



**Consolidación de la base de datos de factores de emisión y consumo de combustible del sector de transporte terrestre carretero en Colombia: Análisis del efecto de la altitud y de la tecnología**

Edgard David Pereira Rocha

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

John Ramiro Agudelo Santamaría, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín

2024

<b>Cita</b>	Pereira Edgard, 2024 [1]
<b>Referencia</b>	[1] Pereira Edgard, “Consolidación de la base de datos de factores de emisión y consumo de combustible del sector de transporte terrestre carretero en Colombia: Análisis del efecto de la altitud y de la tecnología”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



Grupo de Investigación de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL)  
Sede de Investigación Universitaria (SIU).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda.

**Decano/Director** Julio César Saldarriaga Molina.

**Jefe departamento:** Pedro León Simancas.

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.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi madre, Deyra Rocha, y a mi padre, Edgardo Pereira, quienes me criaron con amor y siempre confiaron en mí. Su apoyo incondicional y sus enseñanzas me han formado en la persona que soy hoy. A mi hermano Juandi, a quien quiero mucho. De manera muy especial, dedico este título a mi abuelito paterno, quien se encuentra grave de salud. Él fue una de las personas que me inculcó los buenos valores de la vida. Abuelito, espero que te mejores; quiero verte orgulloso de este logro.

También quiero dedicar este trabajo a mis amistades más cercanas. A Vanessa, por apoyarme en los momentos en los que no tenía motivación para seguir y acompañarme en llamadas de meet desde la distancia. A María, por ser una de las personas más importantes que me dejó la universidad y por mostrarme todo su apoyo durante uno de los meses más difíciles de mi vida. A mis amigos Tulio, Juan Camilo y Edwin, por ser esos compañeros y amigos que me deja este lindo camino.

Finalmente, a las demás personas que se me pasan, quiero agradecerles por hacer parte de este proceso. Su apoyo y compañía han sido fundamentales para alcanzar este logro.

## **Agradecimientos**

Quisiera expresar mi más profunda gratitud al profesor John Ramiro por la invaluable oportunidad de unirme al grupo GIMEL y trabajar bajo su guía. Su apoyo y orientación han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis. También extendiendo mi agradecimiento al grupo GIMEL por poner a disposición los datos de los proyectos, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

Deseo agradecer a la Universidad de Antioquia por brindar el entorno académico y los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. La infraestructura y el apoyo institucional han sido clave para el éxito de esta investigación.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que de alguna manera formaron parte de este proceso, brindando su apoyo, motivación y ayuda en los momentos necesarios. Este logro es el resultado de un esfuerzo colectivo, y cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este camino.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN . . . . .	15
ABSTRACT. . . . .	16
I. INTRODUCCIÓN . . . . .	17
II. OBJETIVOS . . . . .	23
A. Objetivo general . . . . .	23
B. Objetivos específicos. . . . .	23
III. ANTECEDENTES . . . . .	24
IV. MARCO TEÓRICO. . . . .	27
A. Factor de emisión (FE) . . . . .	27
B. Inventario de emisiones. . . . .	30
C. Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) . . . . .	32
D. Potencial de calentamiento global . . . . .	32
E. Monóxido de Carbono (CO) . . . . .	33
F. Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ). . . . .	33
G. Hidrocarburos sin quemar (HC) . . . . .	34
H. Material Particulado (PM) . . . . .	35
1) PM2.5: . . . . .	36
2) PN: . . . . .	36
I. Emisiones contaminantes gaseosas reguladas . . . . .	38
J. Normativa de emisiones. . . . .	38
K. Tecnologías de control de emisiones . . . . .	40
1) Turbocargador: . . . . .	40

2) Inyección electrónica de combustible: . . . . .	42
3) Convertidor catalítico: . . . . .	42
4) Catalizadores acumuladores de óxidos de nitrógeno: . . . . .	44
5) Recirculación de gases de escape (EGR): . . . . .	45
6) Filtro de partículas diésel (DPF): . . . . .	48
7) Reducción catalítica selectiva (SCR):. . . . .	48
V. METODOLOGÍA . . . . .	50
A. Etapa 1: Revisión de pruebas . . . . .	51
B. Etapa 2: Unificación de pruebas . . . . .	54
C. Etapa 3: Filtrado y sincronización de señales . . . . .	56
D. Etapa 4: Cálculo de factores de emisión . . . . .	61
VI. Resultados. . . . .	63
A. Base de datos única de factores de GEI, gases y partículas, y consumo de combustible. . . . .	63
B. Efecto de la altitud sobre los factores de emisión y el consumo de combustible	73
1) Tractocamiones - Categoría TC.. . . . .	76
2) Camiones de dos ejes pequeños - Categoría C2P.. . . . .	81
3) Camiones de dos ejes grandes - Categoría C2G. . . . .	86
4) Buses urbanos - Categoría AB . . . . .	91
5) Vehículos livianos . . . . .	96
6) Motocicletas . . . . .	103
7) Conclusiones . . . . .	110
C. Efecto de la tecnología sobre los factores de emisión y el consumo de combustible. . . . .	113
1) Tractocamiones - Categoría TC . . . . .	115

2) Camiones de dos ejes pequeños - Categoría C2P . . . . .	118
3) Camiones de dos ejes grandes - Categoría C2G . . . . .	119
4) Buses urbanos - Categoría AB . . . . .	122
5) Vehículos livianos . . . . .	123
6) Motocicletas . . . . .	126
7) Conclusiones . . . . .	129
REFERENCIAS . . . . .	131
ANEXOS . . . . .	137
Anexo A. Base de datos interactiva . . . . .	137
Anexo B. Análisis estadístico. . . . .	141

## LISTA DE TABLAS

1	Potencial de Calentamiento Global (GWP) de diferentes GEI en un horizonte temporal de 100 años . . . . .	33
2	Eficiencia volumétrica de motores de aspiración natural y motores sobrealimentados . . . . .	41
3	Comparación entre pruebas mediante integral y correlación. . . . .	53
4	Errores por remuestreo. . . . .	56
5	Número de vehículos medidos. . . . .	63
6	Características tractocamiones grupo 1. . . . .	76
7	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de tractocamiones (TC) grupo 1. . . . .	77
8	Características tractocamiones grupo 2. . . . .	79
9	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de tractocamiones (TC) grupo 2. . . . .	79
10	Características camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 1. . . . .	82
11	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de camiones de dos ejes pequeños ( <i>C2P</i> ) grupo 1. . . . .	82
12	Características camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 2. . . . .	84
13	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de camiones de dos ejes pequeños ( <i>C2P</i> ) grupo 2. . . . .	85
14	Características camiones de dos ejes grandes (C2G) grupo 1. . . . .	86
15	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de camiones de dos ejes grandes ( <i>C2G</i> ) grupo 1. . . . .	87
16	Características camiones de dos ejes grandes (C2G) grupo 2. . . . .	89
17	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de camiones de dos ejes grandes ( <i>C2G</i> ) grupo 2. . . . .	89

18	Características buses urbanos (AB) grupo 1. . . . .	91
19	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de buses urbanos (AB) grupo 1. . . . .	92
20	Características buses urbanos (AB) grupo 2. . . . .	94
21	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de buses urbanos (AB) grupo 2. . . . .	94
22	Características vehículos livianos cilindrada 1600 cc. . . . .	96
23	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de vehículo liviano 1600 cc. . . . .	96
24	Características vehículos livianos cilindrada 3500 cc. . . . .	100
25	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de vehículo liviano 3500 cc. . . . .	100
26	Características motocicleta cilindrada 149 cc. . . . .	103
27	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de motocicleta 149 cc. . . . .	103
28	Características motocicleta cilindrada 180 cc. . . . .	107
29	Impacto de la altitud sobre los FE medidos y rendimiento de combustible de motocicleta 180 cc. . . . .	107
30	IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA SOBRE LOS FE Y EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE VEHÍCULOS LIVIANOS. . . . .	124
31	Límites máximos permisibles de emisión para fuentes móviles de carretera clasificadas como vehículos livianos y medianos con motor de encendido por chispa de funcionamiento con gasolina en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos (FTP-75). . . . .	125
32	IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA SOBRE LOS FE Y EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE MOTOCICLETAS. . . . .	127

33	Límites máximos permisibles de emisión para motocicletas (dos ruedas) con motor de encendido por chispa en prueba dinámica, evaluados mediante ciclos de la Unión Europea (ECE R-40 y ECE R-40 + EUDC, según corresponda) - Euro 3. . . . .	127
34	Parámetros. . . . .	139

## LISTA DE FIGURAS

1	Reporte IQAir 2023 . . . . .	18
2	Ciclos de conducción para cada categoría vehicular en Colombia. . . . .	25
3	$V [km/h]$ vs $t [s]$ . . . . .	28
4	$PN [\#/cm^3 \times 10^{12}]$ vs $t [s]$ . . . . .	28
5	$CO_2 [\%]$ vs $t [s]$ . . . . .	28
6	Comparación enfoque Bottom-Up y Top-Down . . . . .	31
7	Comparación tamaño de las partículas de PM . . . . .	37
8	Norma Europea para vehículos livianos. . . . .	39
9	Sistema de inyección electrónica . . . . .	43
10	Almacenamiento y regeneración de $NO_x$ . . . . .	45
11	Sistema EGR . . . . .	47
12	Influencia de la tasa de cambio EGR en emisiones y consumo de combustible . . . . .	47
13	Sistema SCR . . . . .	49
14	Metodología. . . . .	50
15	Estructura de almacenamiento y organización datos medidos FECOC+ Fase 2. . . . .	51
16	Perfil Velocidad vs Tiempo ejemplo. . . . .	53
17	Prueba rechazada. . . . .	54
18	$CO$ para una prueba remuestreada. . . . .	55
19	Filtrado flujo de aire. . . . .	57
20	Mediciones sin sincronizar. . . . .	59
21	Mediciones sincronizadas. . . . .	60
22	Puntos críticos localizados en una prueba. . . . .	61
23	Diagrama de calor de la representatividad de las muestras por modelo y cilindrada. . . . .	64

24	<i>Diagrama de calor de la representatividad de las muestras por modelo y capacidad.</i> . . . . .	65
25	Consumo de combustible (L/100km) para todas las categorías. . . . .	66
26	Consumo de combustible (L/100km-Ton) para todas las categorías. . . . .	67
27	FE $CO_2$ para todas las categorías. . . . .	67
28	FE $CO$ para todas las categorías. . . . .	68
29	FE $NO$ para todas las categorías. . . . .	69
30	FE $NO_2$ para todas las categorías. . . . .	69
31	FE $NO_x$ para todas las categorías. . . . .	70
32	FE $HC$ para todas las categorías. . . . .	70
33	FE $PN$ para todas las categorías. . . . .	71
34	FE $PM$ para todas las categorías. . . . .	72
35	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en tractocamiones (TC) grupo 1.</i> . . . . .	77
36	<i>Impacto de la altitud sobre los FE <math>NO_2</math>, <math>NO_x</math> y <math>PN</math> tractocamiones (TC) grupo 1.</i> . . . . .	78
37	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en tractocamiones (TC) grupo 1.</i> . . . . .	80
38	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 1.</i> . . . . .	83
39	<i>Impacto de la altitud sobre FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 2.</i> . . . . .	85
40	<i>Impacto de la altitud sobre los FE en camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 2.</i> . . . . .	86
41	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes grandes (C2G) grupo 1.</i> . . . . .	88
42	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes grandes (C2G) grupo 2.</i> . . . . .	90

43	<i>Impacto de la altitud sobre FE CO<sub>2</sub> y rendimiento de combustible en buses urbanos (AB) grupo 1.</i> . . . . .	92
44	<i>Impacto de la altitud sobre los FE en buses urbanos (AB) grupo 1.</i> . . . . .	93
45	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en buses urbanos (AB) grupo 2.</i> . . . . .	95
46	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 1600 cc.</i> . . . . .	97
47	<i>Impacto de la altitud sobre FE PN vehículo liviano 1600 cc.</i> . . . . .	98
48	<i>Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 1598 cc.</i> . . . . .	98
49	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 3500 cc.</i> . . . . .	101
50	<i>Impacto de la altitud sobre FE PM vehículo liviano 3500 cc.</i> . . . . .	102
51	<i>Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 3500 cc.</i> . . . . .	102
52	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 149 cc.</i> . . . . .	104
53	<i>Impacto de la altitud sobre los FE PM motocicleta 149 cc.</i> . . . . .	105
54	<i>Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 149 cc.</i> . . . . .	105
55	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 180 cc.</i> . . . . .	108
56	<i>Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 180 cc.</i> . . . . .	109
57	<i>Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 180 cc.</i> . . . . .	109
58	<i>Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos TC.</i> . . . . .	116

59	<i>Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo Euro V.</i> . . . . .	117
60	<i>Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo Euro II.</i> . . . . .	118
61	<i>Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos C2P.</i> . . . . .	118
62	<i>Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos C2G.</i> . . . . .	119
63	<i>Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo C2G Euro V.</i> . . . . .	120
64	<i>Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo C2G Euro IV.</i> . . . . .	121
65	<i>Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo C2G Euro II.</i> . . . . .	121
66	<i>Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos AB.</i> . . . . .	123
67	<i>Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos livianos.</i> . . . . .	126
68	<i>Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de motocicletas.</i> . . . . .	128
69	<i>Sección de información de vehículos medidos.</i> . . . . .	137
70	<i>Sección de FE de vehículos medidos.</i> . . . . .	138
71	<i>Nivel inferior para la categoría TC.</i> . . . . .	139
72	<i>Nivel inferior solo para la categoría TC.</i> . . . . .	140
73	<i>Comparativo aplicación.</i> . . . . .	140
74	<i>Verificación gráfica normalidad.</i> . . . . .	141
75	<i>Verificación gráfica homocedasticidad.</i> . . . . .	142
76	<i>Emisiones de PM vehículos livianos 1600 cc.</i> . . . . .	143

## ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

- $CH_4$  Metano. 20, 21
- $CO_2$  Dióxido de Carbono. 20, 21, 27, 29, 32, 50
- $NO_2$  Dióxido de Nitrógeno. 21, 29, 53
- $NO_x$  Óxidos de Nitrógeno. 27, 49, 50
- $N_2O$  Óxido Nitroso. 20
  
- **BUR** por sus siglas en inglés Biennial Update Reports. 19, 20
- **CO** Monóxido de Carbono. 27, 29, 50
- **COP** Conferencia de las Partes. 19
- **DNP** Departamento de Planeación. 17, 18
- **FE** Factor de Emisión. 20, 21, 29, 50, 54, 56, 63
- **FECOC** Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos. 21, 27
- **GEI** Gases de Efecto Invernadero. 19–21, 23, 32
- **GWP** por sus siglas en inglés Global Warning Potential. 32
- **HC** Hidrocarburos sin quemar. 27, 29, 50
- **IARC** por sus siglas en inglés International Agency for Research on Cancer. 17
- **INGEI** Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. 20
- **IPCC** por sus siglas en inglés Intergovernmental Panel on Climate Change. 19, 20
- **NO** Óxido de Nitrógeno. 29, 49
- **ODS** Objetivos de Desarrollo Sostenible. 19
- **OMS** Organización Mundial de la salud. 17
- **PIB** Producto Interno Bruto. 18
- **PM** Masa de partículas. 27, 50
- **PN** Número de partículas. 27, 50
- **ppm** Partículas por millón. 19
- **UNFCCC** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 19

## RESUMEN

Este trabajo de grado analiza el efecto de la altitud y la tecnología vehicular en los factores de emisión y el consumo de combustible en el transporte terrestre carretero en Colombia. Se consolidó una base de datos con datos obtenidos en condiciones reales y pruebas experimentales. En la primera parte, se evaluó el impacto de la altitud en vehículos livianos, camiones de dos ejes, tractocamiones y motocicletas. Los resultados mostraron que las emisiones de  $CO_2$ ,  $NO_x$  y  $PM$  tienden a disminuir con la altitud, mientras que el rendimiento de combustible varía según la categoría del vehículo y la tecnología. En la segunda parte, se analizó el impacto de diferentes tecnologías de control de emisiones y sistemas de suministro de combustible. Se compararon tecnologías como la inyección directa de gasolina (GDI), la inyección multipunto (MPI), la inyección electrónica y los carburadores en motocicletas, así como tecnologías de control de emisiones en vehículos de transporte de carga y pasajeros. Las tecnologías avanzadas, como GDI y SCR, mostraron mejores rendimientos de combustible y reducciones significativas en las emisiones de  $NO_x$  y  $PM$  en comparación con tecnologías más antiguas. Se concluye que la adopción de tecnologías avanzadas y la optimización de los sistemas de combustible son esenciales para mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones en el transporte terrestre en Colombia, considerando las condiciones específicas de operación y altitud. Este trabajo ofrece una base de datos consolidada y un análisis detallado para futuras investigaciones y políticas públicas.

***Palabras clave*** — Altitud, Emisiones Vehiculares, Consumo de Combustible, Factor de Emisión (FE), Tecnología.

## ABSTRACT

This thesis analyzes the effect of altitude and vehicular technology on emission factors and fuel consumption in road transportation in Colombia. A database was consolidated with data obtained under real conditions and experimental tests. In the first part, the impact of altitude on light vehicles, two-axle trucks, tractor-trailers, and motorcycles was evaluated. The results showed that emissions of  $CO_2$ ,  $NO_x$ , and  $PM$  tend to decrease with altitude, while fuel consumption varies depending on the vehicle category and technology. In the second part, the impact of different emission control technologies and fuel supply systems was analyzed. Technologies such as gasoline direct injection (GDI), multipoint injection (MPI), electronic injection, and carburetors in motorcycles were compared, as well as emission control technologies in cargo and passenger transport vehicles. Advanced technologies like GDI and SCR showed better fuel efficiency and significant reductions in  $NO_x$  and  $PM$  emissions compared to older technologies. It is concluded that the adoption of advanced technologies and the optimization of fuel systems are essential to improve fuel efficiency and reduce emissions in road transportation in Colombia, considering specific operational and altitude conditions. This work offers a consolidated database and detailed analysis for future research and public policies.

***Keywords*** — Altitude, Vehicular Emissions, Fuel Consumption, Emission Factor (EF), Technology

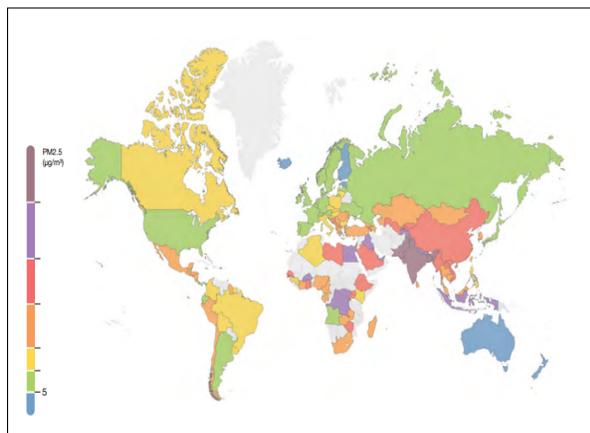
## I. INTRODUCCIÓN

La mitigación de la contaminación representa uno de los mayores desafíos para los centros urbanos en su búsqueda por garantizar una calidad del aire que cumpla con los estándares que conlleven a un desarrollo social, económico, energético y ambiental. La exposición prolongada a emisiones contaminantes, especialmente de partículas suspendidas, por su tamaño y composición, generan una seria amenaza para la salud pública, asociándose con una serie de enfermedades que van desde problemas respiratorios hasta afecciones cardíacas graves y muertes prematuras. En 2012, la OMS, apoyada en un estudio realizado por la IARC señaló a las emisiones (tanto gaseosas como de material particulado) de vehículos diésel como “cancerígenas para humanos” y las de vehículos a gasolina como “posiblemente cancerígenas para humanos” [1].

Según el DNP de Colombia, en 2016, el 87 % de la población mundial vive en lugares donde los niveles de la calidad del aire son perjudiciales para su salud [2]. De igual manera, en 2023, la compañía Suiza IQAir analizó la calidad del aire de 127 países del mundo, en los cuales solo 7 países cumplieron con los nuevos límites de seguridad que fueron establecidos por la OMS para las partículas en suspensión de menos de 2,5 micras de diámetro ( $PM_{2,5}$ ), como se observa en la **Fig. 1a** [3].

De la misma manera, IQAir reportó a Colombia en el puesto 75 dentro del ranking mundial de concentración media ponderada de  $PM_{2,5}$ . Además, reportaron que la capital colombiana, Bogotá, se encuentra en el puesto 67 del ranking para ciudades capitales mundiales y en el puesto 9 del ranking de países latinoamericanos. En contraste con los reportes de años anteriores, la concentración promedio anual de  $PM_{2,5}$  en Colombia cayó un 10 % en 2023, hasta  $14,1\mu g/m^3$ , lo que significa que se encuentra en el nivel provisional 3, según la clasificación de la OMS que se observa en la **Fig. 1b**. Sin embargo, a pesar de esa reducción, ninguna ciudad colombiana cumplió con las límites sugeridos por la OMS [3, 4].

En el 2015, el DNP afirmó que el 76 % de los 78 municipios con sistema de monitoreo de la calidad del aire de Colombia, alcanzaron niveles perjudiciales para la salud, aunque, solo el 26 % incumplió la meta nacional para el 2030, la cual se estableció como estrategia para reducir el riesgo de mortalidad en un 6 % aproximadamente, el cual fue de 8 mil muertes en 2015 relacionadas con la baja calidad del aire: 7 mil de ellas enfermedades cardiovasculares, cerca de 700 cáncer de pulmón y 22 enfermedades en niños. Esto equivale a un tercio de las muertes provocadas por tabaquismo en Colombia, y a un 9 % de las muertes no violentas en el país. En términos económicos para ese mismo año, las enfermedades relacionadas con la baja calidad del aire le costaron a Colombia entre 1,9 y 3,9 billones de pesos, lo que equivale a un valor entre 0,2 % y 0,5 % del PIB [2, 4].



