficiencia de oxígeno atmosférico

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

a la altitud de Bogotá que podrían afectar la eficiencia del proceso de combustión, que sí alcanzan a ser medidos con el PEMS bajo condiciones reales de operación.

En la Fig. 16c se muestra el FE de NO_x. Mientras que los modelos IVE y MOVES subestiman los FE frente a los valores medidos, se apreció que el modelo COPERT arrojó valores más cercanos a los medidos con una diferencia promedio cercana a $\pm 23\%$. La subestimación de los FE de NO_x por los modelos de cálculo podría deberse a que, en las pruebas en ruta bajo condiciones reales, la temperatura al interior de la cámara de combustión, principal responsable de la generación de NO_x en los motores, debió ser mayor que utilizada en las simulaciones de los modelos.

Finalmente, en el caso del FE de PM_{2.5} (Fig. 16d), no existe una tendencia generalizada en la comparación de los FE medidos frente a los modelados. En el vehículo Euro II más antiguo, los tres modelos sobreestimaron el FE de PM_{2.5}, en el caso particular del MOVES, fue de 2X (doble del valor medido). El modelo IVE sobreestimó entre 21% y 74% las emisiones de PM_{2.5} para los dos vehículos Euro II y alrededor de 24% para los vehículos Euro IV. por su parte, en el modelo MOVES, curiosamente, subestima entre 70% y 80% el FE de PM_{2.5} para los demás vehículos C2P. El modelo COPERT sobreestimó el FE de PM_{2.5} de todos los vehículos. La mejor aproximación frente a los FE medidos la otorgó el modelo IVE. Las diferencias marcadas entre el FE de PM_{2.5} medido y los obtenidos a través de los modelos podría deberse a varias razones. La última versión del modelo IVE fue lanzada en 2010, momento para el cual no se contaba con PEMS suficientemente precisos para la medición de PM_{2.5} en vehículos. Por su parte en el MOVES fue difícil ingresar la tecnología adecuada de control de emisiones Euro II y Euro IV, ya que el modelo fue desarrollado para tecnología de control EPA, mientras que el COPERT, a pesar de coincidir con las normas Euro de emisiones, quizá no tiene en consideración los efectos medioambientales de gran altura, temperatura y humedad propios de la ciudad de Bogotá.

Tabla 6. Comparación de resultados modelados de vehículos C2P respecto a datos medidos.

Factor de Emisiones	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV
CO ₂	+ 13.27%	+ 26.05%	+ 55.34%	+ 23.25%	\pm 11.25%	\pm 19.40%
CO	- 88.91%	- 97.57%	- 26.33%	- 92.70%	- 83.16%	- 85.91%
NO _x	- 51.45%	- 45.02%	- 63.61%	- 96.08%	\pm 23.25%	- 15.42%
PM _{2.5}	+ 1.5x	+ 23.77%	+ 1.2x	- 75.02%	+ 1.6x	+ 2.7x

Nota: + Sobreestimación, nx sobreestimación en n veces, - Subestimación.

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

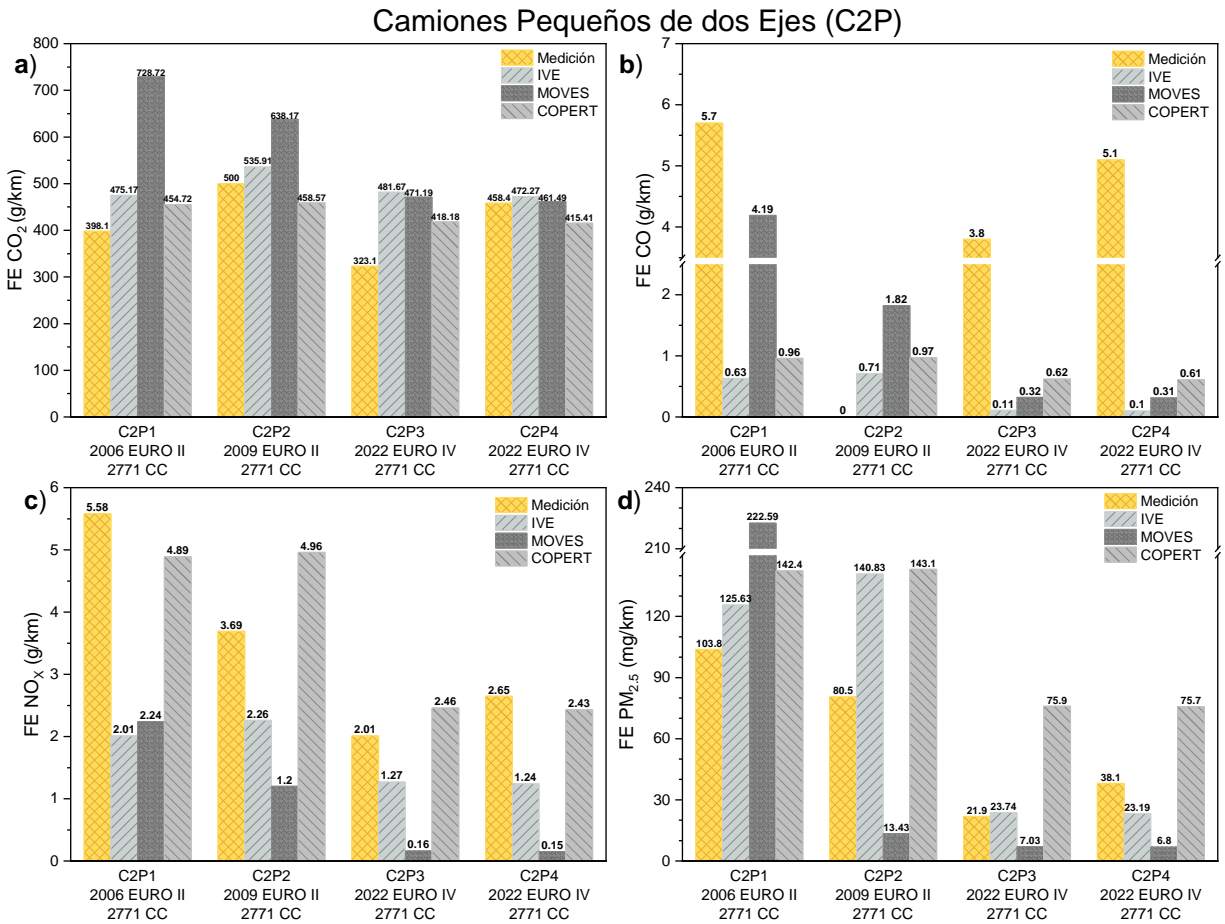


Fig. 16. Factores de emisión para vehículos C2P. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.