(a) Concentración media ponderada de PM<sub>2,5</sub> mundial [5]

**2023 World Air Quality Report visualization framework**

Annual PM<sub>2.5</sub> breakpoints based on WHO annual PM<sub>2.5</sub> guideline and interim targets

	PM <sub>2.5</sub>	Color code	WHO levels
Meets WHO PM <sub>2.5</sub> guideline	0-5 (µg/m <sup>3</sup> )	Blue	Air quality guideline
Exceeds WHO PM <sub>2.5</sub> guideline by 1 to 2 times	5.1-10 (µg/m <sup>3</sup> )	Green	Interim target 4
Exceeds WHO PM <sub>2.5</sub> guideline by 2 to 3 times	10.1-15 (µg/m <sup>3</sup> )	Yellow	Interim target 3
Exceeds WHO PM <sub>2.5</sub> guideline by 3 to 5 times	15.1-25 (µg/m <sup>3</sup> )	Orange	Interim target 2
Exceeds WHO PM <sub>2.5</sub> guideline by 5 to 7 times	25.1-35 (µg/m <sup>3</sup> )	Red	Interim target 1
Exceeds WHO PM <sub>2.5</sub> guideline by 7 to 10 times	35.1-50 (µg/m <sup>3</sup> )	Purple	Exceeds target levels
Exceeds WHO PM <sub>2.5</sub> guideline by over 10 times	>50 (µg/m <sup>3</sup> )	Maroon	Exceeds target levels

(b) Niveles según la OMS [5]

Fig. 1. Reporte IQAir 2023

Por otro lado, en materia de políticas públicas, en Colombia se han implementado gradualmente algunas para mejorar la calidad del aire desde 1982, año en el que se emitió el decreto presidencial 02 como la primera norma que regula las emisiones contaminantes [2]. En 2008, la ley 1205 instauró el mejoramiento del combustible mediante una reducción gradual del contenido de azufre en el diésel de 3500 a 50 ppm [3]. Ese mismo año, el gobierno nacional emitió la Resolución 910<sup>1</sup>, en la que se limitaron las emisiones contaminantes de

<sup>1</sup>Resolución 910 de 2008

---

vehículos livianos y pesados, así como de motocicletas en uso.

En 2013, el Ministerio de Medio Ambiente y el de Minas y Energía emitieron la Resolución 1111<sup>2</sup>, en el que se estableció que todos los vehículos diésel nuevos que entraran al país a partir del 1° de enero de 2015 tendrían que cumplir con la norma de emisiones europea Euro 4/IV (vehículos livianos/pesados), la cual fue actualizada en el 2019, por la Ley 1972<sup>3</sup>, que señala que, a partir del 1 de enero de 2023, los vehículos diésel nuevos deben cumplir con la norma de emisiones europea Euro 6/VI, mientras que las motocicletas deben cumplir con tecnología Euro 3.

El CONPES 3943 de 2019<sup>4</sup>, estableció que, desde 2021 se distribuiría gasolina de 50 ppm en contenido de azufre, lo que permite la adopción de estándares de emisión Euro 4, que es una de las bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 para mejorar la calidad del aire y prevenir los impactos en la salud pública. Cabe destacar que, en el CONPES 3943, se dictaron estrategias para la implementación de los ODS en Colombia, los cuales fueron establecidos por la Agenda 30 para el Desarrollo Sostenible producto de las 26 COP que se han realizado hasta la fecha [6].

Ahora bien, en el contexto de los compromisos adquiridos por Colombia como suscriptor de la UNFCCC, por el cual se deben remitir a la COP los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas de todos los GEI no controlados por el protocolo de Montreal, mediante los BUR, empleando para su desarrollo la metodología planteada por el IPCC [7]. De acuerdo con el IPCC, las emisiones generadas en el sector energía se pueden clasificar en emisiones por combustión y emisiones fugitivas. La primera se refiere a las emisiones derivadas de la combustión de combustibles en actividades productivas, mientras que la segunda abarca todas las etapas de la cadena de suministro de combustibles [8].

---

<sup>2</sup>Resolución 1111 de 2013

<sup>3</sup>Ley 1972 de 2019

<sup>4</sup>CONPES 3943

---

En las directrices del IPCC de 2006 se proponen tres niveles para estimar las emisiones derivadas de la quema de combustible fósil. El método de Nivel 1 se fundamenta en el uso del combustible para estimar las emisiones de GEI provenientes de la combustión. Los FE del Nivel 1 están disponibles para todos los gases pertinentes en bases de datos de IPCC u otras fuentes, pero su calidad varía según el gas. Para el caso del  $CO_2$ , estos factores son bastante precisos debido a su dependencia del contenido de carbono del combustible, mientras que para el  $CH_4$  y  $N_2O$  varían según la tecnología de combustión y las condiciones del proceso. Esta variabilidad hace que el uso de FE promediados para estos gases genere incertidumbres significativas. En el método del Nivel 2, las emisiones se calculan utilizando estadísticas de combustible similares a las utilizadas en el método del Nivel 1. Sin embargo, en el Nivel 2 se emplean FE específicos del país en lugar de los factores por defecto utilizados en el Nivel 1, lo que mejora la incertidumbre en la estimación. En los enfoques del Nivel 3, se emplean modelos exhaustivos de emisión o mediciones y datos específicos de cada planta, según sea necesario. Este modelo proporciona estimaciones más precisas, especialmente para los GEI distintos al  $CO_2$ , pero requieren información más detallada y un esfuerzo adicional [8, 9].

En 2015 el estado colombiano emitió el BUR1 que contiene el INGEI de los años 2010 y 2012. Para el cálculo de las emisiones del sector transporte terrestre carretero se usó la metodología de Nivel 1 con factores de emisión por defecto y datos de actividad del país [7]. Posteriormente, en 2018 se estableció el BUR2 que reportó el INGEI de 1990-2014, usando para su cálculo la metodología de Nivel 2 para las emisiones de  $CO_2$  y Nivel 1 para las emisiones de  $CH_4$  y  $N_2O$  [10]. De la misma manera, en 2021 se publicó el BUR3 para reportar el INGEI de 1990-2018 siguiendo la metodología que se empleó en el BUR3 [11].

En el BUR3 se afirmó que para el módulo de Energía las emisiones por la quema de combustibles fósiles en el sector transporte son las que más aporte representan (12 % del total nacional y 41 % del total del módulo). El 78 % de las emisiones para esta subcategoría provienen del sector transporte terrestre (29,602Gg de  $CO_2$  eq), el 11 % de aviación civil

---

(4,107Gg de  $CO_2$  eq) y el 10 % de otro tipo de transporte (3,783Gg de  $CO_2$  eq). [11].

Por lo anterior, surge la necesidad de llevar a cabo un análisis detallado de las emisiones contaminantes teniendo en cuenta las condiciones geográficas y climáticas del país, el cual se caracteriza por una topografía diversa y notables variaciones de altitud. Estas variaciones, junto con la diversidad tecnológica en el parque automotor, generan impactos variables en la concentración de las emisiones y el consumo de combustible [12, 13].

Este enfoque busca no sólo cumplir con los compromisos internacionales, sino también abordar las particularidades geográficas y tecnológicas que influyen en las emisiones vehiculares, contribuyendo así en la gestión de datos ambientales para el sector de transporte terrestre carretero en Colombia. Los datos que se usarán en este proyecto se basan en datos de investigaciones preliminares del proyecto FECOC desarrollado en varias etapas. En la fase de 2003 de FECOC, se calcularon los FE de combustibles colombianos, basándose en la estequiometría y la composición elemental de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos [14]. En la fase de 2016 de FECOC, se revisaron y actualizaron los FE para 68 combustibles del informe de 2003, añadiendo 14 nuevos combustibles. El objetivo principal fue determinar los FE locales de  $CO_2$ , donde también se incluyeron los FE para  $CH_4$  y  $NO_2$  [8]. Finalmente, entre 2020 y 2023 se llevó a cabo el proyecto FECOC+, en el que se complementó la base de datos de FE del sector transporte terrestre carretero colombiano, con énfasis en las emisiones de GEI [5, 6, 15].

Adicionalmente, la pertinencia de esta investigación se destaca en el marco de los desafíos ambientales y energéticos actuales. La consolidación de datos específicos de Colombia posibilitará una comprensión más precisa de los patrones de emisión y consumo en el transporte carretero, ofreciendo información valiosa para la formulación de políticas públicas, estrategias de mitigación ambiental y la promoción de tecnologías más sostenibles.

En este contexto, se reconoce que los factores de emisión -FE- (masa de contaminante

determinado por unidad de distancia recorrida) no solo son esenciales para los inventarios, sino que también se han revelado como herramientas fundamentales para respaldar decisiones técnicas significativas. Estas decisiones abarcan desde la renovación de tecnología y el establecimiento de líneas base de consumo de combustible y emisiones para la planificación de escenarios de reducción, hasta la delimitación de zonas de aire protegido en centros urbanos, la implementación de restricciones ambientales, programas de eco-etiquetado y las bases de programas de financiación estatal y privada relacionados con cambio climático y calidad del aire. Asimismo, los FE se posicionan como instrumentos valiosos para el sector empresarial, al permitirles evaluar programas de autorregulación de emisiones y validar las tecnologías más eficientes disponibles para sus operaciones [4, 16].

En este sentido, se espera que el análisis detallado propuesto en este trabajo no solo contribuirá al conocimiento científico y técnico del transporte terrestre carretero, sino que también se convertirá en una herramienta práctica para diseñar intervenciones efectivas que aborden los desafíos ambientales y promuevan la eficiencia energética en este sector. Se espera que, la consolidación de esta base de datos proporcione fundamentos para la toma de decisiones, que permitan impulsar prácticas sostenibles en el ámbito del transporte terrestre en Colombia.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Evaluar el impacto de la altitud y la tecnología sobre los factores de GEI, gases contaminantes y partículas, así como el consumo de combustible a partir de la consolidación de una base de datos única.

### *B. Objetivos específicos*

1. Consolidar una base de datos única de factores de GEI, gases y partículas, y consumo de combustible.
2. Determinar el efecto de la altitud sobre los factores de emisión y el consumo de combustible.
3. Determinar el efecto de la tecnología vehicular específica sobre los factores de emisión y el consumo de combustible.

### III. ANTECEDENTES

Entre 2020 y 2023 la Universidad de Antioquia llevó a cabo el proyecto “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+)” como parte de un convenio con la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Su objetivo principal fue complementar la base de datos de factores de emisión del sector transporte terrestre carretero colombiano, con énfasis en las emisiones de GEI. Este trabajo se realizó en tres fases:

- FECOC+ Fase 1 (*CV-001-2020*), en el cual se llevó a cabo una caracterización exhaustiva del parque automotor colombiano, donde se sintetizaron los ciclos de conducción (perfiles velocidad vs tiempo) específicos por actividad para cada categoría vehicular, abarcando motocicletas, vehículos livianos y vehículos pesados destinados al transporte de carga y pasajeros [5]. En la **Fig. 2** se muestran los ciclos de conducción para cada categoría.
- En FECOC+ Fase 2 se procedió a determinar, mediante mediciones a bordo, los FE de los vehículos pesados destinados al transporte de carga y de pasajeros en tres altitudes representativas de la topografía colombiana. Esta categoría fue seleccionada debido a su significativo consumo de combustible, a pesar de tener una menor cantidad de vehículos en comparación con motocicletas y vehículos livianos:
- En FECOC+ Fase 2.1 (*CV-003-2021*) se midieron a bordo los FE de GEI como CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, así como de gases regulados (*CO*, *NO<sub>2</sub>*, *NO<sub>x</sub>*, *THC* y *NMHC*), de material particulado (*PM* y *PN*) para vehículos pesados de carga (camiones de dos ejes pequeños -C2P-, camiones de dos ejes grandes -C2G- y tractocamiones) y de pasajeros (buses) medidos bajo ciclos de conducción en la ciudad de Bucaramanga, ubicada a aproximadamente 1000 m.s.n.m [15].

Durante esta fase, los FE fueron determinados al reproducir el ciclo de conducción correspondiente a cada tipo de vehículo en una ruta adecuada. Para ello, se usó un equipo

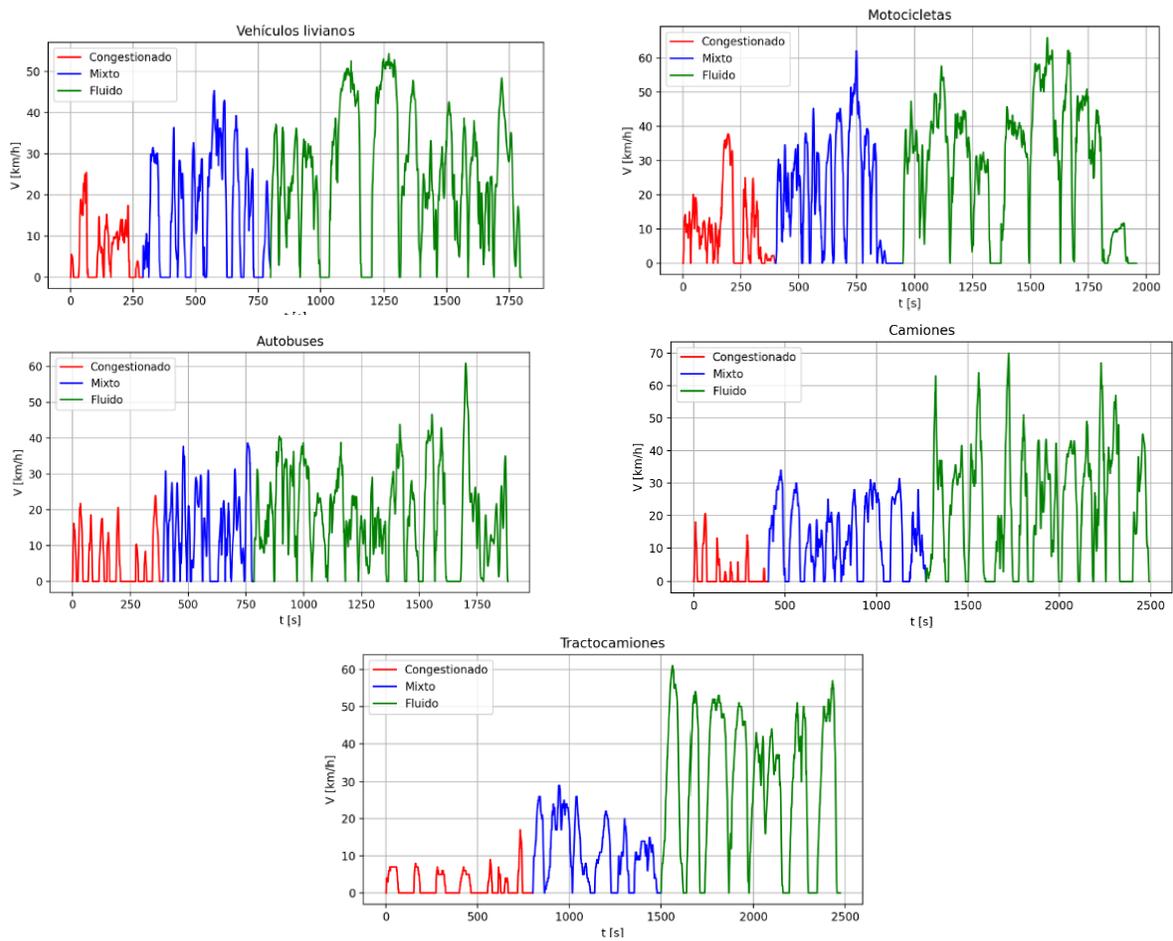


Fig. 2. Ciclos de conducción para cada categoría vehicular en Colombia [5].

PEMS Horiba OBS ONE, el cual mide  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $HC$ ,  $NMHC$  y  $CO$ . Además, los FE de partículas se determinaron con un impactador eléctrico de baja presión (ELPI de 14 etapas) de Dekati, tanto en masa ( $PM$ ) como en número ( $PN$ ). Estos FE se derivaron de las concentraciones instantáneas (10 muestras por segundo), del flujo volumétrico de los gases de escape medido con el Horiba OBS ONE ( $m^3/S$ ), y de la densidad de los gases en condiciones estándar, medida también con el Horiba OBS ONE [15].

- En FECOC+ Fase 2.2 ( $CV-001-2022$ ) se determinaron los FE de GEI ( $CO_2$ ), gases regulados ( $CO$ ,  $THC$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  y  $NO_X$ ) y material particulado ( $PM$  y  $PN$ ) para vehículos pesados de carga (camiones de dos ejes pequeños -C2P-, camiones de dos ejes grandes -C2G- y tractocamiones) y de pasajeros (buses) medidos bajo ciclos de conduc-

ción en las ciudades de Bogotá y Barranquilla, las cuales están ubicadas a 2600 m.s.n.m y 0 m.s.n.m, respectivamente [16]. Se empleó un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS) de la marca 3DATX parSYNC FLEX (1 muestra por segundo), de Nueva York, EE. UU. Este dispositivo permitió la medición de emisiones contaminantes gaseosas reguladas, como el monóxido de carbono ( $CO$ ), los hidrocarburos totales ( $THC$ ), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), y el material particulado ( $PM$ ), así como el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el monóxido de nitrógeno ( $NO$ ), el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), y la concentración del número de partículas ( $PN$ ). Dado que los PEMS registran la concentración de contaminantes, se necesitó medir el flujo instantáneo de los gases de escape. Para ello, se utilizó la medición de la relación aire-combustible de los gases con un equipo Horiba Mexa 370 $\lambda$  (10 muestras por segundo), el cual se ubicó en el ducto de salida de los gases de escape, así como también la medición del flujo másico de aire con ayuda de un sensor MAF colocado en el múltiple de admisión de cada vehículo de prueba.

- FECOC+ Fase 3 de 2022, se determinaron los FE de 30 vehículos livianos y 40 motocicletas mediante mediciones en bancos de rodillos. Estas mediciones fueron realizadas en la ciudad de Medellín, la cual está a una altura aproximada de 1500 m.s.n.m. Además, se llevaron a cabo mediciones en tres altitudes representativas del país, en las ciudades de Apartadó, Medellín y Bogotá, las cuales están ubicadas a aproximadamente 0 m.s.n.m, 1500 m.s.n.m y 2600 m.s.n.m, respectivamente. En el caso de los vehículos livianos sometidos a pruebas de altitud, las mediciones se realizaron en ruta [6].

En esta Fase 3, las concentraciones de emisiones contaminantes se determinaron con ayuda del mismo PEMS parSYNC Flex marca 3DATX usado en Fase 2.2 para medir concentraciones de emisiones, un sensor Horiba Mexa 370 $\lambda$  para la relación aire-combustible y un sensor MAF para medir el flujo másico de aire.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Factor de emisión (FE)

Es un indicador, que cuantifica la relación entre la masa de un contaminante específico emitido y la actividad que lo genera. En el caso de fuentes estacionarias, se expresa generalmente en términos de la masa del contaminante por unidad de energía producida o por kilogramo de combustible consumido durante el proceso (g/MJ o g/kg). En el contexto de fuentes móviles, como vehículos, se expresa en unidades de masa por unidad de distancia recorrida (g/km). En algunos casos, también se utiliza la expresión de masa por unidad de energía generada en el eje del motor (g/kWh). Estos factores resultan fundamentales para evaluar y cuantificar las emisiones contaminantes asociadas con diversas actividades y procesos, facilitando así la toma de decisiones y la implementación de medidas para reducir los impactos ambientales [17].

En el marco del proyecto FECOC+, se obtuvieron datos en tiempo real relacionados con la velocidad instantánea de cada vehículo ( $V$ ), el flujo de aire en la admisión del motor ( $\dot{m}_a$ ) para el caso de los vehículos pesados medidos en Bogotá y Barranquilla, motocicletas y vehículos livianos, mientras que los vehículos pesados medidos en Bucaramanga cuentan con medición de flujo de gases de escape ( $\dot{m}_g$ ). También se midió la relación aire-combustible ( $\lambda$ ) y la concentración volumétrica de varios contaminantes presentes en los gases de escape. Estos contaminantes incluyen:  $CO_2$ , CO,  $NO_x$ , HC y material particulado, medido tanto en masa (PM) como en número (PN). A modo de ejemplo, en las **Fig. 3, 4 y 5** se muestran los perfiles de velocidad vs tiempo y concentraciones vs tiempo para el PN y  $CO_2$  de un vehículo medido.