5.2 Autobuses – AB

En la Fig. 17, se presentan los factores de emisión para la categoría de autobuses. Los resultados mostraron que para el caso del FE de CO₂ (Fig. 17a), las estimaciones de los modelos IVE y MOVES fueron más asertivos para los autobuses Euro IV, arrojando diferencias de 9% y 13% respectivamente, en comparación a los datos medidos. La diferencia en las estimaciones del FE de CO₂ incrementó para el bus Euro V llegando a oscilar entre 20% y 30% para ambos modelos. La mayor diferencia se presentó en los autobuses Euro II, donde el modelo IVE tuvo un porcentaje promedio de 39%, y el modelo MOVES llegó a sobreestimar hasta el 135%. El modelo COPERT arrojó los resultados de FE de CO₂ más parecidos frente a los medidos, en comparación con el IVE y el MOVES.

A diferencia de los resultados de FE obtenidos para la categoría C2P, los factores de emisiones obtenidos para el CO para autobuses (Fig. 17b), mostraron una tendencia considerable de subestimar los FE de vehículos Euro IV y V, llegando a errores que superan el 96% en ambos modelos, pero para los autobuses Euro II, ambos modelos tienen una aproximación diferente, mientras que MOVES sobreestimó en torno a 10%, el modelo IVE subestimó en torno a 80%. En términos generales, los tres modelos subestimaron significativamente el FE de CO para vehículos Euro IV. En su orden de mejor a peor resultados de modelación del FE de CO para autobuses se pudo establecer el siguiente orden: COPERT > IVE > MOVES.

El FE de NO_x para autobuses se muestra en la Fig. 17c. La diferencia tan significativa entre los FE de NO_x medidos de los dos vehículos Euro II puede obedecer a diferentes factores del estado de mantenimiento, y operación de los autobuses, uno modelo 2006, el de más emisiones de NO_x, y el otro modelo 2009. Es altamente probable que el motor del Autobús AB1 (modelo 2006), tuviera el tiempo de inicio de inyección más adelantado que el autobús AB2 (modelo 2009), lo que se puede corroborar en las menores emisiones de CO₂ del primero. Es sabido que el adelanto en la inyección del combustible genera mayores temperaturas promedio dentro de la cámara de combustión, lo que conlleva a obtener mayor eficiencia de combustión, es decir menos CO₂, pero mayor emisión de NO_x. Tanto el IVE como el MOVES subestimaron este FE de NO_x. Una vez la tecnología cambia a Euro IV y V, los modelos se distancian con creces a frente a los valores medidos, obteniendo resultados que sugieren que los modelos esperan una emisión de entre 3 y 30 veces más baja que la medida en ruta (dependiendo del modelo), lo que puede estar asociado específicamente a consideraciones de tecnología dentro del modelo y no a los parámetros con los que se alimentaron a ambos modelos. De los tres modelos, el que mejor arrojó FE de NO_x para autobuses fue el COPERT.

Finalmente, en la Fig. 17d se muestra el FE de PM_{2.5}. Se obtuvo una sobrestimación altamente significativa con ambos modelos en comparación a los FE medidos. El modelo MOVES presentó una diferencia de hasta aproximadamente 510%. En general ninguno de los tres modelos logró arrojar resultados que se parecieran a los medidos en carretera para autobuses. Esto puede deberse, como se dijo anteriormente, a que el IVE reporta valores de PM_{2.5} obtenidos con equipos antiguos (2008 a 2010), cuando no estaban completamente desarrollados los analizadores de PM para pruebas en ruta. Mientras que los modelos MOVES y COPERT carecen de buenas

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

aproximaciones el FE de PM para ciudades a grandes altitudes con vehículos con tecnologías antiguas.

En resumen, para los cuatro factores de emisión (CO₂, CO, NO_x y PM_{2.5}) se evidenció que las estimaciones realizadas por MOVES presentaban cambios drásticos según la tecnología de control de emisiones del vehículo. Para los Euro II, cuya edad superaba los 15 años, los resultados obtenidos de CO₂ se encontraban alrededor de 35% por encima de los reportados para las demás tecnologías y para el CO, NO_x y PM la diferencia entre los datos por tecnología es de mayor al 90%. Esto puede ser debido a que MOVES fue diseñado para el sistema de Estados Unidos y las bases de datos contenidas corresponden a las de este país. En este caso, el análisis se basa específicamente en la edad del vehículo.

Por el contrario, IVE y COPERT están más alineados con la normatividad europea. Con esto se pudo identificar que la diferencia entre los factores de emisión CO₂ y CO entre Euro II, Euro IV y Euro V fueron relativamente bajas: 9% para IVE y 5% en COPERT, que además presenta un aumento para los dos últimos vehículos debido no a la tecnología, sino a la capacidad del motor. En la Tabla 7 y Tabla 8 se presentan el error promedio en cada uno de los modelos para los contaminantes según la tecnología del vehículo.

Tabla 7. Comparación de resultados estimados de vehículos AB de 2771 cc respecto a datos medidos.

Factor de Emisiones	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV
CO ₂	+ 39.26%	+ 7.81%	+ 2x	+ 10.79%	+ 24.25%	- 8.61%
CO	- 83.77%	- 97.84%	+ 9.56%	- 93.37%	- 76.82%	- 87.44%
NO _x	- 56%	- 49.02%	- 50.54%	- 93.36%	+ 0.56%	± 3.05%
PM _{2.5}	+ 3.3x	- 23.41%	+ 6x	- 77.06%	+ 3.5x	+ 2.4x

Tabla 8. Comparación de resultados estimados de vehículos AB de 5123-5193 cc respecto a datos medidos.

Factor de Emisiones	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro IV	Euro V	Euro IV	Euro V	Euro IV	Euro V
CO ₂	- 11.55%	- 20.52%	- 22.38%	- 29.17%	+ 11.16%	+ 1.89%
CO	- 98.08%	<i>n.d.</i>	- 94.31%	<i>n.d.</i>	- 81.84%	<i>n.d.</i>
NO _x	- 71.52%	- 62.09%	- 96.51%	- 96.80%	- 9.11%	+ 26.57%
PM _{2.5}	+ 57.37%	- 62.33%	- 53.69%	- 73.41%	+ 6x	+ 2x

n.d.: no disponible

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

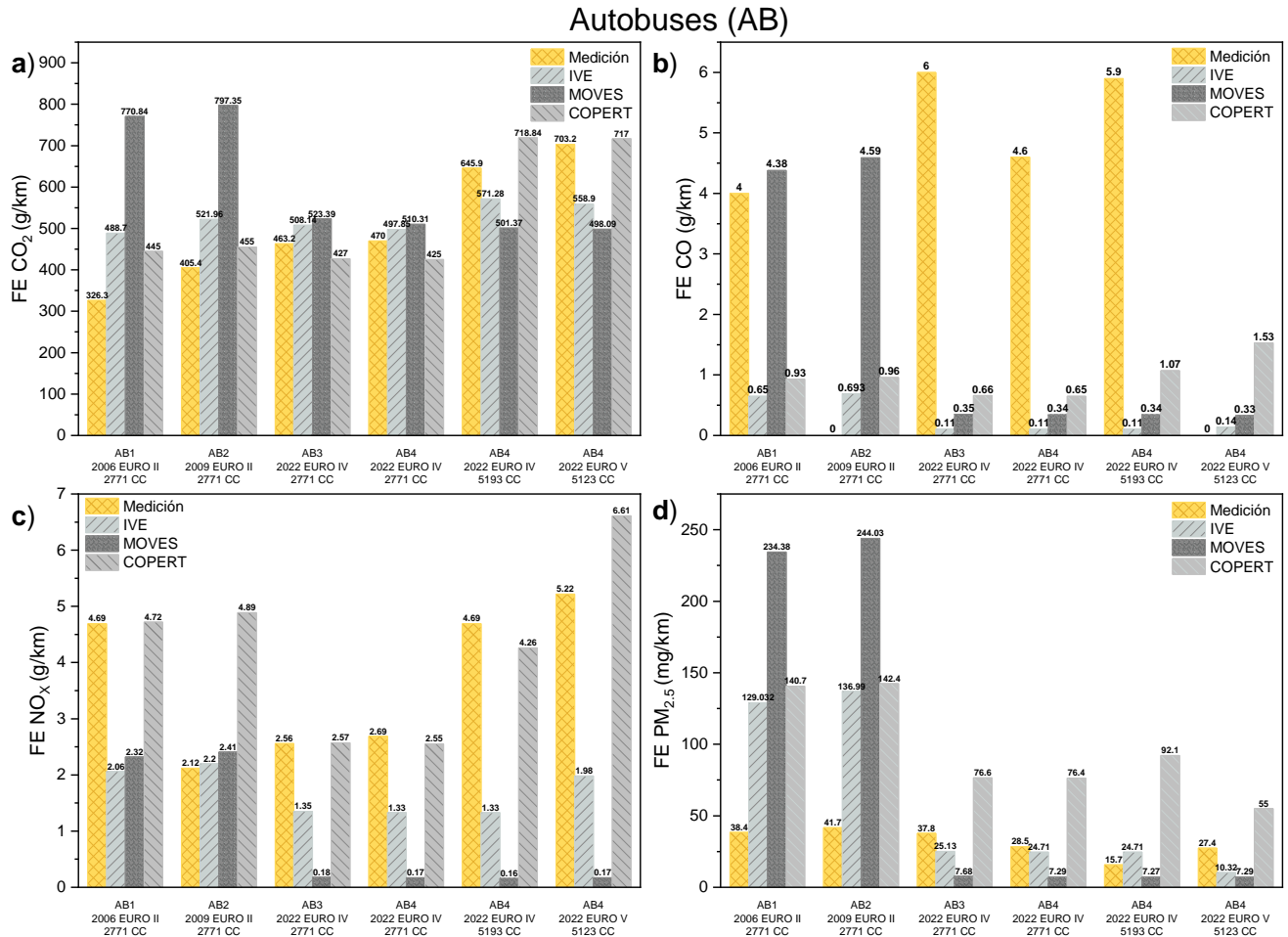


Fig. 17. Factores de emisión de autobuses. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.

5.3 Camiones grandes de dos ejes (≥ 5 ton) - C2G

Los FE para la categoría de camiones C2G, se presentan en la Fig. 18. Los resultados muestran en el caso de las emisiones de CO₂ (Fig. 18a), que tanto el modelo IVE como el COPERT **subestimaron** en promedio 40% este factor de emisión en comparación con los datos medidos, mientras que MOVES los **sobreestimó** entre 28% y 45%. Esto debido a que para la estimación de estos camiones grandes en MOVES se utilizó la categoría “*Single Unit Short haul*” que comprende vehículos entre 8 y 15 toneladas de peso bruto vehicular, mientras que los vehículos medidos tenían un peso aproximado de 10 toneladas. Debido a esto, el consumo de combustible y, por ende, las emisiones de CO₂ fueron sobreestimadas por MOVES. Se evidenció que la potencia de estimación del FE de CO₂ de los tres modelos decreció para los camiones de dos ejes grandes (C2G).