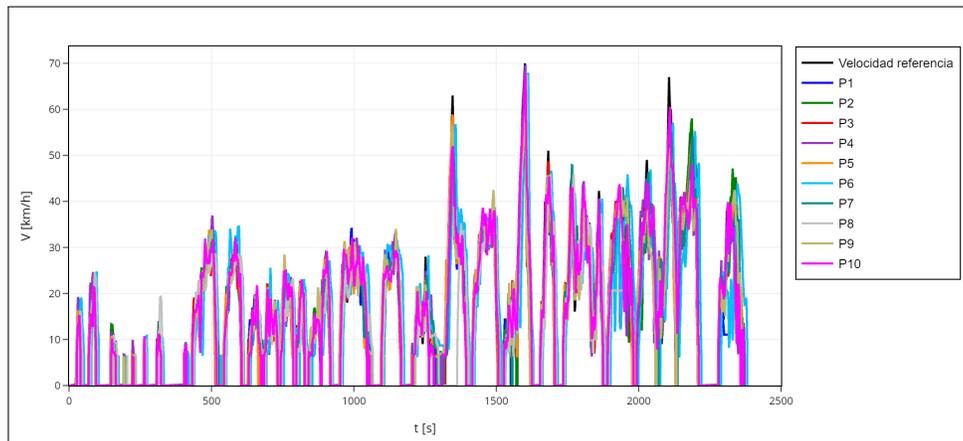


Fig. 3.  $V$  [km/h] vs  $t$  [s]

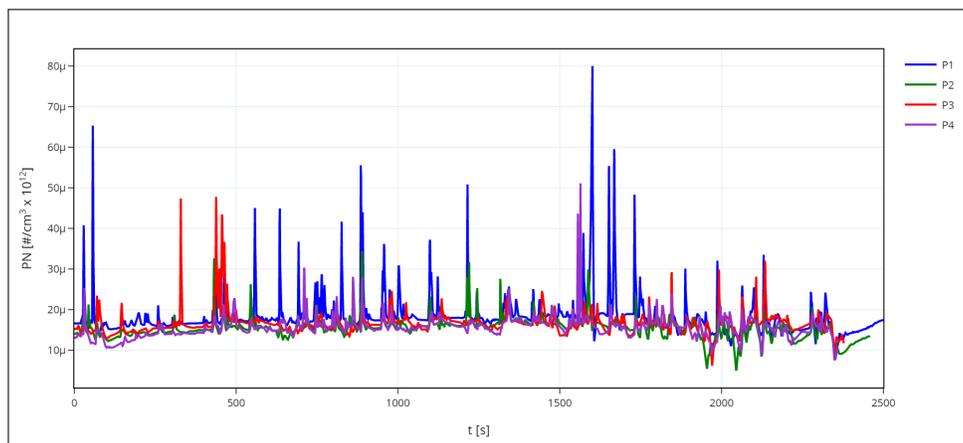


Fig. 4.  $PN$  [ $\# / \text{cm}^3 \times 10^{12}$ ] vs  $t$  [s]

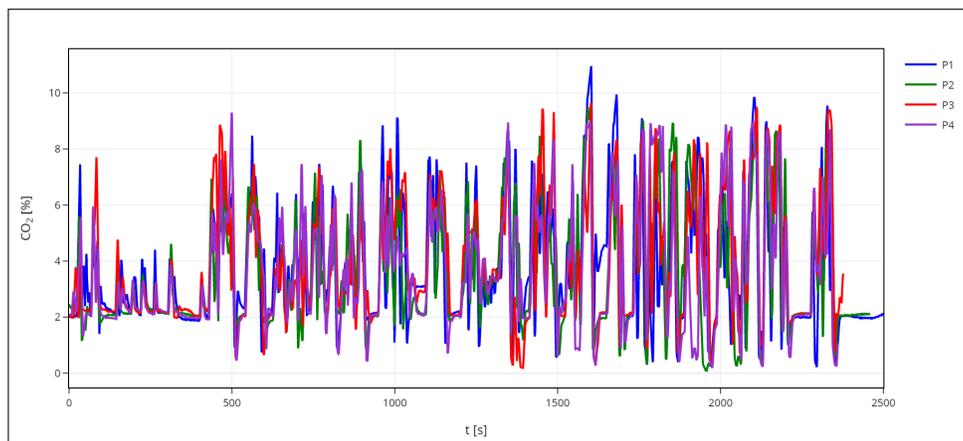


Fig. 5.  $CO_2$  [%] vs  $t$  [s]

Con esta información, se pueden calcular los FE para cada contaminante. Esto se logra determinando su flujo másico, según se muestra en la **ec. 1**.

$$\dot{m}_i = X_i \frac{M_i}{M_g} \dot{m}_g \quad (1)$$

Donde  $m_i$  es el flujo másico instantáneo del contaminante en  $[g/s]$ ,  $X_i$  es la fracción volumétrica medida del contaminante en unidades de concentración de modo que si se medía en % vol. (como el  $CO_2$  y el CO), se dividía por 100, y si se medía en ppm (como HC, NO y  $NO_2$ ), se dividió por 1 millón.  $M_i$  y  $M_g$  son las masas molares del contaminante y de los gases respectivamente en  $[kg/kmol]$ , y  $\dot{m}_g$  es el flujo másico de los gases de escape. Para el caso de los vehículos que no se midieron en Bucaramanga este último se obtiene con ayuda de la la relación aire-combustible  $\lambda$  (**ec. 2**) y la ley de la conservación de la masa (**ec. 3**), al sumar el flujo másico de aire en la admisión del motor con el flujo másico de combustible.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a}{\lambda} \quad (2)$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_c \quad (3)$$

En el caso del material particulado, la masa o el número de partículas se determinaron multiplicando la respectiva concentración arrojada por el PEMS ( $mg/m^3$  o  $\#/cm^3$ ) por el flujo volumétrico de gases de escape, como se muestra en la **ec. 4**.

$$\dot{P}\dot{M}, \dot{P}\dot{N} = X_{PM,PN} \times \dot{V}_g \quad (4)$$

La masa total de cada contaminante se obtuvo integrando matemáticamente los respectivos flujos másicos en el tiempo de la prueba (**ec. 5**).

$$m_i = \int_{t=0}^{t_f} \dot{m}_i dt \quad PM, PN = \int_{t=0}^{t_f} (\dot{P}\dot{M}, \dot{P}\dot{N}) dt \quad (5)$$

Finalmente, cada factor de emisión se calculó dividiendo la masa total por la distancia recorrida durante la prueba a lo largo del ciclo de conducción, según se muestra en la **ec. 7**.

Para el calculo de la distancia se obtuvo integrando matemáticamente el perfil de velocidad en el tiempo de prueba (**eq. 6**).

$$distancia = \int_{t=0}^{t_f} V dt \quad (6)$$

$$FE_i = \frac{m_i, PM, PN}{distancia} \quad (7)$$

El rendimiento de combustible también se puede expresar en términos de litros consumidos por cada 100 km. Para el caso de los vehículos pesados, igualmente se pueden expresar las emisiones específicas, lo que significa cantidad de contaminante emitido por cada kilómetro y tonelada, como se muestra en la **eq. 8**.

$$Emisión\ específica = \frac{FE_i}{carga\ de\ prueba} \quad (8)$$

### *B. Inventario de emisiones*

Es un instrumento que permite conocer la carga de emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera de una región o país específico por unidad de tiempo. Existen diferentes aproximaciones para calcular dicha masa, para lo que se requiere normalmente de los factores de emisión. En el caso de las fuentes móviles, también necesita una caracterización detallada de la flota de vehículos de la región de interés, así como de la distancia anual recorrida. Normalmente el producto de estos tres parámetros se compara, y debería ser igual, al obtenido a partir del consumo de combustible [6].

Dependiendo del propósito y de la disponibilidad de la información, se pueden desarrollar dos enfoques para elaborar un inventario de emisiones. En primer lugar, se tiene la aproximación “de arriba hacia abajo” (*top down*) en el que se comienza con información general o agregada (macro), como datos a nivel nacional, para obtener la información específica de emisiones necesaria. En segundo lugar, se tiene la aproximación “de abajo hacia arriba” (*bottom up*) en la que se inicia con datos específicos y detallados (micro), los cuales,

al ser agregados, permiten obtener información general de emisiones requerida. La elección del enfoque depende, principalmente, del nivel y la calidad de la información disponible; y, en segundo instancia, del alcance que se desee para el inventario de emisiones [18].

En la **Fig. 6**, se muestra una comparación entre los dos enfoques mencionados anteriormente para el inventario de emisiones de Bogotá para el 2020 [19]. Los valores negativos representan valores mayores por parte del inventario Bottom-Up con respecto al Top-Down, como se observa en la mayoría de categorías vehiculares. Las diferencias entre los inventarios son más notables en las categorías de buses del componente troncal del SITP. Esto es debido a que no contaban con información de conteos agregadas por subcategoría de SITP. A pesar de esto, las diferencias se equilibran en las emisiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ , con una variación total menor al 1% entre ambas metodologías. En contraste, las emisiones de  $SO_2$ ,  $CO$  y  $VOC$  mostraron diferencias superiores al 40%, siendo generalmete mayores en el enfoque Top-Down, excepto en el transporte especial. Los autores afirmaron que estas variaciones se deben, en parte, al bajo flujo vehicular en 2020 producto de las cuarentenas por el COVID-19, lo cual no se reflejó en el inventario Top-Down debido a la fuente de información que usaron [19].

Categoría vehicular	$PM_{10}$	$PM_{2,5}$	$NO_x$	$CO$	$VOC$	$SO_x$
Automóvil	-57%	-57%	-60%	-59%	-59%	-56%
Campero y camioneta	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%
Motocicleta	-52%	-52%	-33%	-29%	-38%	-38%
Transporte de carga	69%	69%	6%	-77%	-60%	-32%
Taxis	-97%	-97%	-92%	-93%	-83%	-97%
SITP-Troncal	117%	117%	106%	150%	82%	251%
SITP-Zonal y provisional	-61%	-61%	-61%	-57%	-65%	-53%
Transporte de especial y otros	65%	65%	52%	20%	-36%	-14%
<b>Total</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-41%</b>	<b>-46%</b>	<b>-57%</b>	<b>-53%</b>

Fig. 6. Comparación enfoque Bottom-Up y Top-Down [19]

### *C. Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )*

El dióxido de carbono es un gas incoloro y no inflamable que se encuentra naturalmente en la atmósfera terrestre. Siendo este un producto común en la combustión de materiales orgánicos, además de que es liberado por la respiración de los seres vivos. Sin embargo, actividades como la quema de combustibles fósiles producto de actividades como la generación de energía, la industria y el transporte, han aumentado significativamente los niveles de  $CO_2$  en la atmósfera a lo largo de los años. Por consiguiente, este aumento ha contribuido al calentamiento global y al cambio climático, forzando a los gobiernos a plantear estrategias para la reducción de este gas. De igual manera, en 1997, el protocolo de Kioto establece al  $CO_2$  como un gas de efecto invernadero (GEI) [20].

### *D. Potencial de calentamiento global*

Los GEI contribuyen al calentamiento global al absorber energía y reducir la velocidad a la que esta se escapa al espacio, funcionando como una manta que aísla a la Tierra. Cada tipo de GEI puede tener un efecto diferente sobre el calentamiento global, que se determina por dos factores clave: su capacidad para absorber energía (eficiencia radiativa) y el tiempo que permanecen en la atmósfera (vida útil) [21].

El GWP es una medida utilizada para comparar los impactos de diferentes GEI en el calentamiento global. El GWP de un gas específico es la cantidad de energía que 1 tonelada de ese gas absorberá durante un período de tiempo, en comparación con 1 tonelada de  $CO_2$ . Este estándar permite sumar estimaciones de emisiones de diferentes gases y comparar oportunidades de reducción de emisiones entre sectores y gases. En la **Tab. 1** se resumen los valores de GWP de varios GEI, considerando un horizonte temporal de 100 años. Se destaca la capacidad de cada gas para absorber energía en comparación con el  $CO_2$ , que tiene un GWP de 1 y se utiliza como referencia [21].

TABLA 1  
 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP) DE DIFERENTES GEI EN UN HORIZONTE  
 TEMPORAL DE 100 AÑOS [21].

Gas	GWP (100 años)
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	1
Metano ( $CH_4$ )	27 - 30
Óxido nitroso ( $N_2O$ )	273

### E. Monóxido de Carbono ( $CO$ )

El monóxido de carbono es un gas tóxico que se forma en las cámaras de combustión debido a la insuficiencia de oxígeno para llevar a cabo una combustión completa. La principal fuente de emisión de este contaminante son los motores a gasolina, que representan aproximadamente el 90 % de las emisiones totales, en contraste con los motores diésel, que operan con mezclas más pobres y emiten cantidades menores de este gas.

Además, el monóxido de carbono es uno de los agentes contaminantes más peligrosos para la salud humana. Esto se debe a que causa una reducción en la capacidad de llevar oxígeno en la sangre, lo que puede resultar en dolores de cabeza, fatiga, problemas respiratorios e incluso la muerte. Su peligrosidad se ve agravada por sus propiedades físicas, ya que es inodoro, insípido y sin color, lo que significa que las personas pueden estar expuestas a él sin darse cuenta.[17].

### F. Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ )

El término  $NO_x$  hace referencia a la combinación de óxido nítrico ( $NO$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), los cuales suelen encontrarse juntos en la atmósfera. A pesar de que existen fuentes naturales de  $NO_x$ , como incendios forestales y tormentas eléctricas, la principal fuente es la combustión de combustibles fósiles.

---

El problema asociado con los óxidos de nitrógeno está fuertemente ligado a las áreas urbanas, en el que el transporte es la principal causa de emisión. Los  $NO_x$  reaccionan en presencia de la luz solar para formar ozono, uno de los contaminantes más importantes. Además, reacciones fotoquímicas en la atmósfera convierten el  $NO_2$  en ácido nítrico y nitratos, los cuales pueden ser transportados por el viento y eliminados por la lluvia, formando así la lluvia ácida. Por otro lado, algunos de los nitratos formados permanecen en la atmósfera como partículas finas de menos de 10 micrones de diámetro ( $PM_{10}$ ), contribuyendo a la formación de partículas secundarias, o lo que se conoce como smog fotoquímico por el cual se produce una neblina densa y opaca que reduce la visibilidad y afecta de manera significativa la calidad del aire [17, 22].

#### *G. Hidrocarburos sin quemar (HC)*

Las emisiones de hidrocarburos no quemados consisten en combustible no quemado o parcialmente quemado. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos en estado gaseoso, cuando se habla de hidrocarburos sólidos estos hacen parte del material particulado. En un motor a gasolina, una mezcla homogénea de aire y combustible es comprimida y encendida por una chispa, creando la llama que atraviesa la cámara de combustión. La emisión de HC aparece en el motor a gasolina cuando la mezcla aire-combustible se esconde en lugares innacesibles a la llama, como el espacio entre el pistón y la pared del cilindro, sobre el anillo del pistón [17].

Por otro lado, en un motor diésel únicamente se comprime el aire en la cámara, para luego inyectar el combustible a alta presión cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS), por tanto, esto permite que no se escape una importante cantidad de combustible de la combustión. Por lo que, si un vehículo con un motor diésel presenta valores elevados para la emisión de HC, esto implica problemas con la mezcla de aire-combustible, producto de regiones de extrema pobreza antes de la ignición o bajas velocidades de inyección del combustible cerca del final de la combustión.

### *H. Material Particulado (PM)*

El material particulado (*PM*) es un producto de la combustión incompleta de hidrocarburos, considerado un contaminante significativo que impacta la salud humana y el medio ambiente. Compuesto por sólidos y condensados, puede ser emitido por motores a gasolina y diésel. La fracción sólida incluye carbón negro (*black carbon*) y cenizas, mientras que la fracción condensable que se suele adsorber sobre la fase sólida contiene hidrocarburos de alto punto de ebullición provenientes del combustible y el aceite lubricante, agua y ácido sulfúrico (si el combustible tiene azufre). El carbono negro, también denominado hollín, se suele denominar carbón elemental. A la fracción orgánica que se absorbe en la superficie del carbono negro, se le conoce como carbono orgánico (OC). La fracción orgánica puede ser emitida directamente como PM (primario) a la atmósfera o se puede generar en la atmósfera en la medida que los HC se condensan para convertirse en PM (secundario) [6].

El *PM* se clasifica en diferentes categorías según su tamaño aerodinámico, desde partículas grandes ( $> 10\text{micras}$ ) hasta nanopartículas ( $< 50\text{nm}$ ). El 100 % del PM emitido por motores a gasolina y diésel es de tamaño inferior a 1 micra, y el 95 % es menor a 300 nanómetros. Aunque las partículas más pequeñas son abundantes, contribuyen poco a la masa total del *PM*. Por esta razón, la normativa ambiental Euro 6/VI ahora se enfoca en el número de partículas emitidas en lugar del peso del *PM*, lo que significa que todo el material particulado de un motor será *PM*<sub>2,5</sub> [6].

De igual manera, el *PM* está siendo cada vez más reconocido como un agente del cambio climático, ya que contribuye a la formación de neblina y puede afectar el hielo polar, acelerando el descongelamiento al absorber radiación solar. Además, el PM es conocido por sus efectos perjudiciales en la salud humana. Las partículas de *PM*<sub>2,5</sub> pueden penetrar profundamente en los pulmones y contribuir a enfermedades graves como el cáncer y el asma. La capacidad de dichas partículas para participar en reacciones químicas en la atmósfera aumenta con su área superficial específica, la cual es inversamente proporcional a su tamaño [6].

La formación de partículas en los motores ocurre en la cámara de combustión debido a la falta de oxígeno, generando hollín, que son partículas de carbón deshidrogenado. Por tanto, la formación de estas partículas depende en gran medida de lo homogénea que sea la mezcla antes de iniciar la combustión. En los motores de encendido provocado, como los convencionales, el combustible se mezcla homogéneamente con el aire antes de la ignición, reduciendo la formación de partículas sólidas. En cambio, en los motores de encendido por compresión, el combustible se inyecta justo antes del punto muerto superior (PMS), lo que limita el tiempo de mezcla y aumenta la formación de partículas sólidas y volátiles. Incluso en los motores de gasolina convencionales, la presencia de aceite lubricante y la condensación de hidrocarburos pueden causar formación de partículas, aunque en menor cantidad [6].

1) *PM<sub>2.5</sub>*: Masa de material particulado de tamaño menor o igual a 2.5 micrómetros. Cerca del 99 % del material particulado emitido por la combustión en motores, tanto de ciclo Diésel como de ciclo Otto, corresponden a *PM<sub>2.5</sub>* [23]. Las partículas de menor tamaño tienen poca masa y suelen concentrarse en tamaños inferiores a 300 nm (ultrafinas), constituyendo una distribución denominada “modo nucleación”, que son las que tienen mayor fracción de deposición en los pulmones [6]. En la **Fig. 7** se muestra un esquema de lo mencionado anteriormente.

2) *PN*: Según la última directiva de la Euro 6, parte d, implementada desde septiembre de 2017, se establece un límite máximo de 600,000 millones de partículas por cada kilómetro recorrido por vehículos diésel livianos (menores a 3,5 toneladas de peso bruto vehicular), equivalente a  $6 \times 10^{11}$  partículas/km bajo ciclo de conducción WLTP (Worldwide Lightduty Vehicles Test Protocol) [6].

En 2023, se realizó un estudio en el marco del programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina (CALAC+), en el cual se evaluó la prueba de inspección técnica periódica basada en el número de partículas (PN-PTI) en un sistema público de transporte

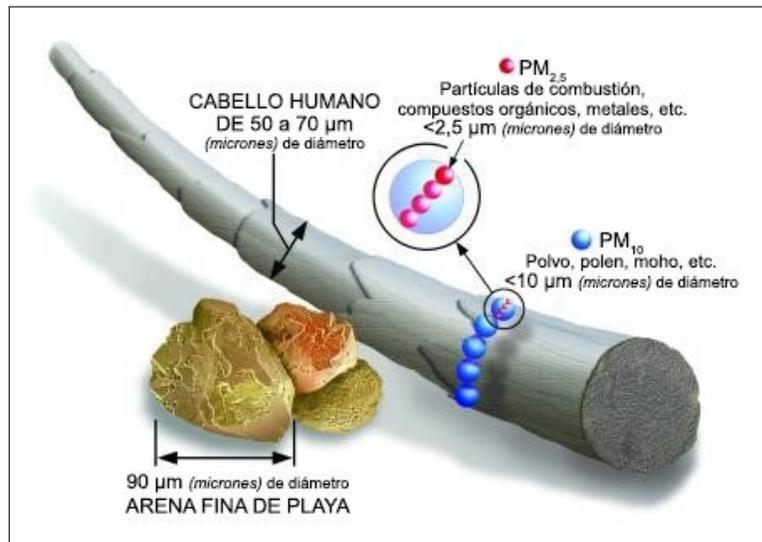


Fig. 7. Comparación tamaño de las partículas de PM

Nota. Fuente <https://acortar.link/9PoRZM>

rápido de autobuses (BRT). Se analizaron 1474 autobuses con diferentes estándares de emisiones, desde Euro II hasta Euro VI, con y sin filtros de partículas diésel (DPF), así como autobuses a gas natural comprimido (GNC). La prueba reveló que los autobuses con DPF tienen emisiones medias de PN inferiores a  $3,000 \text{ \#}/\text{cm}^3$ . Sin embargo, se sugiere una prueba adicional para aquellos con emisiones superiores a  $50,000 \text{ \#}/\text{cm}^3$ , para identificar DPF que requieran mantenimiento. Para la mayoría de las flotas sin DPF en América Latina, la prueba de PN puede ayudar a identificar a los emisores más altos y desarrollar políticas adecuadas. Los autobuses a GNC mostraron las emisiones más bajas, posiblemente debido a las limitaciones de detección del equipo utilizado [24].

Además, este estudio reveló una reducción significativa en la emisión de partículas con la adopción de tecnología DPF, logrando una disminución de aproximadamente el 99,5%. Sin embargo, se encontró que los límites de aprobación actuales para la prueba PN-PTI no son suficientemente estrictos para detectar todas las fallas del DPF, sugiriendo que un límite más bajo mejoraría la detección. Además, la prueba PN-PTI demostró ser efectiva en identificar fallos en DPF modernizados, especialmente en ciertos astilleros, subrayando la importancia

---

de programas adecuados de operación y mantenimiento para la durabilidad del DPF. Para los autobuses sin DPF, la medición de la concentración de partículas sólidas (PNC  $\#/cm^3$ ) de gases de escape puede ser útil para identificar emisores muy altos y desarrollar políticas especiales. En cuanto a los autobuses a GNC, las emisiones de PN fueron extremadamente bajas, sugiriendo la necesidad de considerar límites de detección más bajos para las pruebas PN-PTI en esta categoría de vehículos.

### *I. Emisiones contaminantes gaseosas reguladas*

Son óxidos de nitrógeno –  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ); hidrocarburos totales –  $THC$  (quemados parcialmente + provenientes de combustión incompleta), monóxido de carbono –  $CO$  y dióxido de carbono  $CO_2$ . Los  $VOC$  (compuestos orgánicos volátiles) no están reguladas, y son calculados normalmente en los modelos de factores de emisión como el IVE a partir de la composición del combustible y de las emisiones de  $THC$ . No todos los hidrocarburos emitidos por los motores son  $VOC$ , como tampoco se puede afirmar que todos los  $VOC$  tengan hidrocarburos en su composición [6].

### *J. Normativa de emisiones*

Muchos de las emisiones contaminantes de los vehículos se estudian desde hace más de 40 años, debido a que resultan perjudiciales para la salud y medio ambiente. Una solución a esto ha sido la implementación por parte de países más desarrollados de regulaciones que definen y limitan la contaminación asociada a los gases de escape de un vehículo. Además, debido a que la tecnología cada vez se vuelve más sofisticada, esto se va equiparando con la necesidad de disminución de emisiones. Los Estados Unidos de América (EE. UU.) y la Unión Europea (UE) han desempeñado roles destacados en la creación de leyes para controlar las emisiones. Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha instado a otros países a adoptar regulaciones estrictas, ya que el aumento de emisiones contaminantes en el aire tiene efectos perjudiciales en la salud humana y contribuye al cambio climático [25].

A causa de esto, existen varios marcos de legislación o estándares de regulación de emisiones, dentro de los más significativos se encuentran:

- La regulación CARB (*California Air Resources Board*, Junta de Recursos del Aire de California).
- La regulación EPA (*Environmental Protection Agency*, Agencia de Protección del Medio Ambiente) de EUA.
- La regulación EURO (Unión Europea).
- La regulación Japonesa

Las normativas se basan en la categorización de vehículos de pasajeros, con diferencias dependiendo del país, así como en camiones pesados. Esta categoría abarca autobuses, camiones de carga y vehículos especializados fuera de carretera, como los utilizados en la construcción, agricultura y minería [25].