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

En el caso del FE de CO (Fig. 18b), los tres modelos **subestimaron** considerablemente las emisiones de CO para este tipo de vehículos C2G; con una diferencia entre 81 y 95% frente a los valores medidos. Este comportamiento es interesante, ya que difiere de la tendencia de las categorías vehiculares C2P y AB, donde las estimaciones obtenidas en MOVES fueron significativamente más altas para los Euro II, mientras que en este caso el modelo subestimó las emisiones en igual proporción incluso para diferentes tecnologías (Euro IV y Euro V), lo que puede deberse las diferencias con los vehículos de Estados Unidos frente a los medidos en Bogotá.

El FE de NO_x (Fig. 18c) presentó un cambio significativo entre Euro II y Euro IV para vehículos C2G, disminuyendo en un 50% en los tres modelos de tecnología más nueva. Esto significa que los tres modelos esperaban que los camiones C2G antiguos (Euro II) emitieran más NO_x de los que se midieron en ruta, mientras que para vehículos con tecnología Euro IV, los tres modelos esperaban que las emisiones de NO_x fueran menores que las medidas. Llama la atención que el vehículo Euro IV emitiera más NO_x que los vehículos Euro II bajo condiciones de conducción real. Esto podría indicar que el motor del vehículo Euro IV requiere una revisión de su configuración electrónica, o posiblemente un mantenimiento general, porque lo que se esperaba era que éste emitiera menos NO_x.

Finalmente, se puede observar que en el caso del FE de PM_{2.5} (Fig. 18d), los modelos IVE y COPERT **sobrestimaron** las emisiones de PM_{2.5} entre 110% y 560% en los tres vehículos evaluados; caso contrario a los resultados del modelo MOVES, el cual arrojó valores inferiores a los obtenidos en carretera, con una diferencia de 70% en el caso de Euro IV y de 85% para los Euro II. Este resultado comparativo muestra la dificultad en la selección de un modelo único para obtener factores de emisión, y además pone en evidencia las marcadas diferencias en los resultados arrojados entre ellos para una misma categoría vehicular.

Tabla 9. Comparación de resultados estimados de vehículos C2G respecto a datos medidos.

Factor de Emisiones	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV
CO ₂	- 41.83%	- 37.33%	+ 39.07%	+ 17.29%	- 13.42%	- 30.32%
CO	- 84.50%	- 98.38%	- 94.74%	- 95.94%	- 81.38%	- 89.38%
NO _x	+ 24.53%	- 49.25%	- 74.20%	- 89.69%	+ 1.5x	- 43.51%
PM _{2.5}	+ 4x	+ 6.6x	- 81.63%	- 73.68%	+ 2.7x	+ 2.7x

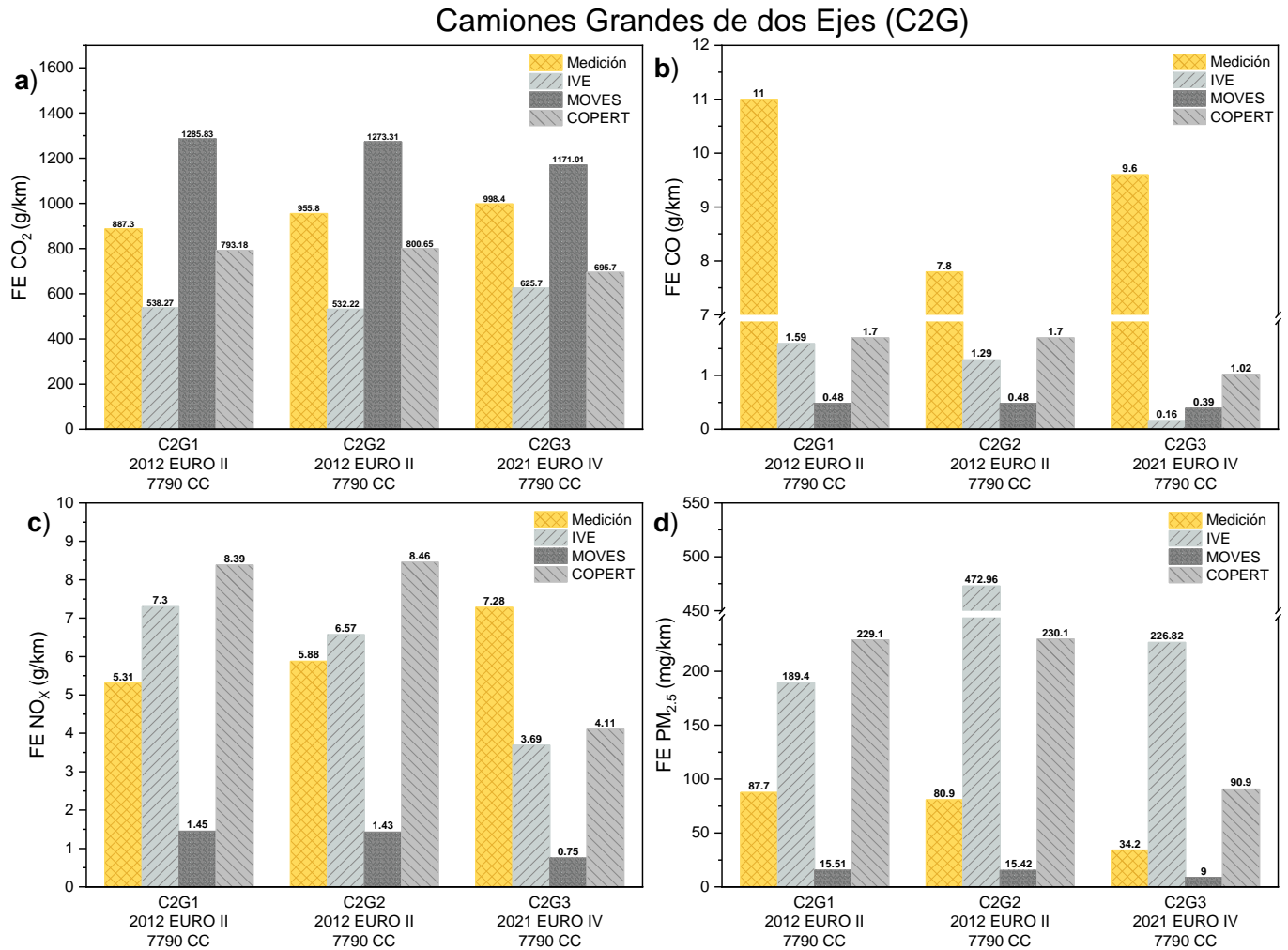


Fig. 18. Factores de emisión para la categoría C2G. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.