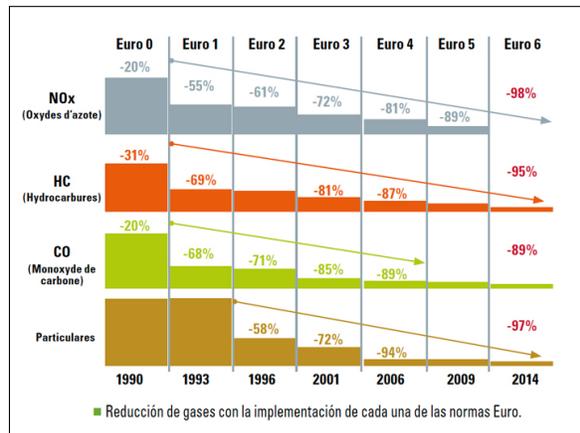
En la **Fig. 8a**, se observan los límites de emisiones impuestos por la norma europea, los cuales son medidos siguiendo ciclos estándar según cada norma. En la **Fig. 8b**, se observa como el control de emisiones según la norma Euro (Europa) se ha vuelto mucho más estricto.

Límites de emisiones establecidos por cada norma Euro para los turismos						
Norma	Entrada en vigor	CO (g/km)	HCT (g/km)	NMHC	HCT+NOx (g/km)	PM (g/km)
<b>Motor diésel</b>						
Euro 1**	01/07/92	2,72 (3,16)	----	----	0,97 (1,13)	----
Euro 2, IDI	01/01/96	1,0	----	----	0,7	0,08
Euro 2, DI	01/01/1996*	1,0	----	----	0,9	0,10
Euro 3	01/01/00	0,64	----	----	0,56	0,05
Euro 4	01/01/05	0,50	----	----	0,30	0,25
Euro 5	01/09/09	0,50	----	----	0,23	0,18
Euro 6	01/09/14	0,50	----	----	0,17	0,08
<b>Motor gasolina</b>						
Euro 1**	01/04/92	2,72 (3,16)	----	----	0,97 (1,13)	----
Euro 2	01/01/96	2,2	----	----	0,5	----
Euro 3	01/01/00	2,30	0,20	----	----	0,15
Euro 4	01/01/05	1,0	0,10	----	----	0,08
Euro 5	01/09/09	1,0	0,10	0,068	----	0,06
Euro 6	01/09/14	1,0	0,10	0,068	----	0,06

■ CO: masa de monóxido de carbono; HCT: masa total de hidrocarburos; NOx: masa de óxidos de nitrógeno; PM: masa de partículas; NMHC: masa de hidrocarburos no metanos.  
 IDI: inyección indirecta, DI: inyección directa.

(a) Límites de emisiones norma europea.

Nota. Fuente <https://acortar.link/oZJuc>



(b) Reducción de emisiones estándar Europeo.

Nota. Fuente <https://acortar.link/oZJuc>

Fig. 8. Norma Europea para vehículos livianos.

En 2019, el Ministerio de Medio Ambiente y el de Minas y Energía emitieron la Ley 1972, en la que se establecen medidas de protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas que ayuden en la reducción de emisiones contaminantes que provienen de fuentes móviles. En el marco de esta ley, el Ministerio de Minas y Energía tiene la tarea de garantizar una reducción en el contenido de azufre del diésel, con el que se espera disminuir hasta 10 ppm para el 1 de diciembre de 2025. Además, esta ley establece que, a partir del 1 de enero de 2023, todos los vehículos nuevos con motor diésel fabricados, ensamblados o importados en Colombia deben cumplir con los límites de emisiones Euro IV/4, verificados mediante el ciclo mundial de conducción armonizada (WHTC). De la misma manera, desde el 1 de enero de 2035, todos los vehículos con motor diésel en circulación en el país deberán cumplir con la misma norma de emisiones Euro 6/IV. Para las motocicletas nuevas a partir del 1 de enero de 2021, deben cumplir con los límites de emisiones Euro 3/III. Además, se establecerán planes y cronogramas para la renovación del parque automotor de motocicletas para que a 2030 se cumpla con los límites correspondientes a Euro 3/III.

#### *K. Tecnologías de control de emisiones*

Las tecnologías de control de emisiones vehiculares comprenden un conjunto de sistemas y dispositivos diseñados para reducir la liberación de contaminantes atmosféricos durante el proceso de combustión en motores de vehículos. Esto, para adaptarse a los lineamientos establecidos en normativas de emisiones vehiculares. Algunas de estas tecnologías corresponden a la mejora de la combustión, como dispositivos que controlan la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión. Esto se ha logrado mediante la introducción de mayor cantidad de oxígeno o la dosificación precisa de combustible para garantizar una combustión eficiente y aprovechar al máximo el combustible. A continuación, se describen algunas de estas tecnologías:

1) *Turbocargador*: es un componente de sobrealimentación, el cual se adapta a los motores con el fin de aumentar la cantidad de aire comprimido que entra en la cámara de combustión, lo que resulta en una mayor potencia. El turbocompresor aumenta la potencia del motor al

introducir más aire en los cilindros mediante la compresión. Funciona con una turbina impulsada por los gases de escape, conectada a un compresor centrífugo que comprime el aire antes de ingresarlo a los cilindros a una presión mayor que la atmosférica. Esto permite una mayor cantidad de oxígeno en los cilindros, lo que aumenta la potencia del motor. La eficiencia del motor depende del porcentaje de aire fresco en cada cilindro durante la admisión, el cual se expresa mediante la eficiencia volumétrica. En la **Tabla 2**, se muestra la eficiencia volumétrica de motores de aspiración natural y motores sobrealimentados [25].

TABLA 2  
EFICIENCIA VOLUMÉTRICA DE MOTORES DE ASPIRACIÓN NATURAL Y MOTORES  
SOBREALIMENTADOS [25].

<b>Tipo de motor</b>	<b>Eficiencia volumétrica</b>
Motor de aspiración natural 4 tiempos	0.7 a 0.9
Motor de aspiración natural 2 tiempos	0.5 a 0.7
Motores sobrealimentados	1.2 a 1.6

Hoy en día, el turbocompresor se ha vuelto un componente estándar en los motores. Su ventaja radica en su capacidad para aumentar el par del motor, reducir el consumo de combustible y disminuir las emisiones contaminantes al proporcionar más aire frío. En motores de gasolina, aumenta el volumen de aire para compensar la reducción de cilindrada, mientras que en motores diésel aumenta el flujo de aire sin necesidad de incrementar proporcionalmente el combustible para la combustión [25].

Por lo anterior, los turbocargadores son vistos como una solución para compensar la falta de oxígeno en la cámara de combustión al introducir más aire. Además, algunos modelos presentan menor pérdida de potencia en altitudes elevadas, lo que los hace eficientes incluso en condiciones de elevada altitud. Sin embargo, para conocer las pérdidas de potencia específicas de un motor, es recomendable consultar la información proporcionada por el fabricante [25].

2) *Inyección electrónica de combustible*: contar con una proporción óptima de aire y combustible en los cilindros es esencial para reducir la emisión de gases nocivos. Este requisito ha sido crucial en el desarrollo de sistemas de inyección de combustible, especialmente en motores de combustión interna, donde la electrónica ha permitido un control más preciso del proceso de inyección. La introducción de la inyección electrónica de combustible, en lugar del sistema mecánico de carburador, ha mejorado significativamente la eficiencia del motor y ha reducido las emisiones contaminantes, respondiendo a las demandas de regulación ambiental cada vez más estrictas.

La inyección electrónica de combustible, controlada por la unidad de control electrónica (ECU) del vehículo, ha reemplazado a los sistemas mecánicos de inyección en motores de gasolina y diésel. Este sistema permite una medición precisa del flujo de aire aspirado por el motor, la concentración de oxígeno en los gases de escape, la temperatura ambiente y las revoluciones por minuto (RPM) del motor. Con esta información, la ECU puede ajustar la cantidad de combustible inyectado para lograr una combustión completa y reducir las emisiones contaminantes. Los inyectores presurizan y atomizan el combustible, inyectándolo según las necesidades del motor, lo que resulta en una disminución de las emisiones contaminantes debido a la precisión en la inyección y dosificación del combustible. La **Fig. 9** ilustra los componentes de un sistema de inyección electrónica de combustible [26].

De igual manera, la importancia de la inyección electrónica en los vehículos de gasolina y diésel es para lograr una combustión ideal, es decir teniendo un factor  $\lambda = 1$  para vehículos a gasolina, mientras que en diésel va de 1,3 a 18, permitiendo así reducir el porcentaje de los gases tóxicos emitidos a la atmósfera. Además, en el caso de los motores diésel, este sistema aumenta la dosificación de combustible a alta presión, lo que permite reducir los óxidos de nitrógeno siguiendo los requerimientos del motor.

3) *Convertidor catalítico*: también conocido como catalizador, es un componente presente en vehículos que funcionan con combustibles fósiles. Se sitúa después de la cámara y tiene

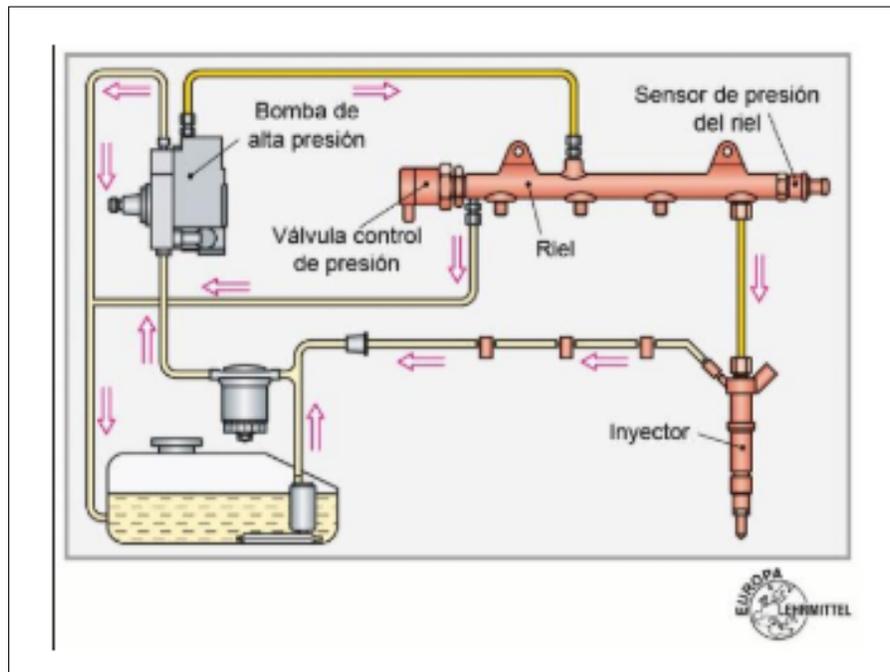
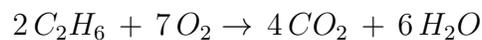
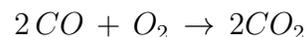


Fig. 9. Sistema de inyección electrónica [26].

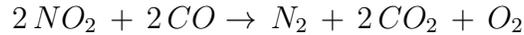
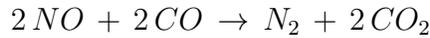
la función de controlar y reducir las emisiones perjudiciales para la salud humana que se generan durante la combustión. Entre las emisiones que se reducen se encuentran el monóxido de carbono ( $CO$ ), los hidrocarburos sin quemar ( $HC$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). Este dispositivo está compuesto principalmente por platino ( $Pt$ ), rodio ( $Rd$ ) y paladio ( $Pd$ ) [27].

Existen dos tipos de catalizadores: de doble vía y triple vía. El catalizador de tres vías es una parte esencial en los sistemas de control de emisiones de escape en motores a gasolina. Su función principal es reducir las emisiones contaminantes a través de tres reacciones químicas que afectan al  $NO_x$ ,  $CO$  y  $HC$ . En un proceso de oxidación, tanto el monóxido de carbono como los hidrocarburos son combinados con oxígeno para producir dióxido de carbono y vapor de agua, como se muestra en las siguientes expresiones químicas:



Para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno es necesario que este presente el

oxígeno, ya que cuando se agrega  $O_2$  a los óxidos de nitrógeno y al monóxido de carbono se obtiene como productos  $N_2$  y  $CO_2$ , como se muestra a continuación:



El platino se utiliza para reducir la oxidación de los hidrocarburos sin quemar, mientras que el rodio o alternativamente otros catalizadores como circonio o paladio, más económicos que el rodio pero menos efectivos, se emplean para mitigar la oxidación del monóxido de carbono y la reducción de  $N_2$ . Estos catalizadores se utilizan principalmente en motores de gasolina debido a que la proporción de  $NO_x$  es considerablemente menor que en motores diésel, los cuales no operan con exceso de oxígeno. Para que el catalizador funcione de manera óptima, es necesario mantener una mezcla estequiométrica con un valor de  $\lambda$  entre 0,995 y 1,005, y una temperatura de entre  $400^\circ C$  y  $800^\circ C$ . En estas condiciones, es posible reducir hasta un 98 % de las emisiones contaminantes [25].

Por otro lado, el convertidor catalítico de doble vía, también llamado catalizador de oxidación (DOC), es usado regularmente en motores diésel, debido a que este tipo de motores trabajan con exceso de oxígeno, generando elevadas tasas de  $NO_x$ . Dado que el catalizador de tres vías no puede reducir los óxidos de nitrógeno, se instala un catalizador de doble vía para reducir los  $HC$  y el  $CO$ , y se incorpora otro sistema para tratar los  $NO_x$ . Dentro del catalizador, dos reacciones químicas tienen lugar debido a los materiales principales de construcción: paladio y platino. La primera reacción involucra la oxidación del  $CO$  y de los  $HC$ , convirtiendo el  $CO$  en  $CO_2$  y los  $HC$  en  $H_2O$ . Esta oxidación comienza a una temperatura específica entre  $170^\circ C$  y  $200^\circ C$ , momento en el cual la tasa de oxidación supera el 90 % [25].

4) *Catalizadores acumuladores de óxidos de nitrógeno*: se utiliza en motores diésel y en motores a gasolina de inyección directa para almacenar y convertir las emisiones de  $NO_x$  generadas durante la combustión pobre, cuando el motor funciona con exceso de aire ( $\lambda > 1$ ).

Este componente es esencial porque en motores diseñados para utilizar una mezcla pobre, el catalizador de tres vías no puede convertir los  $NO_x$  producidos durante la combustión. El catalizador de tres vías oxida el  $CO$  y los hidrocarburos  $HC$  debido al alto contenido de oxígeno en los gases de escape, dejándolos no disponibles como agentes reductores de los  $NO_x$  [25].

El catalizador acumulador de  $NO_x$ , compuesto principalmente de platino, paladio y rodio, tiene aditivos especiales como óxido de bario ( $BaO$ ) u óxido de potasio ( $KO$ ) que permiten almacenar los  $NO_x$ . Durante la operación en mezcla pobre, estos materiales de almacenamiento absorben los  $NO_x$  hasta que el sensor de  $NO_x$  detecta que la capacidad de almacenamiento está llena. Luego, los  $NO_x$  se liberan y se reducen a nitrógeno por el rodio con la ayuda de los gases de escape sin quemar,  $HC$  y  $CO$ . Esto reduce entre un 80% y un 90% de los óxidos de nitrógeno a temperaturas de operación de  $250^{\circ}C$  a  $500^{\circ}C$ . En la **Fig. 10**, se muestra un esquema del almacenamiento y regeneración de los  $NO_x$  [27].

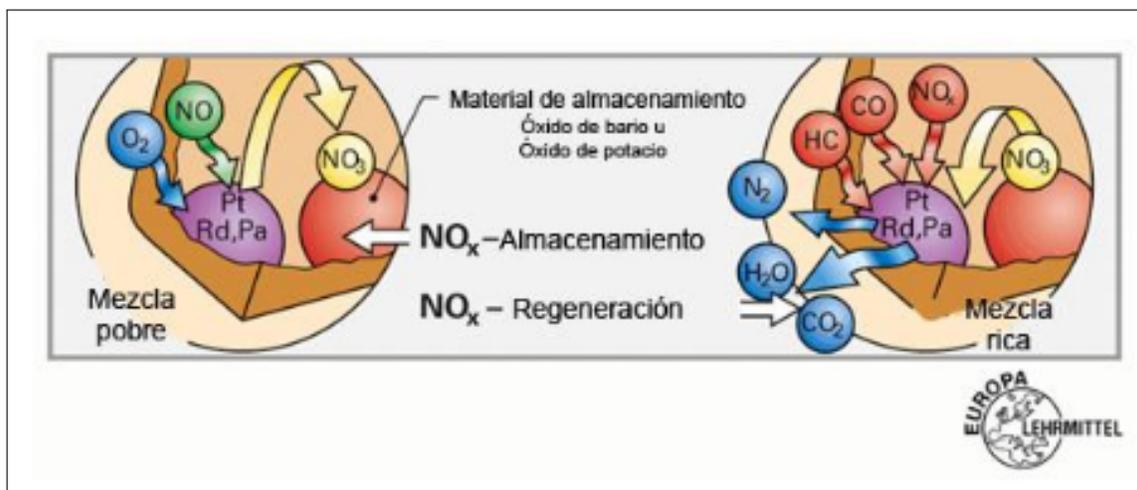


Fig. 10. Almacenamiento y regeneración de  $NO_x$  [27].

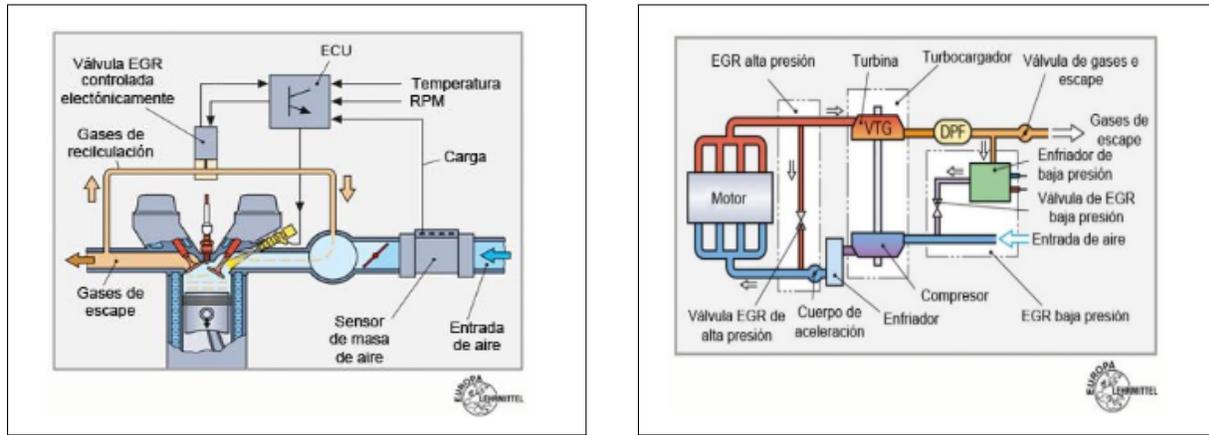
5) *Recirculación de gases de escape (EGR)*: este sistema reintroduce una parte de los gases producidos por la combustión de nuevo en los cilindros, a través de la válvula EGR, con

el propósito de reducir la concentración de oxígeno y la temperatura de combustión. Esto ayuda a disminuir la formación de  $NO_x$  hasta en un 40 % en motores a gasolina y un 60 % en motores a diésel. Sin embargo, esta reintroducción de gases de escape puede aumentar la presencia de  $HC$  en la cámara de combustión, lo que resulta en un mayor consumo de combustible. Los límites de recirculación de gases de escape están determinados por los niveles de  $NO_x$  y  $HC$ , con un máximo del 20 %. Un exceso en la recirculación puede afectar la eficiencia del motor, aumentando el consumo de combustible y generando emisiones adicionales de  $CO$  y  $HC$  [27].

En motores a gasolina que operan a temperatura normal y con una mezcla estequiométrica ( $\lambda = 1$ ), el EGR se activa. Sin embargo, cuando se utilizan mezclas ricas de aire-combustible ( $\lambda < 1$ ), el EGR se desactiva debido a la baja formación de  $NO_x$  y al aumento en la presencia de  $HC$  y  $CO$ . Esto suele ocurrir durante situaciones como el ralentí, el arranque en frío, las aceleraciones y la carga completa del motor. La tasa de cambio del EGR se ajusta según la temperatura del motor, la carga, la presión atmosférica y las RPM del motor, controlados por la unidad de control electrónica (ECU). La apertura de la válvula EGR se modula para garantizar una proporción adecuada de recirculación de gases, como se muestra en la **Fig. 11a**, donde la válvula EGR está posicionada entre la salida de los gases de escape y la entrada de la cámara de combustión [25].

En motores diésel, el EGR es crucial para reducir los  $NO_x$  y la temperatura máxima del motor. La tasa de recirculación puede alcanzar hasta un 40 % en volumen. Sin embargo, un exceso en esta tasa puede conducir a una combustión incompleta del diésel, resultando en un aumento considerable de  $HC$  y  $PM$ .

La válvula EGR se activa durante cargas parciales y a temperaturas normales de operación del motor para evitar el sobrecalentamiento de los gases de escape. No obstante, se desactiva cuando el motor está frío o durante períodos de aceleración, ya que reduce la disponibilidad de oxígeno en los cilindros. En motores diésel con turbocargador, la ubicación



(a) Motor encendido provocado.

(b) Motor encendido por compresión.

Fig. 11. Sistema EGR [27]

del EGR varía según si es un sistema de alta presión o baja presión. La **Fig. 11b** muestra un esquema de ambos sistemas EGR [27]. Por otro lado, en la **Fig. 12** se muestra las gráficas de generación de emisiones y consumo de combustible respecto a la tasa de cambio EGR.

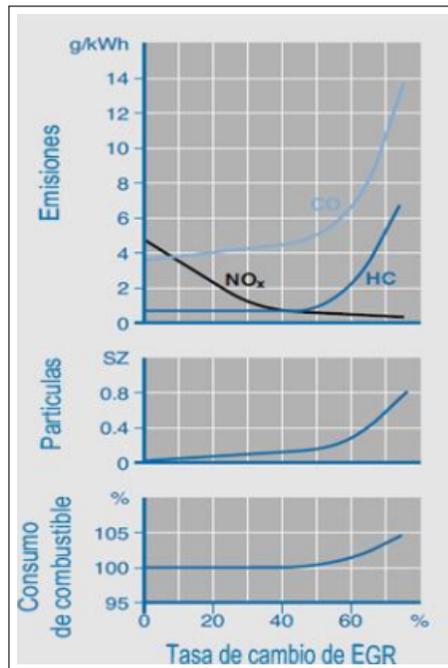
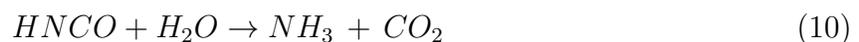


Fig. 12. Influencia de la tasa de cambio EGR en emisiones y consumo de combustible [26].

6) *Filtro de partículas diésel (DPF)*: tiene como principal objetivo capturar el PM y las partículas de hollín que se producen durante la combustión incompleta, algunas de las cuales pueden ser extremadamente pequeñas, de menos de  $1\mu m$ . Este filtro está fabricado principalmente de carburo de silicio o cordierita, y está diseñado con numerosos canales paralelos, mayormente cuadrados, con paredes de espesor típicamente entre 300 y  $400\mu m$ . Cuando las partículas de hollín pasan a través de las paredes, son transportadas por difusión hacia las paredes de cerámica de los poros, donde quedan atrapadas. A medida que el filtro se satura con partículas, se forma una capa de hollín en la superficie de las paredes del canal, lo que requiere una limpieza periódica para mantener su eficacia de filtrado. Este proceso, comúnmente conocido como regeneración, implica la quema del hollín a altas temperaturas, dejando solo residuos mínimos. Se estima que un DPF puede atrapar aproximadamente el 95 % de las partículas contaminantes presentes en los gases de escape [25].

7) *Reducción catalítica selectiva (SCR)*: este sistema utiliza amoníaco ( $NH_3$ ) como agente reductor de los  $NO_x$ , convirtiéndolos en agua y nitrógeno. Esta tecnología fue introducida en Europa en 2006 para vehículos diésel comerciales, permitiendo que los camiones cumplieran con los estándares más recientes, establecidos en las normas Euro 4/IV y Euro 5/V [27].

El SCR, junto con un sensor que detecta los  $NO_x$ , realiza un análisis electrónico para detectar la presencia de este contaminante en los gases de combustión. Cuando se detectan los  $NO_x$ , la ECU ordena la inyección de urea ( $CO(NH_2)_2$ ), la cual sufre sucesivas termólisis (**Ec. 9**) e hidrólisis (**Ec. 10**), de solución de agua y urea.



Al llegar al catalizador, los productos de las reacciones anteriores reaccionan químicamente con los gases para reducir los  $NO_x$ , que se convierte en vapor de agua y nitrógeno. Para

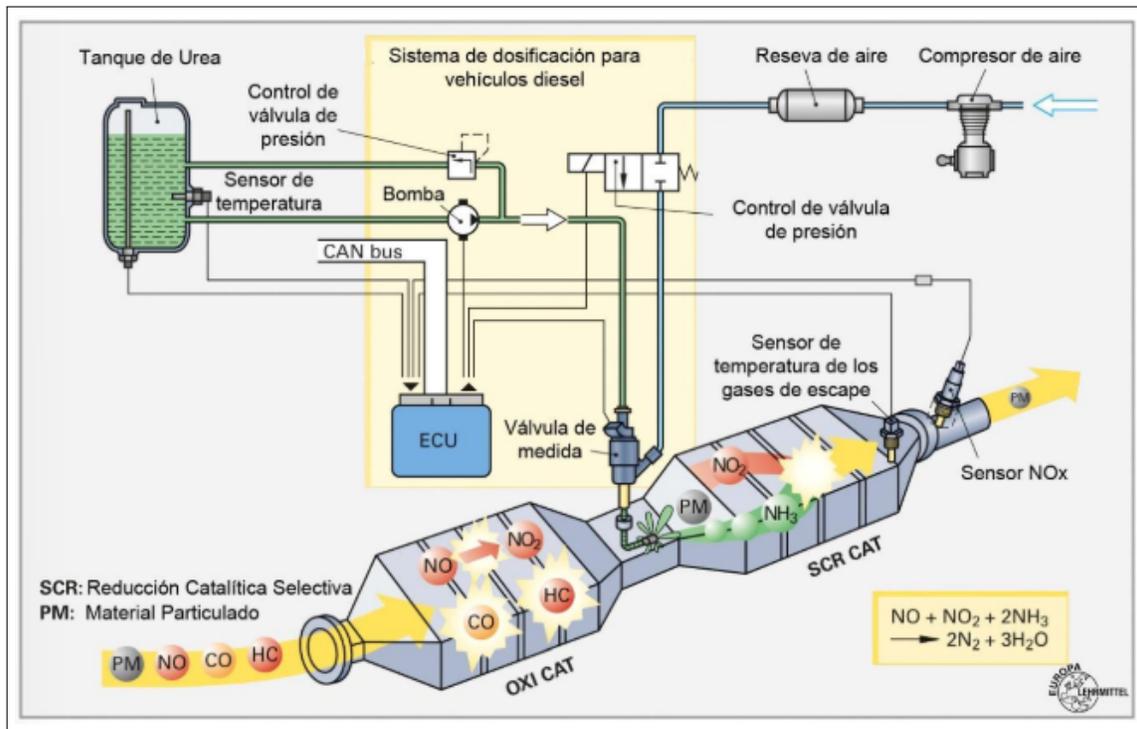
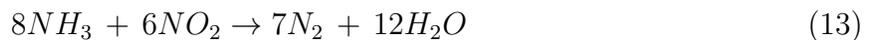
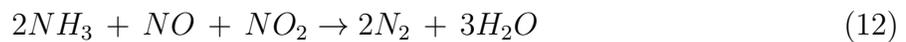
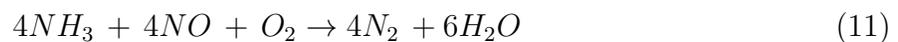


Fig. 13. Sistema SCR [27].

reducir los  $NO_x$  pueden ocurrir tres reacciones químicas, como se muestra a continuación:



La reacción 13 entra en juego cuando la relación  $NO_2/NO$  es mayor a 0,5, ya que ayuda a reducir el  $NO$  restante. Las dos primeras son las que ocurren en mayor proporción, debido a que el  $NO$  tiende a producirse a temperaturas superior a  $1200^\circ C$ , aumentando exponencialmente con la temperatura, gracias a que hay más átomos de oxígeno activados; además, se ve favorecida por la combustión en condiciones pobres. Con este sistema, se logra reducir más del 80% de los óxidos de nitrógeno presentes en los gases de escape. En la **Fig. 13** se muestra un esquema básico de un sistema SCR [28].

V. METODOLOGÍA

Los datos utilizados en este proyecto provienen de investigaciones preliminares realizadas durante los proyectos de FECOC+ como se detalla en la sección III. A partir de estos datos, se dispone de señales de velocidad, consumo de combustible, flujo de aire en la admisión del motor (o flujo de gases de escape en algunos casos), relación aire-combustible, concentraciones volumétricas de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$  y material particulado, tanto en masa PM como en número PN para cada vehículo medido. En la **Fig. 14** se muestra la metodología usada en este trabajo, empleada para el cálculo de los FE, así como el procesamiento y análisis de esos datos con el fin de alcanzar los objetivos planteados. Además se observa que se dividió en 4 etapas, las cuales están identificadas por código de colores.

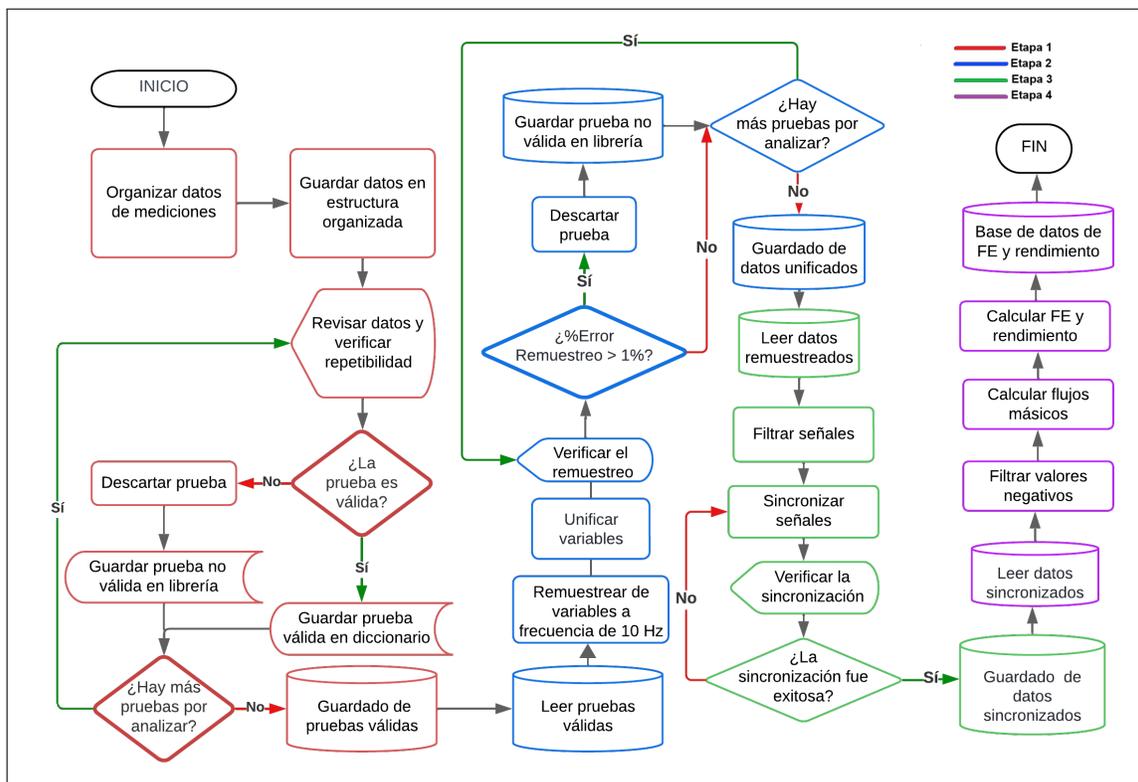


Fig. 14. Metodología.

### A. Etapa 1: Revisión de pruebas

Dentro de los resultados de FECOC+ Fase 2, se cuenta con las mediciones realizadas para las siguientes categorías vehiculares: camiones de 2 ejes pequeños (C2P), camiones de 2 ejes grandes (C2G), tractocamiones (TC) y buses y microbuses (AB). Cada una de estas categorías fue medida a altitudes de 0, 1000 y 2600 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Con el fin de facilitar el procesamiento y la trazabilidad de los datos, se desarrolló una estructura organizada, la cual consistió en varias clasificaciones que permiten acceder fácilmente a cada dato. En la **Fig. 15** se muestra la estructura de manera general.

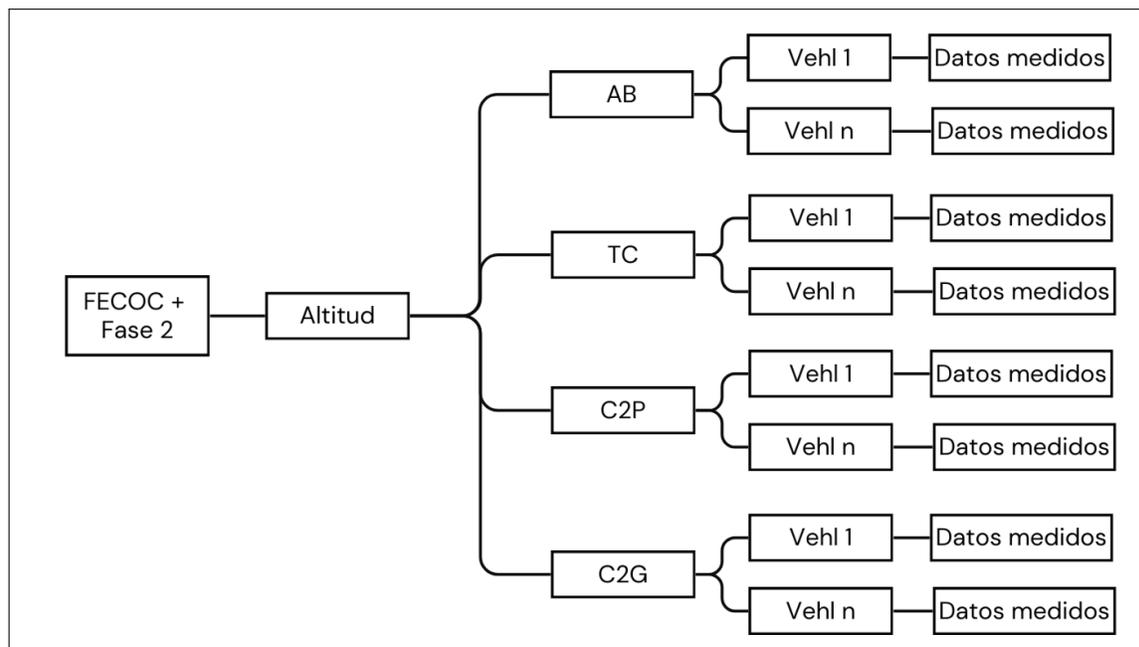


Fig. 15. Estructura de almacenamiento y organización datos medidos FECOC+ Fase 2.

Para el procesamiento de los datos, se utilizó *Python* como herramienta principal. Con esta, se creó una librería con la base de datos de todos los vehículos medidos durante cada fase del proyecto FECOC+. Mediante estructuras de tipo diccionario, se almacenó la información siguiendo la estructura mostrada en la **Fig. 15**, la cual es similar para las categorías vehiculares como motocicletas y vehículos livianos. En este, se almacenó información relevante de cada vehículo, como su cilindrada, kilometraje, modelo, norma de emisión, tipo

de alimentación, tipo de inyección y carga de prueba. Además, también se almacenaron las rutas de acceso a los archivos de datos, separados por prueba realizada.

Una vez almacenados los datos, se realizó la lectura de los archivos utilizando la librería *Pandas* de *Python*. En primera instancia, se verificó que hubiera repetibilidad en las pruebas realizadas y que el ciclo de conducción se hubiera seguido de manera adecuada. Para ello, se graficaron los datos obtenidos a lo largo del tiempo para realizar una comparación visual.

La velocidad (km/h) fue el primer parámetro revisado, puesto que este es el perfil que seguía el conductor durante la prueba. Esto, con el objetivo de verificar que todas las pruebas realizadas siguieran de manera adecuada el ciclo de conducción determinado durante FECOC+ Fase 1 como se menciona en la sección III. A modo de ejemplo, en la **Fig. 16**, se tiene un registro de las señales de velocidad en 10 ciclos de conducción de un vehículo. Se puede ver como todas las pruebas siguen el mismo perfil de velocidad, lo que significa que existe una correlación alta entre las pruebas y el ciclo de conducción que tenía que seguir el conductor, además de garantizar la repetibilidad en las demás variables medidas. Sin embargo, existían casos en los que visualmente se observaba una ligera diferencia en algún tramo de la señal.

Para incluir la verificación para estos casos, se calculó la integral en el tiempo para evaluar qué tan alejados estaban los resultados entre una prueba y otra. A modo de ejemplo, en la **Tabla. 3** se observa que entre pruebas no existe diferencia significativa entre la integral en el tiempo para la señal de velocidad (distancia recorrida por prueba). Lo anterior, se cumplió en la mayoría de vehículos medidos, en caso de que exista diferencia entre las distancias se descartó dicha prueba puesto que esto significa que hubo un error durante la ejecución de esta misma. Además, se verificó la correlación que existía entre cada prueba y la velocidad de referencia, calculando el coeficiente de correlación de Pearson.

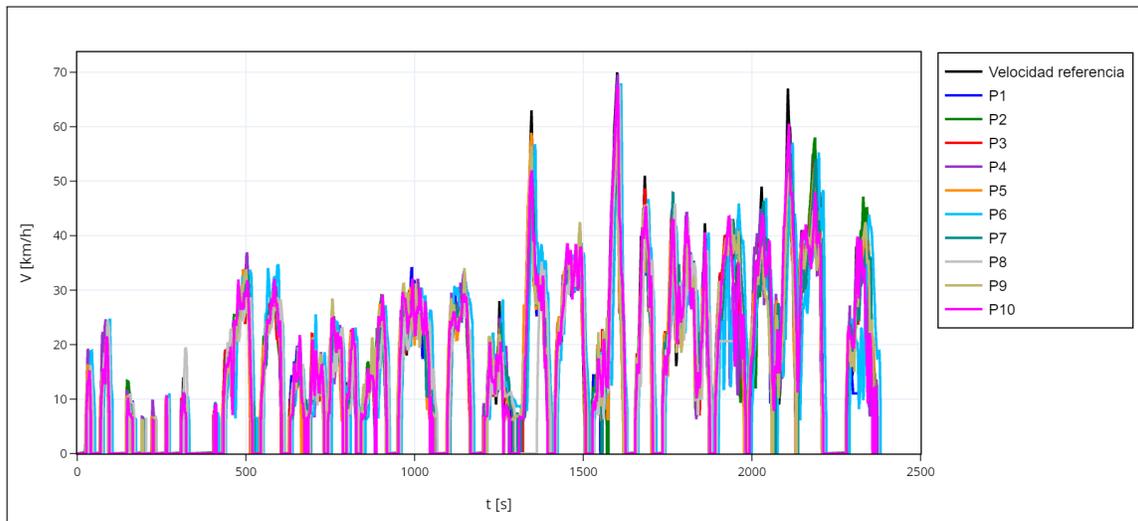


Fig. 16. Perfil Velocidad vs Tiempo ejemplo.

TABLA 3  
COMPARACIÓN ENTRE PRUEBAS MEDIANTE INTEGRAL Y CORRELACIÓN.

Prueba	Distancia [km]	Correlación	Prueba	Distancia [km]	Correlación
P1	9.57	0.967	P5	10.20	0.966
P2	10.16	0.965	P6	10.68	0.941
P3	10.08	0.974	P7	10.16	0.967
P4	10.34	0.950	P8	6.94	0.880

De la misma manera se evaluaron las demás variables para cada categoría. En la **Fig. 17** se muestra un registro de datos de  $NO_2$  medido en 4 ciclos de conducción para un vehículo, donde se aprecia que la  $P4$  se comporta durante los primeros 500 segundos diferente a las demás, por lo que se tomó la decisión de rechazar dicha variable para esa prueba.

Al obtener todas las gráficas y las integrales en el tiempo, se almacenó esta información dentro de la misma estructura de la **Fig. 15** dentro de una carpeta llamada *Revisión pruebas*, con el fin de tener un registro y seguimiento de los datos antes y después de depurar las pruebas. Finalmente, después de una revisión minuciosa de las pruebas que se realizaron para cada vehículo, se registraron los resultados de las pruebas rechazadas en la librería,

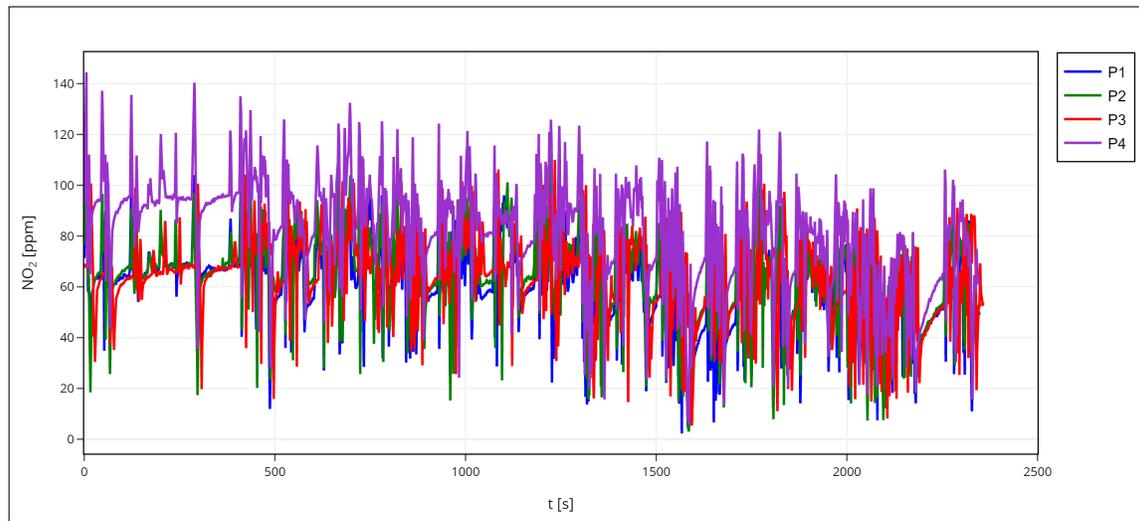


Fig. 17. Prueba rechazada.

para que no se tuvieran en cuenta durante el cálculo de los FE.

### B. Etapa 2: Unificación de pruebas

En esta etapa, se leyeron todas las pruebas disponibles para cada vehículo. Para almacenar la información de manera organizada, se utilizaron diccionarios de *Python*, los cuales permiten acceder a los datos de forma sencilla y práctica. Se tuvieron en cuenta las pruebas no válidas, las cuales se almacenaban en una librería en la etapa anterior, con el objetivo de eliminarlas del entorno, para asegurar que no se incluyeran en el diccionario consolidado de todas las pruebas.

Como se mencionó en la sección III, algunos datos tenían frecuencias de muestreo diferentes producto de la naturaleza de los diferentes sensores utilizados. Por lo tanto, fue necesario reorganizar todos los datos a una frecuencia común de 10 Hz, que fue la máxima frecuencia registrada por todos los sistemas de medición. Luego, se unificaron las variables puesto que ya se tenían todas las señales a una misma frecuencia lo que facilitaba un manejo de intervalos uniforme. Posteriormente, se realizó la comprobación tanto gráfica como por la integral en el tiempo de la señal antes y después del remuestreo. Con el fin de evitar

variaciones significativas en las señales se estableció un umbral de 1%, cualquier prueba remuestreada que superara este umbral se almacenaba en la librería de pruebas no válidas.

En la **Fig. 18** se observa en color azul la curva original, y en puntos negros se representa el reprocesado a una frecuencia mayor. Se verificaba visualmente que los puntos donde existiera un cambio de concavidad no se vieran afectados por el remuestreo, ya que esto afecta significativamente el valor de la integral. Además, en la **Tabla. 4** se observan los errores porcentuales al evaluar la integral original respecto a los valores remuestreados. Para ese vehículo no se rechazó ninguna prueba, puesto que no se superó el umbral. Los valores que aparecen con el valor de  $-1,00$  corresponden a pruebas rechazadas en la primera etapa.