5.4 Tractocamiones – TC

Los FE para la categoría de tractocamiones se presentan en la Fig. 19. Los resultados muestran que el FE de CO₂ (Fig. 19a), tienen bajo error en comparación con la categoría C2G, ya que el porcentaje de diferencia promedio del modelo IVE fue de - 22% y para MOVES de +15% para todas las tecnologías de control de emisiones. Llama la atención la diferencia de FE de CO₂ medido para los dos tractocamiones Euro V (modelo 2020). Es difícil establecer aquí cuál de los dos valores sería el esperado en tanto que los modelos MOVES y COPERT predicen valores parecidos y cercanos a los 1400 gCO₂/km, parecidos al camión TC4, pero por su parte el IVE

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

predice valores cercanos a 1050 gCO₂/km, parecido al valor de 1140 gCO₂/km medido para el tractocamión TC3.

Ambos modelos IVE y MOVES subestimaron drásticamente el factor de emisión de CO (Fig. 19b) de tractocamiones, (alrededor de -94%). Por otro lado, los factores de emisiones estimados para el NO_x (Fig. 19c) presentaron una diferencia considerable entre los dos modelos, ya que en esta oportunidad el modelo IVE tuvo una aproximación más adecuada a los valores obtenidos en campo (diferencia +10%). MOVES, por su parte, subestimó en un promedio del -86% el FE de NO_x, lo que permite asegurar que no es la mejor opción para la estimación de estas emisiones contaminantes. El modelo COPERT tuvo un comportamiento similar al IVE en la predicción de NO_x, aunque las diferencias frente a las mediciones fueron mayores que las exhibidas por IVE.

Finalmente, se puede observar que en el caso del FE de PM_{2.5} (Fig. 19d), ninguno de los tres modelos predijo adecuadamente los FE para los dos tractocamiones Euro II, ya que podemos ver como en el caso de los vehículos TC1 y TC2 el modelo IVE sobrestima significativamente, llegando a errores del +3000%, a diferencia del modelo MOVES, el cual realiza una aproximación bastante adecuada para el vehículo TC1 con un error del 37%, pero que luego pasa a subestimar un -96% el vehículo TC2. Esta irregularidad cambia cuando se simulan los vehículos TC3 y TC4, los cuales son Euro V, ya que los errores se mantienen en un rango entre 20% y 40 % para IVE y entre 58% y 64% para MOVES. El COPERT no fue apropiado para modelar FE de PM_{2.5} para tractocamiones ya que difiere significativamente frente a los valores medidos, y arroja resultados peores que IVE y MOVES.

Tabla 10. Comparación de resultados estimados de vehículos TC respecto a datos medidos.

Factor de Emisiones	Modelo IVE		Modelo MOVES		Modelo COPERT	
	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro IV	Euro II	Euro V
CO ₂	- 29.90%	- 15.46%	+ 5.69%	+ 27.37%	± 4.96%	+ 15.04%
CO	- 81.22%	- 95.83%	- 97.24%	- 94.27%	- 82.73%	- 72.84%
NO _x	± 6.65%	+ 14.73%	- 89.95%	- 81.50%	± 7.61%	+ 41.98%
PM _{2.5}	+ 35x	+ 1.3x	- 36.96%	- 28.59%	+ 8.6x	+ 6x