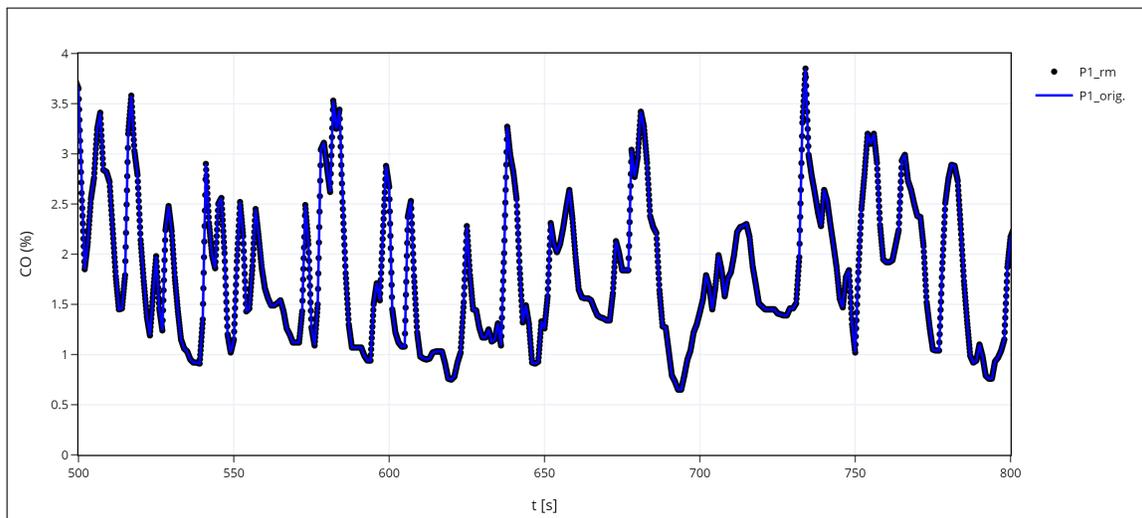


Fig. 18. *CO para una prueba remuestreada.*

Con el remuestreo ya revisado, se guardaron los datos para cada prueba de un vehículo en un *DataFrame* de *Python* para guardarlos en un diccionario que seguía la misma estructura organizada que se estableció en la etapa 1. Al finalizar esta etapa se guardó el diccionario resultante en un archivo de tipo *Pickle*, el cual es un formato utilizado en *Python* para serializar y almacenar objetos de manera que puedan ser recuperados al estado anterior, en caso de ser necesario. Este archivo es el que se leía en la etapa posterior.

TABLA 4  
ERRORES POR REMUESTREO.

<b>Prueba</b>	$CO_2$ [%]	$CO$ [%]	$NO$ [%]	$HC$ [%]	$NO_2$ [%]
P1	-1.00	0.34	-1.00	0.46	-1.00
P2	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
P3	0.14	0.16	0.04	0.17	0.23
P4	0.04	0.04	0.02	0.04	0.07

### *C. Etapa 3: Filtrado y sincronización de señales*

Debido a la naturaleza dinámica de las mediciones y a las vibraciones presentes, así como a diversos factores eléctricos, es común que las señales contengan un ruido significativo. Este ruido puede provocar fluctuaciones en la señal, tanto positivas como negativas durante el mismo evento, lo que genera señales parásitas y dificulta la interpretación precisa de los datos. Por esto, se realizó un proceso de filtrado para las señales de velocidad, flujo de aire y relación aire-combustible, puesto que se consideraron las variables más importantes del proceso. La velocidad debido a que es la que se usa como guía para la realización de las pruebas, flujo de aire porque influye directamente en la combustión y, por lo tanto, en las emisiones; y la relación aire-combustible, ya que es crucial para calcular el consumo de combustible y el flujo de gases de escape en los casos en los que se midió el flujo de aire en la admisión.

Se utilizó un filtro de Savitzky-Golay, el cual sirve para mejorar la continuidad de la señal y conservar las características de la distribución inicial tales como máximos y mínimos, eliminando los cambios bruscos en la pendiente de la señal producto de las fluctuaciones generados por el ruido. Para la implementación del filtro es necesario establecer una ventana de datos, debido a que el filtro procesa los datos en un bloque de muestra del tamaño de la ventana usando suavizado de mínimos cuadrados [29].

Fue necesario distinguir dos procesos de filtrado, un filtrado para el cálculo de los FE

y rendimiento de combustible, debido a que se necesita datos más precisos y estables; y otro filtrado para sincronización de las señales, debido a que el objetivo principal es asegurar que las señales estén correctamente alineadas en el tiempo para poder compararlas y analizarlas de manera adecuada. Para el caso de filtrado para cálculos se usó una ventana de 25 datos para la velocidad, para el flujo de aire y relación aire-combustible se usó una ventana de 21 datos. Para efectos de sincronización se usaron las mismas ventanas para la velocidad y relación aire-combustible, mientras que para el flujo de aire se usó una ventana de 31 datos. En la **Fig. 19** se observa el flujo de aire antes y después de aplicarle el filtro. Luego de este proceso se almacenaban los datos filtrados en un diccionario para guardarlos en un archivo *.pickle* para continuar con la sincronización

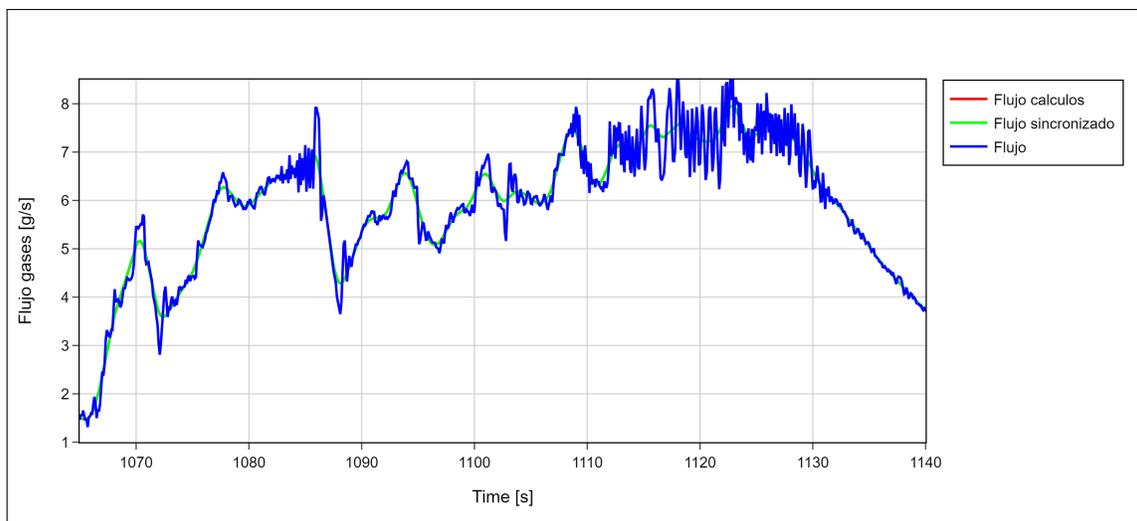


Fig. 19. *Filtrado flujo de aire.*

Para iniciar el proceso de sincronización se cargaba el archivo *.pickle* que contenía los datos ya filtrados. Las señales que entregaba cada sensor tenían diferencias en el tiempo de respuesta, esto es debido a el principio de funcionamiento y configuraciones propias de cada uno. Además, el desfase es común cuando se realizan mediciones a bordo, producto de la falta de sincronización para iniciar la toma de datos en los diferentes equipos de medida, así como un retraso natural debido al transporte de los contaminantes desde el motor hasta la salida del tubo de escape, y desde ese punto hasta el lugar donde se colocaban los equipos de

medida de emisiones, el cual era el tramo final del tubo de escape. Esto causa que los comportamientos de una señal no correspondan al mismo instante de otra, lo que se evidencia por ese desfase.

El perfil de velocidad del ciclo es el que rige el comportamiento de todas las variables medidas, por lo que se espera que las señales medidas de las emisiones contaminantes, flujo de aire y combustible presenten una correlación alta con ese perfil de velocidad, lo que significa tener un comportamiento similar a la velocidad durante todo el ciclo, y permitiendo diferenciar de manera clara entre los instantes en los que el vehículo sale de un estado de ralentí. Cuando la velocidad del vehículo aumenta, el motor requiere más energía. Como resultado, tanto el flujo de aire en la admisión como el flujo de combustible deben incrementarse, siendo este último en mayor proporción. Este aumento en el consumo de combustible se traduce en una mayor cantidad de productos de combustión en el escape, evidenciando un incremento de emisiones en el mismo momento en que el vehículo acelera. Por lo tanto, queda claro que hay una fuerte correlación entre el perfil de velocidad y el comportamiento de las variables de emisiones y consumo de combustible.

En la **Fig. 20** se muestra un ejemplo de una prueba realizada para un vehículo, en la cual las variables no están sincronizadas. Se observa cómo los cambios súbitos en las emisiones ocurren segundo después de que la velocidad aumenta, alrededor de los 20 segundos, lo que destaca la necesidad de una sincronización precisa. Cabe resaltar que la relación aire-combustible tiene un comportamiento inverso al de las demás variables. Esto se debe a que, cuando se inyecta más combustible a la cámara de combustión, producto de un evento de aceleración, se está aumentando la fracción de combustible que se tiene en la mezcla.

Si se tienen desfases a la hora de calcular los factores de emisión, con base en las ecuaciones de la sección A, se generan errores sistemáticos en los flujos instantáneos, producto de la no correspondencia de el flujo másico de los gases de escape con la concentración del contaminante para un instante dado. Esto afecta el el error asociado al calculo del factor de

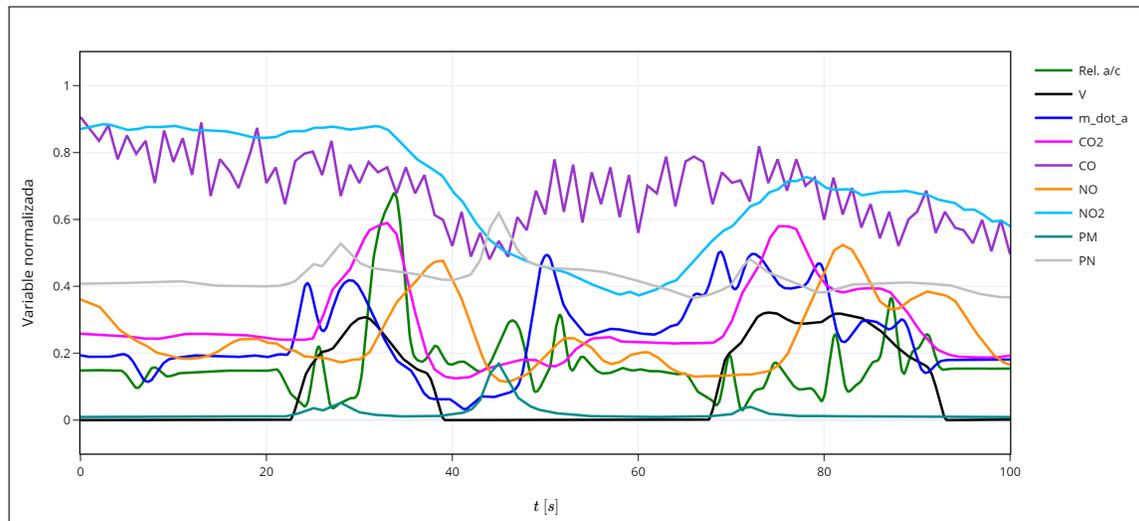


Fig. 20. Mediciones sin sincronizar.

emisión final. Por lo que resulta necesario realizar un proceso de sincronización que permita mejorar la confiabilidad las variables medidas en cualquier instante de tiempo.

El proceso para llevar a cabo la sincronización entre la velocidad y las emisiones contaminantes, consiste en determinar el desfase temporal entre ellas, al comparar ambas curvas en un evento de aceleración súbita, es decir, cuando el vehículo sale de un estado de marcha mínima o baja carga, y el momento en el que éste experimentaba un transitorio de aceleración significativo. Para todas las categorías, el primer transitorio de carga se usó como referencia, el cual se da después de un corto periodo en ralentí, por lo que es fácil de identificar. Para hacerlo, en ese tramo donde ocurría el transitorio se buscaba un cambio de signo significativo en la primera derivada de la señal de velocidad y se tomó ese punto como referencia. De la misma manera, se buscó ese punto para las demás señales, y a partir de la diferencia que existía entre este y el punto de referencia se calculaba el desfase que había entre la velocidad y emisiones. Estas últimas se desplazaban hacia la derecha (desfase positivo) o hacia la izquierda (desfase negativo) de tal manera que quedaran sincronizadas.

En la **Fig. 21** se observa la prueba mostrada anteriormente ya sincronizada. Se evidencia como los cambios súbitos inician en el mismo punto en el que comienza el transitorio

para la velocidad. Además, se aprecia el efecto del cambio de marcha del vehículo, ya que antes de cada aceleración súbita se genera una pequeña reducción en la velocidad que dura unos pocos segundos. Estos eventos causan también una reducción en la emisiones, ya que durante ellos se suelta completamente el acelerador. Se observa como a pesar de realizar la sincronización a partir de un solo punto de referencia, quedan sincronizadas las señales para esos casos. Al final de esta etapa se guardaban los datos en un archivo *.pickle*.

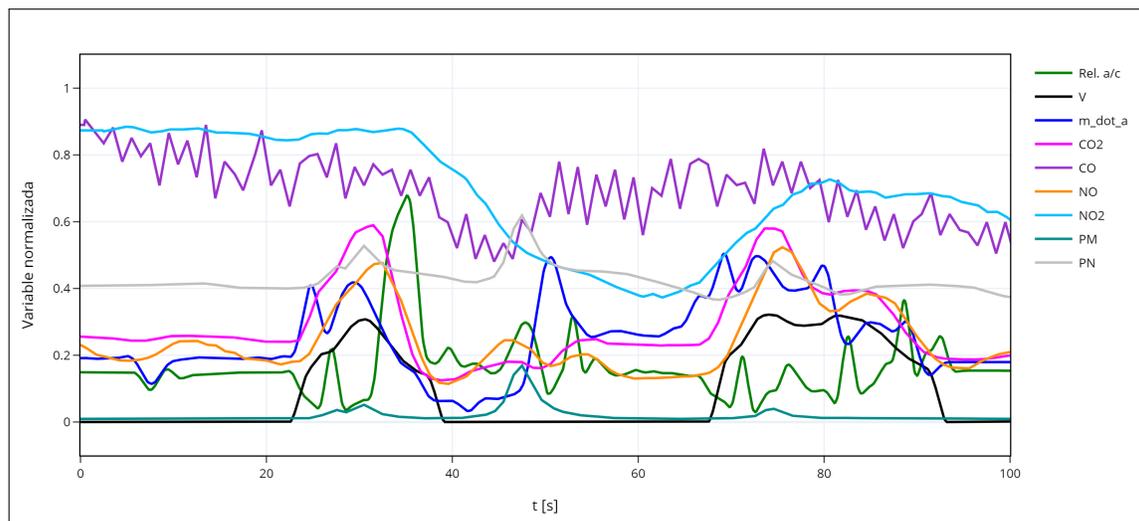


Fig. 21. *Mediciones sincronizadas.*

A pesar de que visualmente la sincronización es bastante aceptable, este no deja de ser un método manual y sujeto a error humano, puesto que algunas veces el algoritmo no encontraba un punto candidato en las señales que evidenciara de manera clara ese cambio súbito, como se muestra en la **Fig. 22**, por lo que era necesario ajustarlo visualmente, lo que dificultó la automatización del algoritmo. Por lo anterior, se propone utilizar la metodología de sincronización por desfase estático [30], partiendo de los datos que se sincronizaron con el método anterior.

Para la sincronización estática, se parte del supuesto de que el desfase que presentan los sensores debido a su funcionamiento propio y a variables externas es constante durante toda la prueba. Por lo tanto, puede corregirse desplazando las señales hacia delante o hacia

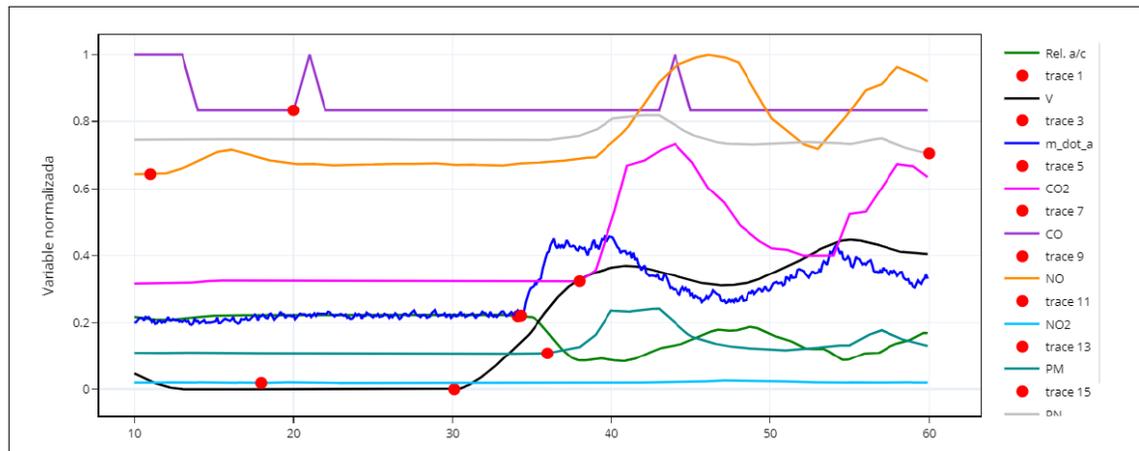


Fig. 22. Puntos críticos localizados en una prueba.

atrás en el tiempo, según sea necesario. El objetivo es lograr la mayor correlación posible entre el flujo de aire y las concentraciones de gases contaminantes, debido a que el flujo de aire sigue muy afín la distribución del perfil de velocidad de cada ciclo. Basándose en este principio, primero se itera un parámetro que representa el desfase estático dentro de un rango de 5 segundos antes y después del punto que se seleccionó en la sincronización pasada, buscando maximizar la correlación entre la señal de flujo de aire y la de velocidad, asegurando así que la primera coincidiera con el ciclo de conducción. Posteriormente, se aplica el mismo proceso para cada contaminantes en relación con el flujo de aire. Al final de este proceso se guardaron los datos sincronizados y refinados en un archivo *.pickle*.

#### D. Etapa 4: Cálculo de factores de emisión

En esta etapa se cargaban los resultados de la fase anterior, donde se garantizó la confiabilidad de los datos, y se procedió con el cálculo de los factores de emisión utilizando las ecuaciones planteadas en la sección A. Los flujos instantáneos de cada variable medida se guardaban en un archivo *.pickle*. Además, los factores de emisión, junto con información específica de cada vehículo como cilindrada, kilometraje, modelo, norma de emisión, tipo de alimentación, tipo de inyección y carga de prueba, se almacenaban en un archivo *Excel*. Este archivo consolidaba la base de datos de factores de emisión y consumo de combustible para el sector de transporte terrestre carretero en Colombia.



## VI. RESULTADOS

*A. Base de datos única de factores de GEI, gases y partículas, y consumo de combustible.*

La base de datos cuenta con los factores de emisión (FE) y rendimiento de combustible de las categorías vehiculares de transporte terrestre más representativas de Colombia. En ella se encuentran vehículos livianos, motocicletas, camiones de dos ejes grande (C2G), camiones de dos ejes pequeños (C2P) y autobuses (AB). En la **Tabla. 5** se muestra el número de vehículos que se midieron por cada categoría y altitud.

TABLA 5  
NÚMERO DE VEHÍCULOS MEDIDOS.

Categoría	0 msnm	1000 msnm	1500 msnm	2600 msnm
AB	5	3	0	6
C2G	4	3	0	6
C2P	4	4	0	4
TC	4	4	0	4
Vehículos livianos	2	0	32	2
Motocicletas	2	0	42	2

Cada categoría fue seleccionada para asegurar una muestra representativa del mercado automotor colombiano. Esta representatividad es fundamental para obtener datos precisos y fiables sobre los FE y el rendimiento de combustible. La selección de muestras consideraba la diversidad del parque automotor colombiano, incluyendo diferentes tipos de vehículos y tecnologías presentes en el país. De esta manera, se garantiza que los resultados del estudio reflejen fielmente las condiciones reales del transporte terrestre en diversas regiones y altitudes de Colombia. En la **Fig. 23** se presenta un resumen de las categorías medidas en función de su cilindrada y año de modelo.

Otro parámetro clave para determinar los factores de emisión es la capacidad. En la

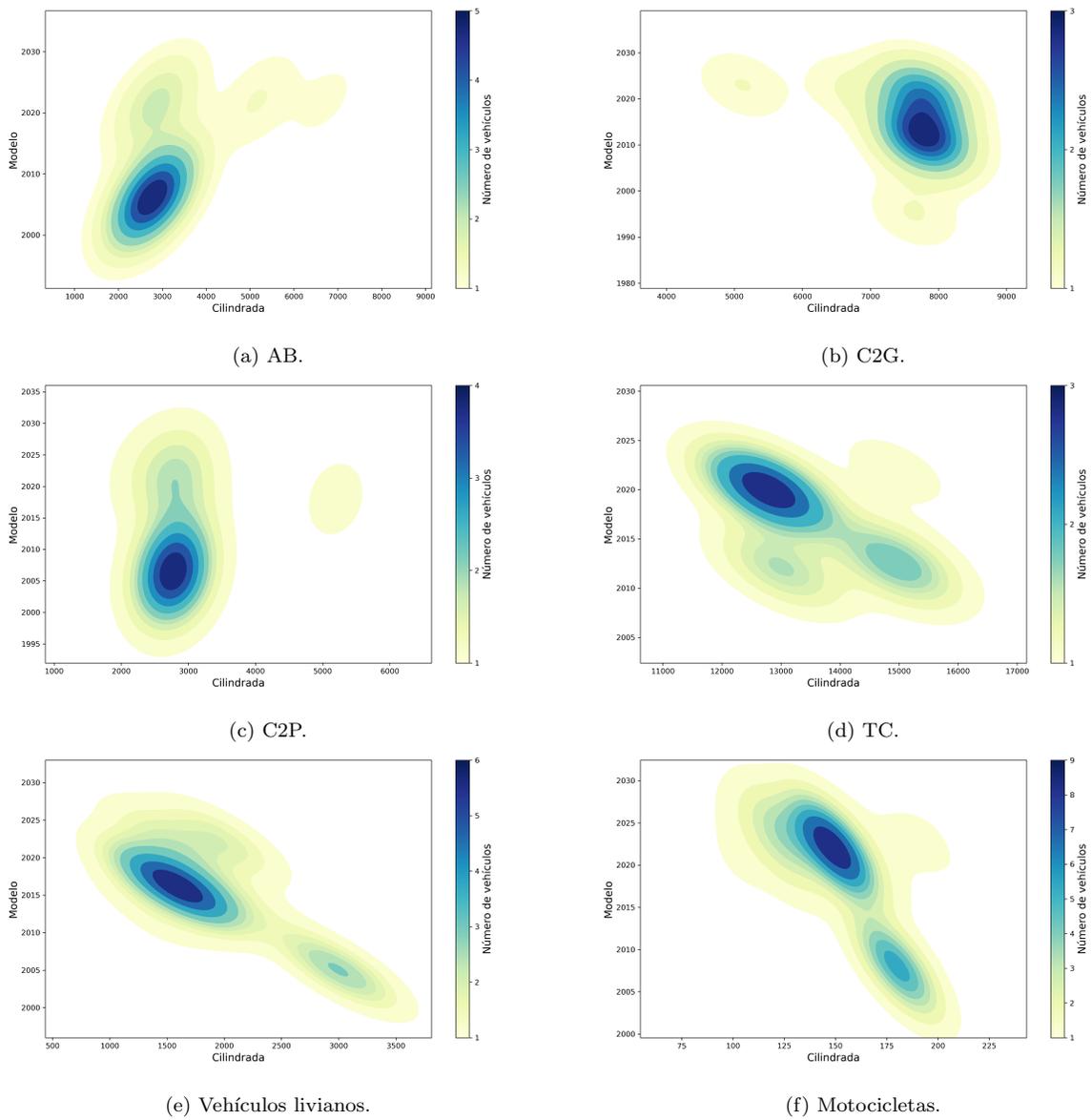


Fig. 23. Diagrama de calor de la representatividad de las muestras por modelo y cilindrada.