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

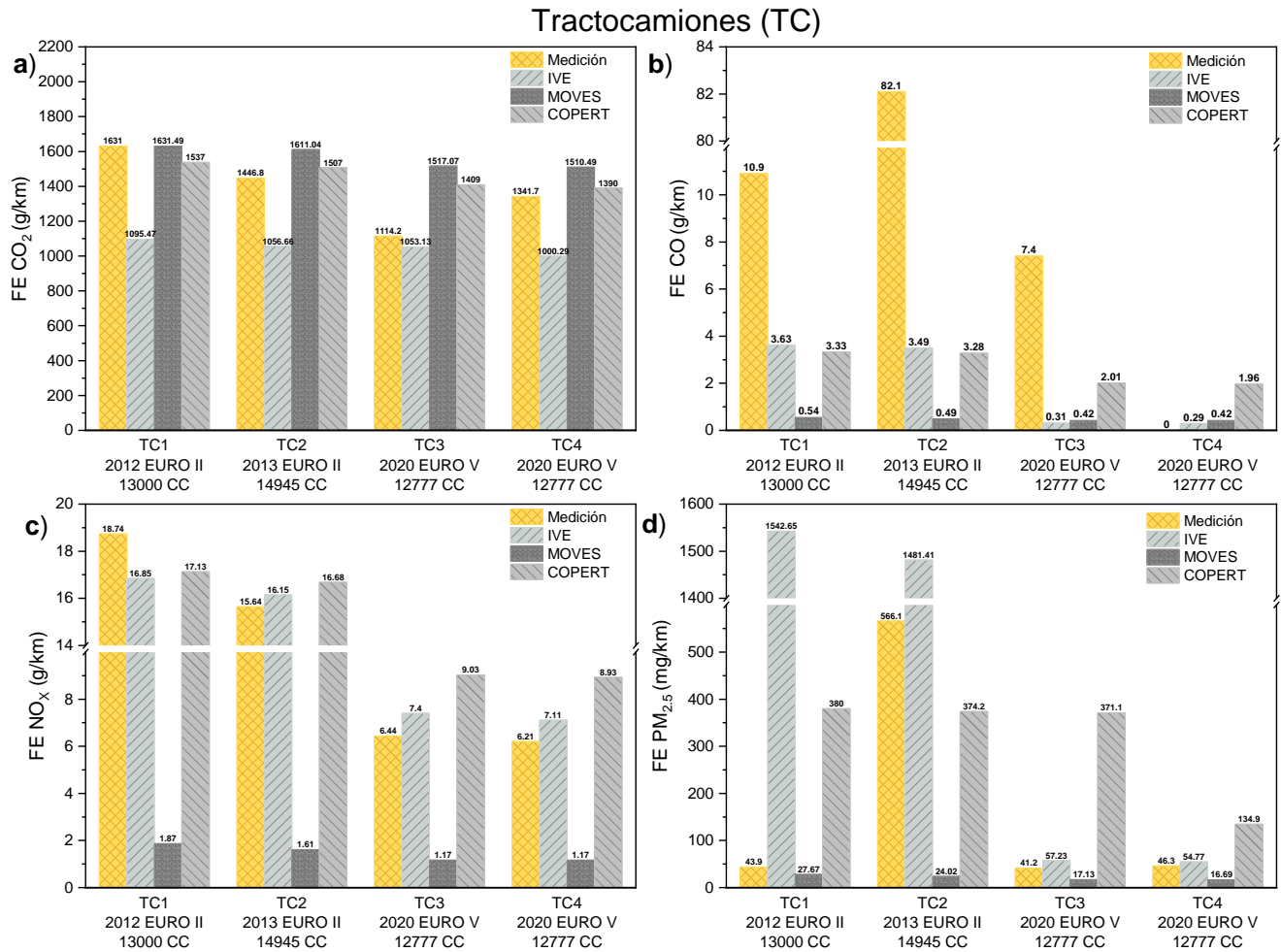


Fig. 19. Factores de emisión de Tractocamiones. a) Emisiones de CO₂, b) Emisiones de CO, c) Emisiones de NO_x y d) Emisiones de PM_{2.5}.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente se pudo identificar que los tres modelos ofrecen aproximaciones con menos diferencias frente a los FE medidos sólo para el CO₂, con desviaciones por debajo del 30% en la mayoría de los casos, lo que sugiere que estos modelos han logrado ajustarse a este gas de efecto invernadero que es uno de los de mayor relevancia por su contribución al calentamiento global.

En términos generales las estimaciones de CO, NO_x y PM_{2.5} arrojaron diferencias significativamente elevadas frente a los FE medidos, por lo que se puede afirmar que ninguno de los tres modelos analizados (IVE, MOVES y COPERT) no resultan confiables para obtener FE que alimentan los inventarios de emisiones. No obstante, se identificó que en la mayoría de los casos, IVE y COPERT presentaban resultados con diferencias más bajas que MOVES, el cual cuenta con

una categorización vehicular y de tecnología de control de emisiones diferente a la utilizada en Colombia, lo que imposibilita introducirle al programa la tecnología exacta para los vehículos existentes en Colombia y en este sentido, el modelo se basa únicamente en la edad de los vehículos y las características definidas en las bases de datos para Estados Unidos, que no se adapta adecuadamente al parque automotor colombiano.

5.5 Inventarios de Emisiones

Los inventarios de emisiones se obtuvieron a partir de la actividad anual reportada por cada tipo de vehículo en el último inventario de emisiones del año 2020 de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. Los factores de emisión medidos y los estimados con los modelos IVE, MOVES y COPERT se muestran en la

Tabla 11. Los resultados muestran que aunque los factores de emisión de los vehículos con mayor cilindraje son más grandes, emiten menos cantidad de contaminantes al año en comparación con vehículos más pequeños, ya que su número en la ciudad de Bogotá es menor.

De forma gráfica se puede visualizar el resultado del inventario de emisiones para cada uno de los contaminantes y categoría de vehículos en la Fig. 20. La categoría vehicular que presentó un inventario de emisiones más alto fue la de los camiones grandes de dos ejes (C2G), ya que su factor de emisión tiende a ser alto y su población triplica la de los tractocamiones.

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Tabla 11. *Inventario de Emisiones comparativo para los vehículos evaluados.*

Clasificación	Características				FE Medido (ton/año)				IVE (ton/año)				MOVES (ton/año)				COPERT (ton/año)			
	Tecnología	Cilindraje (CC)	Actividad (km)	Número de vehículos	CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}	CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}	CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}	CO ₂	CO	NO _x	PM _{2.5}
(C2P) Camiones pequeños de 2 ejes	Euro II	2771	22000	5453	53,870.73	341.90	556.28	11.05	60,647.94	80.61	255.87	15.98	81,990.55	361.09	206.72	14.16	54,782.03	115.74	590.75	17.13
	Euro IV	2771	22000	3574	30,723.89	349.89	182.97	2.36	37,503.51	8.30	98.55	1.84	36,667.53	24.95	12.40	0.54	32,771.89	48.20	192.10	5.96
(AB) Autobuses	Euro II	2771	28864	4788	50,560.77	552.80	470.16	5.53	69,837.28	92.75	294.69	18.38	108,362.91	620.47	326.74	33.06	62,162.80	130.24	663.54	19.56
	Euro IV	2771	28864	3842	34,181.64	388.26	192.59	2.43	36,847.75	8.26	98.10	1.83	37,862.98	25.33	12.77	0.55	31,234.66	47.95	187.56	5.60
	Euro IV	5193	28864	3842	24,310.81	222.07	176.49	0.59	21,502.24	4.26	50.27	0.93	18,870.96	12.64	6.17	0.27	27,024.56	40.34	160.40	3.47
(C2G) Camiones grandes de 2 ejes	Euro II	7790	22000	3355	68,019.61	693.81	413.19	6.22	39,506.37	106.32	511.82	24.44	94,445.06	35.43	106.29	1.14	58,820.30	125.48	621.78	16.95
	Euro IV	7790	22000	2320	50,958.34	489.98	371.37	1.75	31,935.49	7.95	188.46	11.58	59,768.35	19.91	38.28	0.46	35,508.53	52.06	209.77	4.64
(TC) Tractocamiones	Euro II	14000	22000	1111	37,613.79	1,136.55	420.21	7.45	26,301.18	87.01	403.33	36.96	39,626.92	12.56	42.60	0.63	37,197.67	80.81	413.20	9.22
	Euro V	12777	22000	842	22,746.55	137.08	117.19	0.81	19,018.88	5.59	134.46	1.04	28,041.28	7.82	21.67	0.31	25,927.62	36.78	166.34	4.69

DIFERENCIAS ENTRE FACTORES DE EMISIÓN MEDIDOS Y MODELADOS PARA VEHÍCULOS PESADOS EN UNA MEGACIUDAD A GRAN ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR

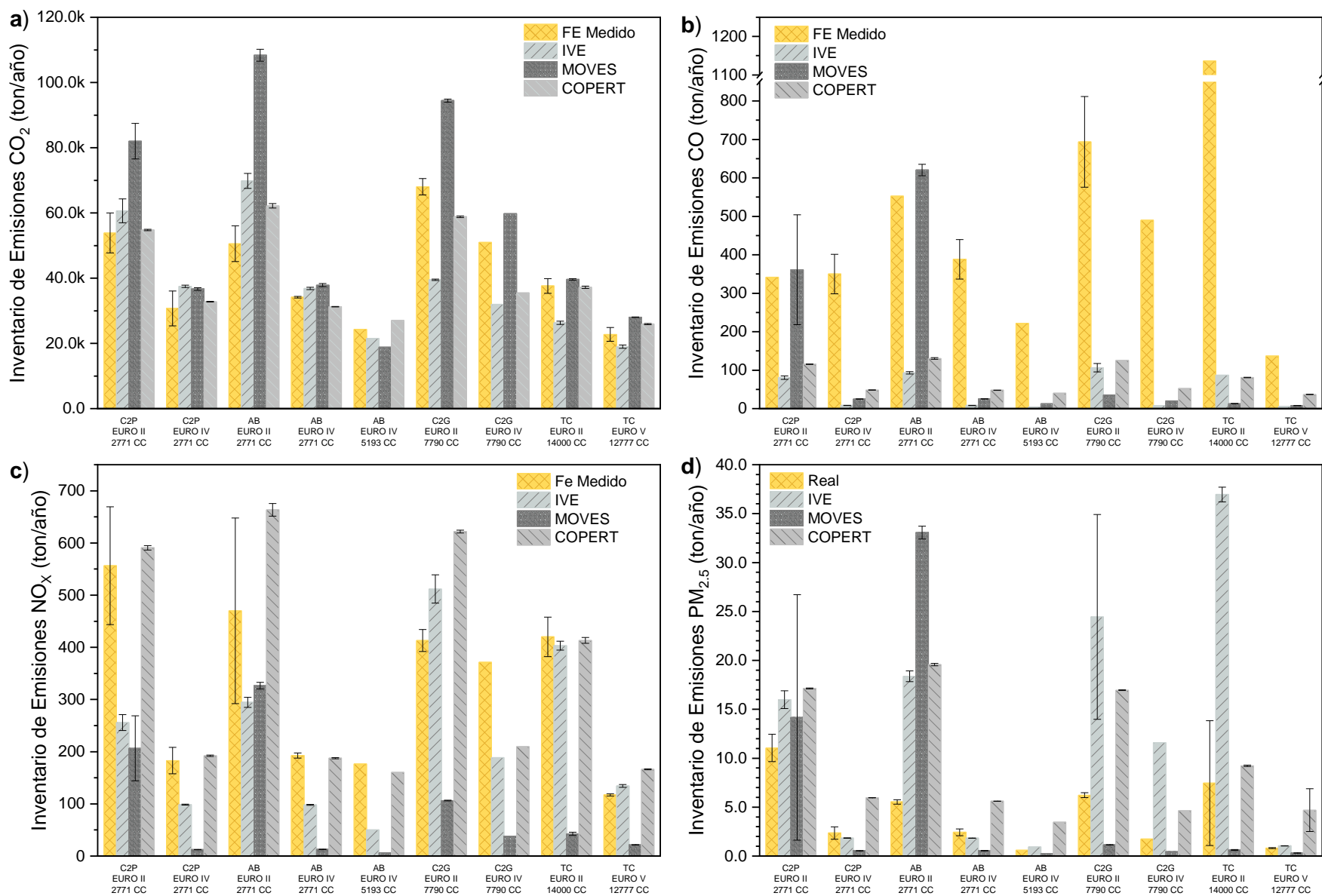


Fig. 20. Inventarios de Emisión tomando como base los F.E. obtenidos.

VI. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que:

- Se logró obtener una comparación de los factores de emisión medidos a bordo frente a los calculados por los modelos IVE, MOVES y COPERT.
- La estimación de los FE con el modelo IVE requirió mayor procesamiento de datos antes de ingresarlos al *software* de simulación, en comparación con el MOVES; sin embargo el ingreso de datos en el modelo IVE fue más amigable con el usuario y logró simular en menor tiempo que MOVES. En cuanto a procesamiento, COPERT fue el *software* con mayor simplicidad y facilidad, tanto para el ingreso de los datos como para la simulación de estos.
- Uno de los datos más importantes para la estimación de las emisiones de estos modelos es la tecnología de control de emisiones del motor. Debido a que MOVES está basado en la EPA, no fue posible definir para este modelo la tecnología exacta de los vehículos utilizados en Colombia que generalmente se encuentran catalogados de acuerdo a la normatividad europea (Euro), por lo que los resultados obtenidos con MOVES presentaron las mayores desviaciones frente a los FE medidos en ruta.
- Los tres modelos arrojaron valores de FE de CO₂ aceptables frente a los FE medidos. Pero la estimación de FE de CO, NO_x y PM_{2.5}, en general, no está bien aproximada a los datos de experimentales, llegando a arrojar diferencias en algunos casos de varios ordenes de magnitud.
- Ninguno de los tres modelos IVE, MOVES y COPERT resultó ser adecuado para definir el inventario de emisiones de una ciudad como Bogotá. Para tal fin se recomienda utilizar los FE medidos, que han sido reportados por la UPME y la Universidad de Antioquia a través del proyecto FECOC+ Determinación de Factores de Emisión de fuentes móviles para Colombia.