**Fig. 24** se presenta la distribución por modelo y peso bruto vehicular para las categorías de transporte de carga, que incluyen C2P, C2G y TC. Para la categoría de transporte de pasajeros (AB), se muestra la distribución de vehículos medidos por modelo y número de pasajeros.

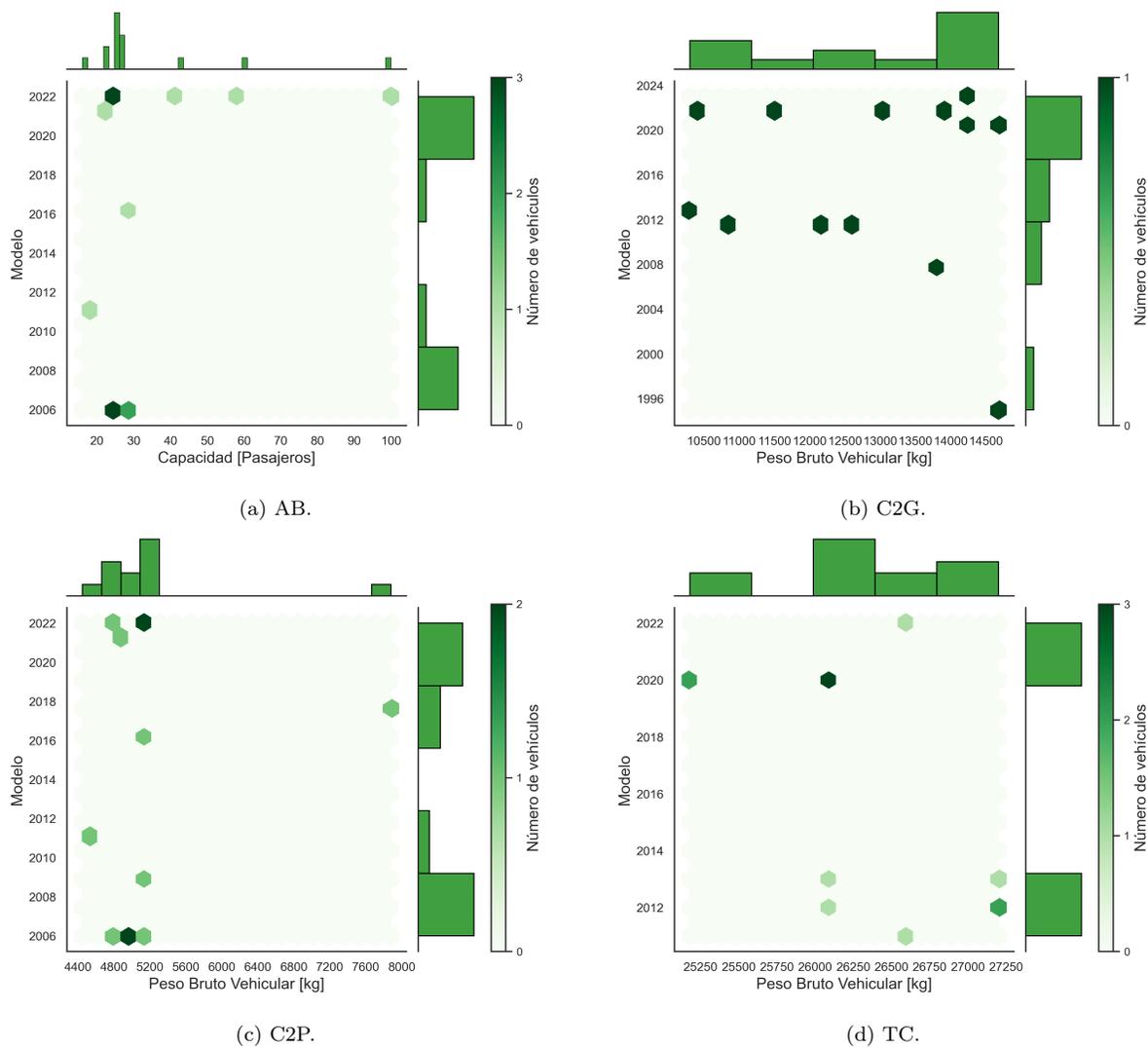


Fig. 24. Diagrama de calor de la representatividad de las muestras por modelo y capacidad.

En la **Fig. 25** se presenta el consumo de combustible en L/100 km para diferentes categorías de vehículos. Se observa que las motocicletas presentan el menor consumo, con 2.74 L/100 km, lo que las posiciona como la opción más eficiente en términos de consumo de combustible. En contraste, los tractocamiones (TC) tienen el consumo más alto, alcanzando 57.28 L/100 km. Esto se debe a su mayor tamaño y capacidad de carga. Los vehículos livianos y los camiones de dos ejes (C2G) presentan consumos intermedios de 12.90 y 35.31 L/100 km, respectivamente. Es importante notar que el consumo de combustible aumenta con el tamaño y la capacidad de carga del vehículo. Además, los resultados permitieron comprobar

que el ciclo de conducción de buses es más transitorio (contiene mayor número de arranques/paradas) que el de camiones, por lo que el consumo de combustible aumentó frente al de los camiones livianos (C2P).

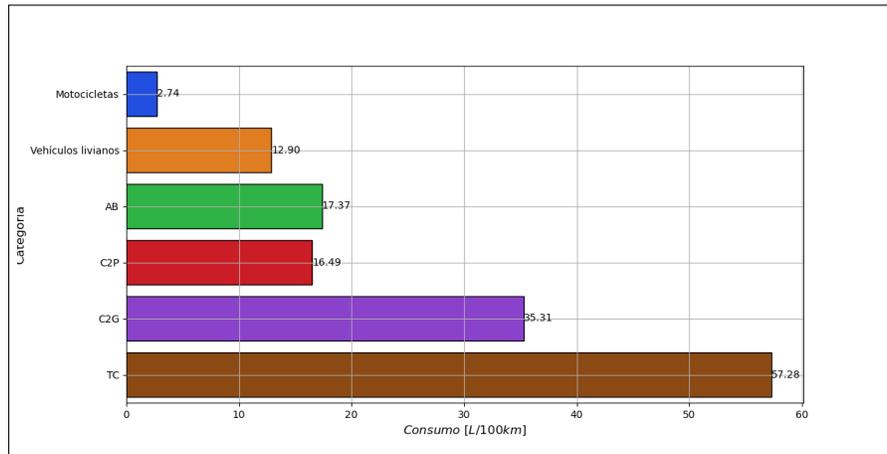


Fig. 25. Consumo de combustible (L/100km) para todas las categorías.

La **Fig. 26**, muestra el consumo de combustible por tonelada de carga (L/100 km-ton). Aquí, se evidencia que los camiones de dos ejes pequeños (C2P) presentan el mayor consumo con 3.18 L/100 km-ton, seguido de los camiones de dos ejes grandes (C2G) con 2.82 L/100 km-ton. Los tractocamiones (TC) tienen el menor consumo relativo, con 2.18 L/100 km-ton. Este análisis resalta la eficiencia relativa de los tractocamiones cuando se considera su capacidad de carga, sugiriendo que, aunque tienen un alto consumo absoluto, son más eficientes en términos de transporte de carga. Por lo tanto, no resulta conveniente atomizar el transporte de repartición, ya que se consumiría mucho más combustible para mover menos carga.

La **Fig. 27** muestra los factores de emisión de  $CO_2$  en g/km para diferentes categorías de vehículos. Las motocicletas presentan el menor valor con 146.87 g/km, seguidas de los vehículos livianos con 312.70 g/km. Los camiones de dos ejes pequeños (C2P) y grandes (C2G) muestran valores intermedios con 418.18 g/km y 902.66 g/km, respectivamente. Los tractocamiones (TC) tienen el valor más alto con 1467.18 g/km. Esto indica que, a medida

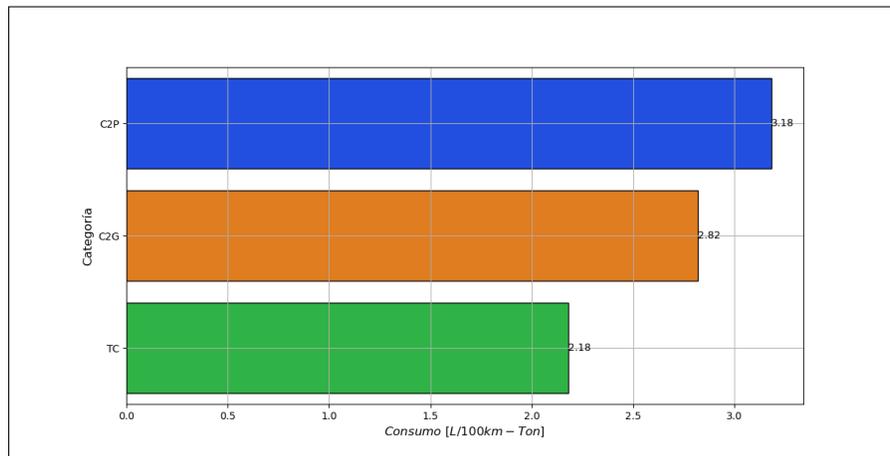


Fig. 26. Consumo de combustible (L/100km-Ton) para todas las categorías.

que aumenta el tamaño y la capacidad de carga del vehículo, también lo hace la emisión de CO<sub>2</sub>, reflejando la mayor demanda de combustible de los vehículos más grandes y pesados. Al igual que con el consumo de combustible, los buses emitieron más CO<sub>2</sub> que los C2P, debido a que el ciclo de buses es más transitorio.

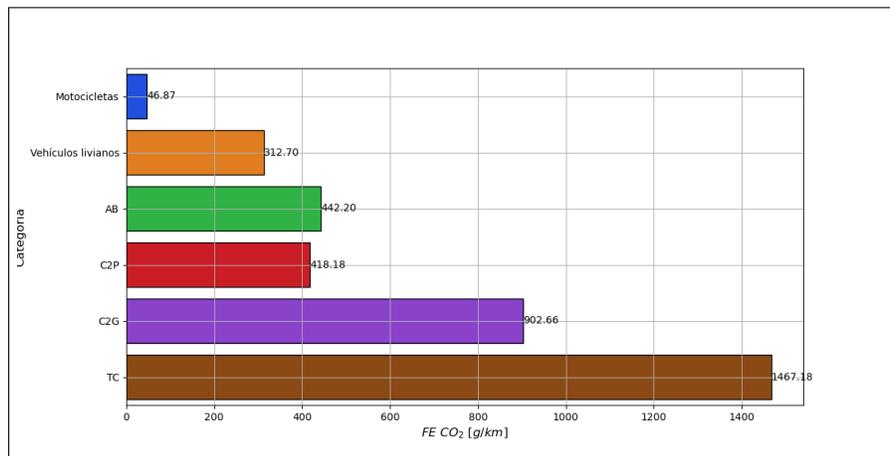


Fig. 27. FE CO<sub>2</sub> para todas las categorías.

En la **Fig. 28** se presentan los factores de emisión de CO en g/km. Las motocicletas y los vehículos livianos presentan emisiones relativamente altas con 5.50 y 2.38 g/km, respectivamente. Cabe destacar que las motocicletas, a pesar de tener cilindradas mucho más pequeñas, alcanzan estos valores de emisión debido a la menor eficiencia de combustión de sus

motores. Además, los motores más pequeños pierden temperatura mucho más rápido, lo que empeora aún más la eficiencia de combustión. Los tractocamiones (TC) y los camiones C2G presentan emisiones significativamente más altas con 13.69 y 9.09 g/km, respectivamente. Estos resultados indican que a mayor cilindrada mejor es la eficiencia de combustión debido a que disminuyen las pérdidas de calor con el tamaño, y por tanto menores las emisiones de CO.

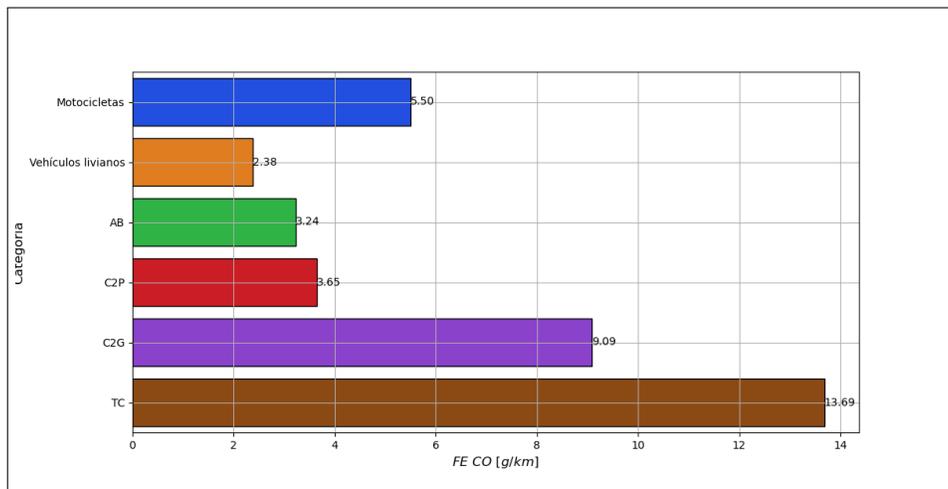


Fig. 28. FE CO para todas las categorías.

La comparación de los factores de emisión (FE) de  $NO$ ,  $NO_2$  y  $NO_x$  (Fig. 29, 30 y 31) en g/km para diferentes categorías de vehículos muestra una tendencia clara: los tractocamiones (TC) tienen las emisiones más altas en todas las categorías de óxidos de nitrógeno, con valores de 10.92 g/km para  $NO$ , 0.93 g/km para  $NO_2$  y 11.84 g/km para  $NO_x$ . Los camiones de dos ejes grandes (C2G) y pequeños (C2P) presentan valores moderados, mientras que las motocicletas y los vehículos livianos tienen las emisiones más bajas. Estos resultados indican que los vehículos más grandes y pesados, y que además funcionan con diésel, emiten significativamente más óxidos de nitrógeno, lo que resalta la necesidad de mejorar las tecnologías de control de emisiones para estos tipos de vehículos para reducir su impacto ambiental.

La Fig. 32 muestra los factores de emisión (FE) de hidrocarburos (HC) en g/km para diferentes categorías de vehículos. Se observa que los autobuses (AB) y los camiones

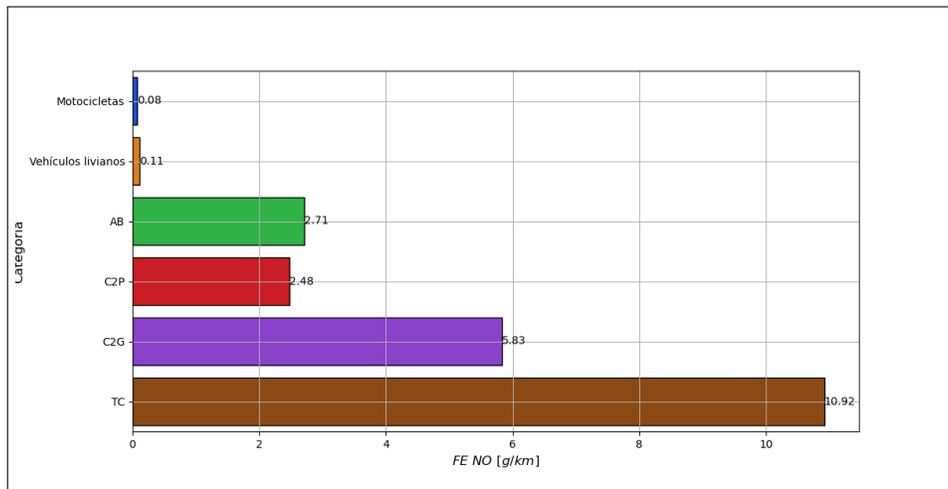


Fig. 29. FE NO para todas las categorías.

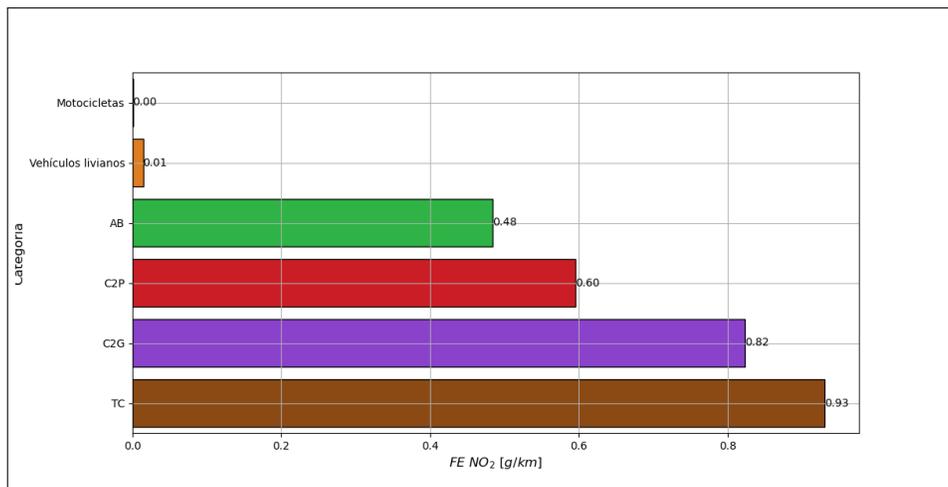


Fig. 30. FE NO<sub>2</sub> para todas las categorías.

de dos ejes pequeños (C2P) presentan las emisiones más altas de HC con 3.39 g/km y 3.13 g/km, respectivamente. Estos valores elevados podrían atribuirse a condiciones operativas específicas y a la eficiencia de los sistemas de postratamiento en estos vehículos. Aunque los motores diésel típicamente emiten menos HC que los motores de gasolina, en estos casos específicos, las condiciones de carga y las características del ciclo de conducción pueden influir en las emisiones de HC. Por otro lado, los tractocamiones (TC) y camiones de dos ejes grandes (C2G) tienen FE de HC de 1.14 g/km y 1.08 g/km respectivamente, posiblemente debido a una mejor eficiencia de combustión y a sistemas de postratamiento más efectivos.

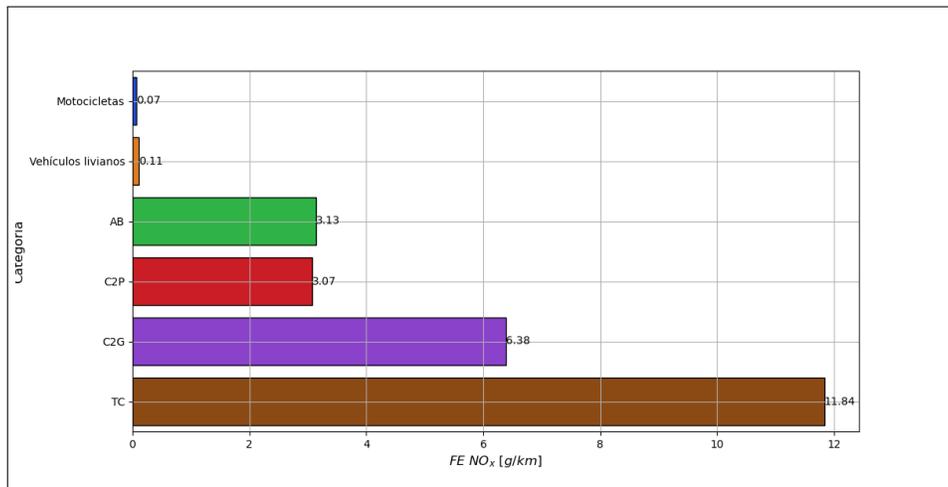


Fig. 31. FE NO<sub>x</sub> para todas las categorías.

Las motocicletas presentaron emisiones más altas que los vehículos livianos, a pesar de tener menores cilindradas, mostraron emisiones de HC de 0.44 g/km y 0.11 g/km respectivamente, lo que también puede deberse a la eficiencia de los sistemas de control de emisiones y las características de sus motores de combustión interna.

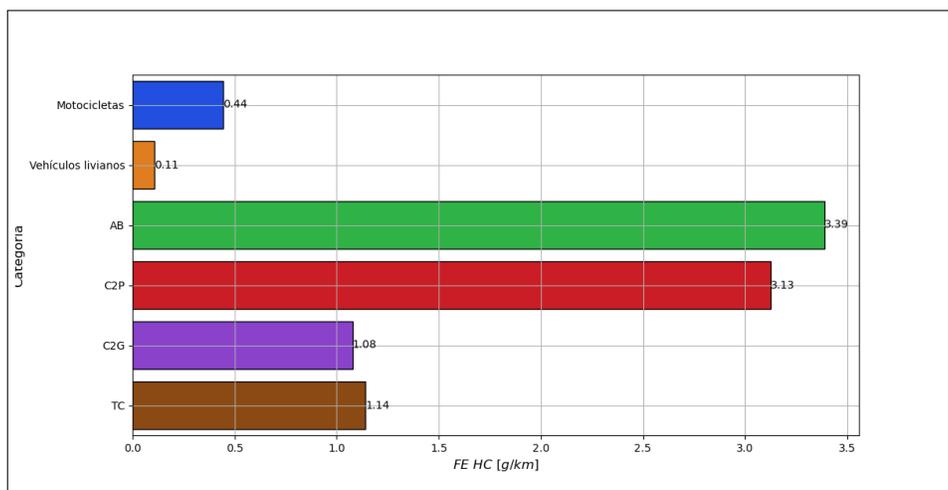


Fig. 32. FE HC para todas las categorías.