VIII. REFERENCIAS

- [1] UPME, “Plan Energético Nacional 2020-2050,” *Plan Energético Nac. 2020-2050*, p. 34, 2020.
- [2] UPME, IREES, TEP, and Corpoema, “Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética: Resumen Ejecutivo BEU Sector Residencial y Terciario,” pp. 1–40, 2019, [Online]. Available:
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf
- [3] E. R. Onainor, “Plan de acción indicativo PROURE,” vol. 1, pp. 105–112, 2019.
- [4] UPME, “Balance energético colombiano,” 2021.
<https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx> (accessed Oct. 03, 2022).
- [5] World Health Organization, “IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths,” 2013. <https://doi.org/10.1002/em>.
- [6] Air Quality Life Index, “Most of the World Breathes Unsafe Air, Taking More Than 2 Years Off Global Life Expectancy -,” 2022. <https://aqli.epic.uchicago.edu/news/most-of-the-world-breathes-unsafe-air-taking-more-than-2-years-off-global-life-expectancy/> (accessed Nov. 18, 2022).
- [7] W. H. Organization, “Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire,” 2021. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> (accessed Nov. 16, 2022).
- [8] Z. Qi *et al.*, “Chemical identity and cardiovascular toxicity of hydrophobic organic components in PM_{2.5},” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 201, no. March, p. 110827, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110827>.
- [9] X. Tan, L. Han, X. Zhang, W. Zhou, W. Li, and Y. Qian, “A review of current air quality indexes and improvements under the multi-contaminant air pollution exposure,” *J. Environ. Manage.*, vol. 279, no. July 2020, p. 111681, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111681>.

- [10] W. H. Organization, “Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS,” 2021. <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data> (accessed Nov. 16, 2022).
- [11] IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, and CANCELLEERÍA, “Tercer Informe Bienal de Actualización de Cambio Climático de Colombia,” 2021.
- [12] United States Environmental Protection Agency, “Sources of Greenhouse Gas Emissions | US EPA,” 2022. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> (accessed Nov. 16, 2022).
- [13] L. A. M. and C. W. T. R.K. Pachauri, “Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers,” *Ippc*, p. 151, 2014.
- [14] Grupo Manejo Eficiente de la Energía - GIMEL, “Informe final de convenio FECOC+ Fase 2,” 2020.
- [15] US EPA, “MOVES2014 Technical Guidance: Using MOVES to Prepare Emission Inventories for State Implementation Plans and Transportation Conformity,” 2015.
- [16] G. Yan *et al.*, “Field measurements of vehicle pollutant emissions in road tunnels at different altitudes,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 118, no. June 2020, p. 104187, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104187>.
- [17] Y. Wang *et al.*, “Experimental study of CO₂ and pollutant emission at various altitudes: Inconsistent results and reason analysis,” *Fuel*, vol. 307, no. January 2021, p. 121801, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121801>.
- [18] T. W. Kirchstetter, R. A. Harley, N. M. Kreisberg, M. R. Stolzenburg, and S. V. Hering, “On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles,” *Atmos. Environ.*, vol. 33, no. 18, pp. 2955–2968, 1999, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00089-8).
- [19] M. Giraldo and J. I. Huertas, “Real emissions, driving patterns and fuel consumption of in-use diesel buses operating at high altitude,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 77, no. October, pp. 21–36, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.004>.
- [20] R. Smit, L. Ntziachristos, and P. Boulter, “Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis,” *Atmos. Environ.*, vol. 44, no. 25, pp. 2943–2953, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.022>.
- [21] ISSRC, “Manual del Usuario del Modelo IVE,” p. 55, 2008.

- [22] J. L. Jiménez Palacios, “Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing,” 1999.
- [23] J. I. Huertas, O. Serrano-Guevara, J. Díaz-Ramírez, D. Prato, and L. Tabares, “Real vehicle fuel consumption in logistic corridors,” *Appl. Energy*, vol. 314, no. September 2021, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118921>.
- [24] M. Patiño-Aroca, A. Parra, and R. Borge, “On-road vehicle emission inventory and its spatial and temporal distribution in the city of Guayaquil, Ecuador,” *Sci. Total Environ.*, vol. 848, no. July, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157664>.
- [25] H. GUO, Q. yu ZHANG, Y. SHI, and D. hui WANG, “Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements,” *J. Environ. Sci.*, vol. 19, no. 7, pp. 818–826, 2007, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60137-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60137-5).
- [26] M. Zavala *et al.*, “Emission factors of black carbon and co-pollutants from diesel vehicles in Mexico City,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 17, no. 24, pp. 15293–15305, 2017, <https://doi.org/10.5194/acp-17-15293-2017>.
- [27] R. Smit, M. Awadallah, S. Bagheri, and N. C. Surawski, “Real-world emission factors for SUVs using on-board emission testing and geo-computation,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 107, no. May, p. 103286, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103286>.
- [28] J. M. López, N. Flores, J. Lumbreras, and R. Villimar, “Comparison of the emission factors measured in real world driving with those of COPERT 4,” *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 116, pp. 655–664, 2011, <https://doi.org/10.2495/UT110551>.
- [29] Grupo Manejo Eficiente de la Energía - GIMEL, “Informe final de convenio FECOC+ Fase 1,” 2020.
- [30] IDEAM, “Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos.” <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/> (accessed Nov. 09, 2022).
- [31] L. Ntziachristos and Z. Samaras, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,” 2021.
- [32] Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, “Inventario de Emisiones de Bogotá, contaminantes atmosféricos,” Bogotá, 2020.