En las **Fig. 33** y **34** se observan los factores de emisión de partículas en número (PN) y masa (PM) para diferentes categorías de vehículos. Las motocicletas y los vehículos livianos, que funcionan a gasolina, muestran los valores más bajos de PN y PM. Probablemente, estas

partículas se forman en la cámara de combustión por el aceite lubricante que no alcanza a quemarse, ya que la combustión premezclada de mezclas gasolina/aire, o gasolina mezclada con etanol + aire, no suele formar material particulado sólido. En contraste, los camiones de dos ejes grandes (C2G) y los tractocamiones (TC) tienen las emisiones más altas, con los TC alcanzando hasta  $165,78 \times 10^{12}$  partículas/km y 160.66 g/km respectivamente. Estas cifras destacan la necesidad de implementar tecnologías de control de emisiones más efectivas en vehículos de mayor tamaño y capacidad de carga para reducir significativamente las emisiones de partículas.

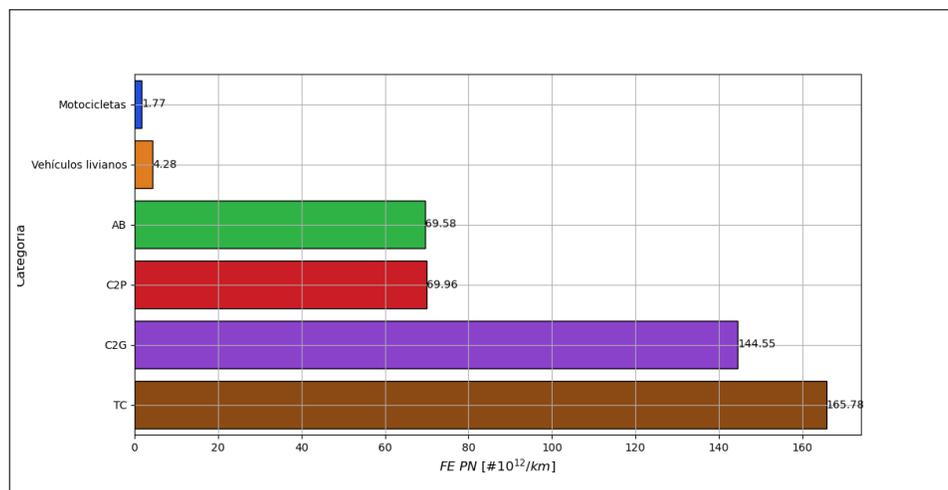


Fig. 33. FE PN para todas las categorías.

Finalmente, con ayuda de *Python*, se diseñó una aplicación que permite navegar de manera dinámica e interactiva a través de toda la base de datos que se obtuvo tras aplicar la metodología. En el anexo A se muestra una descripción más detallada de la aplicación. Los resultados consolidados de la base de datos se encuentran en el adjunto *CONSOLIDADO.FECOC.xlsx*.

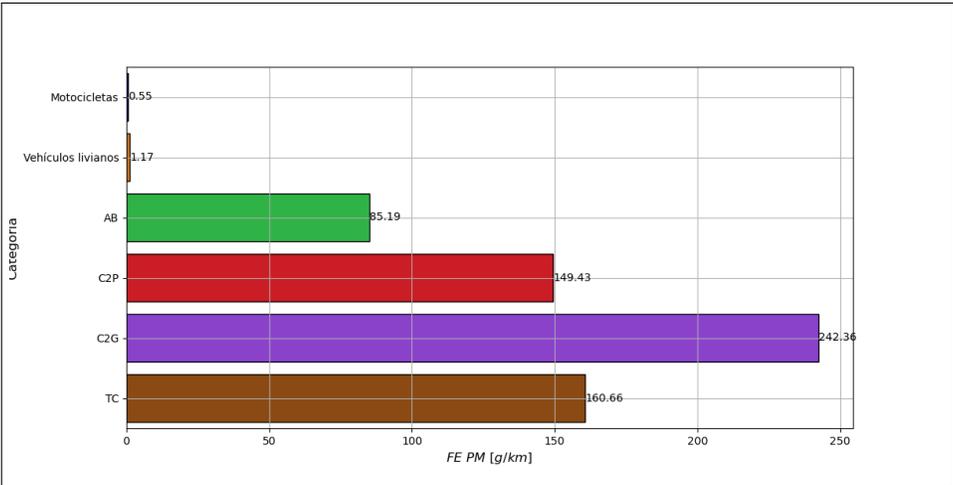


Fig. 34. FE PM para todas las categorías.

### *B. Efecto de la altitud sobre los factores de emisión y el consumo de combustible*

En un estudio en 2023, Qi et al [31], analizaron los factores de emisión de  $CO_2$ ,  $CO$  y  $NO_x$  de vehículos ligeros diésel y de gasolina a diferentes altitudes en la meseta de Qinghai-Tíbet, utilizando un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS). Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones reales de conducción en una ruta que cubre una distancia total de 467 km desde Chengxi District, Xining City, Qinghai Province (2270 m.s.n.m) hasta la estación de peaje en Maduo County, Golog Prefecture (4540 m.s.n.m). Los autores encontraron que los factores de emisión de  $CO_2$ ,  $CO$  y  $NO_x$  para vehículos diésel variaban en el rango de 161,83 – 195,54 g/km, 0,59 – 0,77 g/km y 4,61 – 6,58 g/km, respectivamente, mientras que para vehículos de gasolina variaban en 161,66 – 181,98 g/km, 0,95 – 1,06 g/km y 0,12 – 0,25 g/km, respectivamente. El estudio reveló que las emisiones aumentaban con la altitud, siendo la presión atmosférica el principal factor ambiental que influye en las emisiones, y se observó una relación cuadrática entre la aceleración del vehículo y las emisiones de  $CO_2$ . Otro factor que influyó en la variación de las emisiones de  $NO_x$ , puesto que con el aumento de altitud, hubo una tendencia estable a la baja en la humedad del aire. Los autores afirman que, el aumento de la humedad del aire reduce la temperatura de combustión del motor, lo que da como resultado a emisiones de  $NO_x$  más pequeñas a altitudes más bajas. Además, mencionan que los motores de cilindradas más pequeñas son generalmente más eficientes, y se adaptan más fácilmente a las condiciones de aire delgado en áreas de gran altitud.

Por otro lado, Huang et al. en 2023 [32], señalaron que los motores turboalimentados pueden compensar parcialmente la menor densidad del aire, aunque esto también puede incrementar el consumo de combustible. De igual manera, en 2018 Varella et al. , compararon los PEMS con equipos de laboratorio y encontraron que los factores de emisión de los vehículos tienden a aumentar con la altitud, principalmente debido a la reducción de la eficiencia de la combustión causada por la menor concentración de oxígeno.

Una de las razones que causa el deterioro de la combustión en el cilindro de los moto-

res, es que a mayores altitudes hay menor presión atmosférica, lo que reduce la concentración de oxígeno disponible para la oxidación del  $CO$ . Según Gao et al. [33] y Zhou et al. [34], la presión atmosférica disminuye en 100 Pa por cada incremento de 9,5 metros en altitud, lo que implica una menor concentración de oxígeno para la combustión completa del combustible. Además, una menor presión en el cilindro a altas altitudes provoca que la forma del chorro de combustible se alargue y adelgace, lo que lleva a una mezcla deficiente de aire y combustible, que resulta en una combustión incompleta y liberación de una gran cantidad de  $CO$  [35]. Otros estudios, como los de Benjumea et al. y Yin et al, indican que una mayor temperatura de escape a altas altitudes favorece la oxidación de hidrocarburos y hollín en los gases de escape, aumentando así las emisiones de  $CO$  [36, 37].

En 2018, Wang y colaboradores [38], reportaron un estudio experimental donde midieron las emisiones de  $CO_2$  y otros contaminantes de un vehículo diésel ligero certificado bajo la norma China IV (equivalente a Euro VI/6) en varias altitudes en China, incluyendo Beijing, Lanzhou, Kunming y Xining. Para ello usaron un PEMS durante pruebas de conducción real (RDE). Según estos autores, las emisiones de  $CO$  aumentaron un 209 % a 2990 metros en comparación con el nivel del mar, siguiendo la secuencia de emisiones separadas por tránsito urbano > rural > autopista. También observaron un incremento en las emisiones de partículas ( $PN$ ) a mayores altitudes, mientras que las emisiones de  $NO_x$  mostraron una tendencia decreciente a altitudes extremadamente altas, probablemente debido a la disminución de la concentración de oxígeno. Por otro lado, en 2020, Wang y colaboradores realizaron pruebas en vehículos a diferentes altitudes utilizando ciclos de prueba armonizados a nivel mundial para vehículos ligeros (WLTC) y el método de ventana de promediado móvil (MAW) para calcular las emisiones RDE. Encontraron que las emisiones de  $CO_2$  disminuían con la altitud debido a la menor resistencia del aire. En particular, encontraron que por cada 1000 m de aumento de altitud, las emisiones de  $CO_2$  disminuían en un 5,31 % para vehículos de aspiración natural [39].

Sin embargo, en la literatura existen otros trabajos que mencionan que no hay cam-

bios en la emisión de GEI  $CO_2$ , el consumo de combustible y las emisiones reguladas al incrementar la altitud o, por el contrario, que podrían presentarse disminuciones de algunos contaminantes específicos. Es el caso de Wang et al. 2022 [40], realizaron un estudio experimental sobre 21 vehículos livianos realizando mediciones de las emisiones de  $CO_2$  y otros contaminantes a diversas altitudes, utilizando el ciclo WLTC y el método MAW para calcular las emisiones en condiciones RDE. Los autores encontraron que la emisión de  $CO_2$  disminuye aproximadamente un 4,45 % por cada 1000 metros de incremento en altitud para las fases de baja y media velocidad, 5,31 % para la fase de alta velocidad, y 6,62 % para la fase de velocidad extra-alta. Sin embargo, para los vehículos con turboalimentador, no se observó una correlación lineal entre la altitud y las emisiones de  $CO_2$ , lo cual podría atribuirse al funcionamiento del turboalimentador en diversas altitudes. Los autores concluyeron que, parámetros ajenos a la altitud, como el patrón de conducción, las condiciones de las vías, y las condiciones ambientales tenían mayor efecto sobre las emisiones de  $CO_2$  y el consumo de combustible, lo que les permitió explicar por qué no identificaron una tendencia definida en las demás emisiones contaminantes reportadas al variar la altitud.

En el ámbito local, Huertas y colaboradores, reportaron en 2022, un análisis del consumo real de combustible de 46 camiones de transporte pesado en corredores logísticos de Colombia [41]. A partir de datos de consumo que fueron registrados a través de sistemas telemáticos, mediante un modelo que funciona a partir de la potencia específica vehicular, lograron aislar el efecto de factores como la altitud, la edad de los camiones y la pendiente de la carretera. Los autores concluyeron que los efectos de la altitud en el consumo eran despreciables.

En conclusión, no se ha alcanzado un consenso sobre el impacto de la altitud sobre el nivel del mar en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes de los vehículos. La evolución de los sistemas de control de los motores ha sido un factor clave, ya que estos sistemas buscan adaptarse a las condiciones operativas del entorno, con el objetivo de mantener niveles óptimos tanto de consumo como de emisión de contaminantes.

En esta sección se presenta un análisis estadístico de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95 % ( $p < 0,05$ ) de todos los datos de factores de emisión y rendimiento de combustible, separados por categorías y altitudes a las que fueron realizadas las mediciones. Adicionalmente, en el **Anexo 7** se presenta la verificación de supuestos estadísticos luego de realizar el ANOVA.

1) *Tractocamiones - Categoría TC*. Debido a la dependencia de las emisiones con el tamaño del motor y dado que se midieron tractocamiones con cilindradas que varían entre 13 y 15 litros, se formaron dos grupos: uno de vehículos con cilindrada de 13 litros y otro de vehículos con cilindrada de 15 litros. Todos los vehículos del grupo 1 eran de la misma marca y línea, específicamente MACK AN64TX, como se muestra en la **Tabla 6**. Además, se seleccionaron vehículos que compartían la misma tecnología de control de emisiones (Euro V). Esto se hizo con el objetivo de aislar el efecto de la tecnología de control de emisiones y garantizar que las diferencias observadas en los factores de emisión y rendimiento de combustible se deban únicamente a la altitud.

TABLA 6  
CARACTERÍSTICAS TRACTOCAMIONES GRUPO 1.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	MACK	AN64TX	2020	198577	12777	Euro 5/V
1000	MACK	AN64TX	2020	N.A	12800	Euro 5/V
1000	MACK	AN64TX	2020	N.A	12800	Euro 5/V
2600	MACK	AN64TX	2020	137817	12777	Euro 5/V
2600	MACK	AN64TX	2020	137817	12777	Euro 5/V

La **Tabla 7** resume los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la categoría tractocamiones (TC) del grupo 1. Al igual que lo reportaron Huertas et al. [41], la altitud no tuvo efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de combustible. De igual manera, tampoco sobre los FE como el  $CO_2$  y  $CO$ . Sin embargo, la altitud influyó en las demás emisiones en por lo menos una de las comparaciones.

**TABLA 7**  
**IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE TRACTOCAMIONES (TC) GRUPO 1.**

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	1	No	1	No	1	No
<i>Rend.</i>	1	No	1	No	0,8766	No
$CO$	0,0774	No	0,9239	No	0,0812	No
$NO$	0,0063	Sí	0,0399	Sí	0,1114	No
$NO_2$	0,0073	Sí	0,0012	Sí	0,6754	No
$NO_x$	0,0124	Sí	0,1170	No	0,1170	No
$PN$	$3,4724e^{-8}$	Sí	$5,1271e^{-8}$	Sí	$1,6484e^{-2}$	Sí

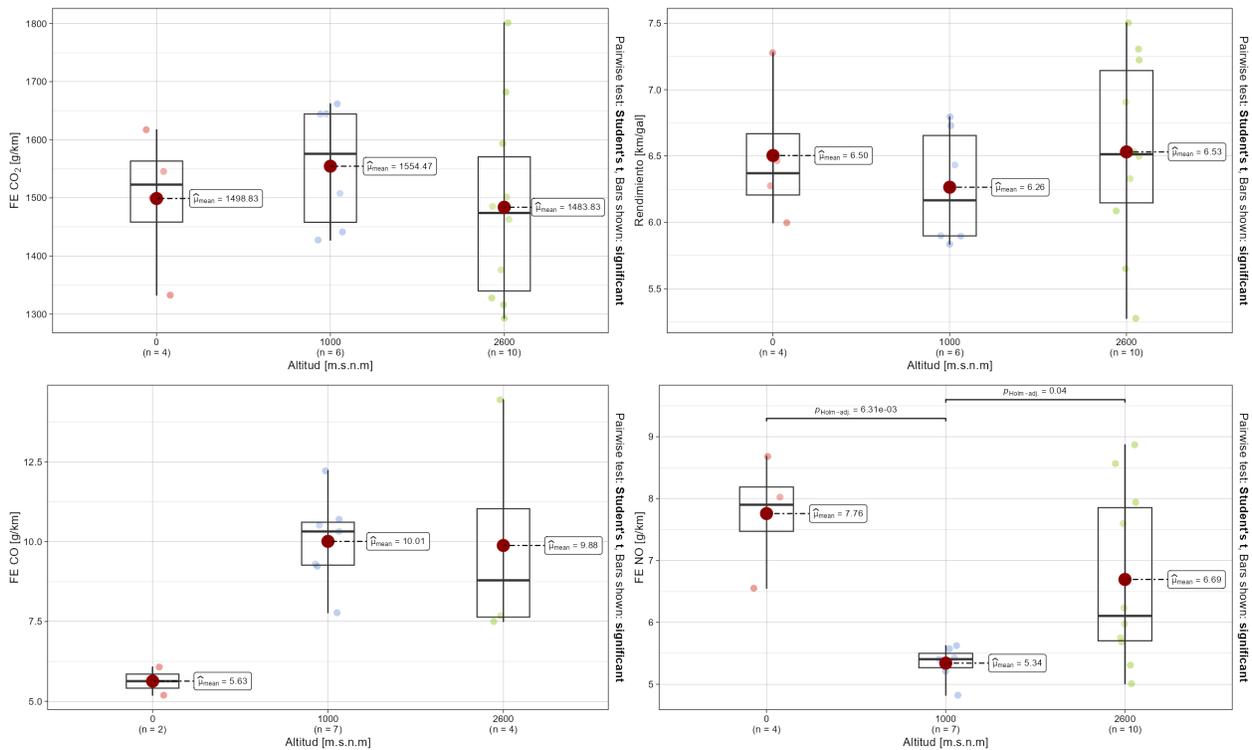


Fig. 35. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en tractocamiones (TC) grupo 1.

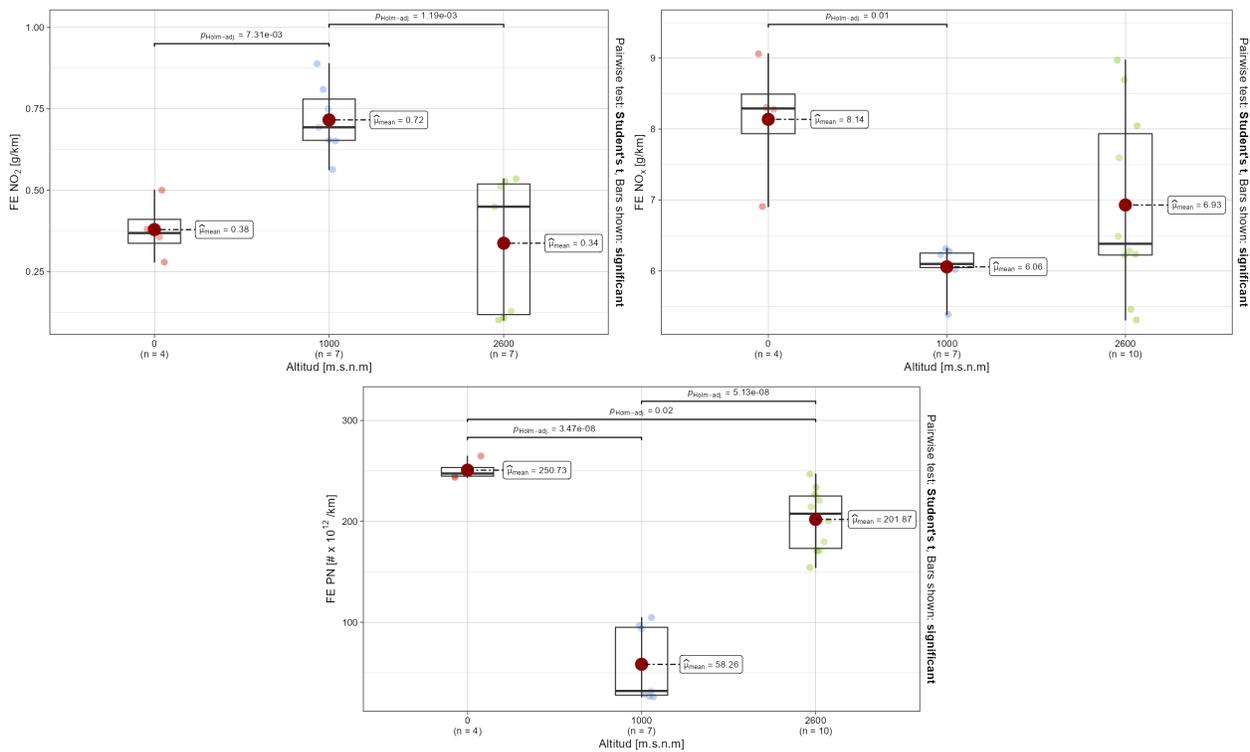


Fig. 36. Impacto de la altitud sobre los FE NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PN tractocamiones (TC) grupo 1.

De acuerdo con las Fig. 35 y 36, para las emisiones de NO, NO<sub>x</sub> y PN se observa una tendencia a disminuir a los 1000 m.s.n.m. Mientras que para 0 m.s.n.m siempre son las máximas, y en segundo lugar las emisiones a 2600 m.s.n.m. Para el caso del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el cual aporta en menor medida al total de NO<sub>x</sub>, presenta una tendencia a aumentar significativamente a los 1000 m.s.n.m. Por otro lado, una de las razones por las que se puede presentar un aumento en las emisiones a nivel del mar, es que, la densidad del aire es mayor, lo que puede llevar a una combustión más rica si la mezcla aire-combustible no se adapta a esas condiciones. Además, si el sistema de control de emisiones no está bien ajustado, puede resultar en mayores emisiones de NO<sub>x</sub> debido a las altas temperaturas de combustión, por lo que el mantenimiento del vehículo juega un papel crucial a la hora de realizar estos análisis. Por lo tanto, debido a que las emisiones de NO<sub>x</sub>, NO y PN son notablemente menores a 1000 m.s.n.m, puede decirse que el motor de esos vehículos estaba bien calibrado para operar a esa altitud, lo que también es un factor a considerar, puesto que una mala calibración puede resultar en una combustión menos eficiente y mayores emisiones.

En la **Tabla 8**, se muestran las especificaciones para los tractocamiones del grupo 2, presentando tecnologías de control de emisiones que van desde EPA 98 hasta Euro II.

TABLA 8  
CARACTERÍSTICAS TRACTOCAMIONES GRUPO 2.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	INTERNATIONAL	LT625 6X4	2011	1321956	14945	Euro 2/II
0	KENWORTH	T800	2012	860972	15000	Euro 2/II
1000	INTERNATIONAL	AN64TX	2013	N.A	14945	EPA 98
2600	INTERNATIONAL	9400i	2013	1006000	14945	EPA 98

La **Tabla 9** resume los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la categoría tractocamiones (TC) del grupo 2, el cual representa los tractocamiones con cilindradas cercanas a los 15 litros. La altitud influyó en todos los factores de emisión, a excepción del  $CO_2$  y  $NO_x$ , como se observa en la **Fig. 39**.

TABLA 9  
IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE TRACTOCAMIONES (TC) GRUPO 2.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,6429	No	0,6353	No	0,3297	No
<i>Rend.</i>	0,6553	No	0,1800	No	0,0476	Sí
$CO$	0,6497	No	0,0256	Sí	0,0278	Sí
$NO$	0,0938	No	0,0206	Sí	0,1328	No
$NO_2$	0,0692	No	0,0022	Sí	0,0569	No
$NO_x$	0,3083	No	0,2542	No	0,5205	No
$PN$	$8,2154e^{-5}$	Sí	-	-	-	-

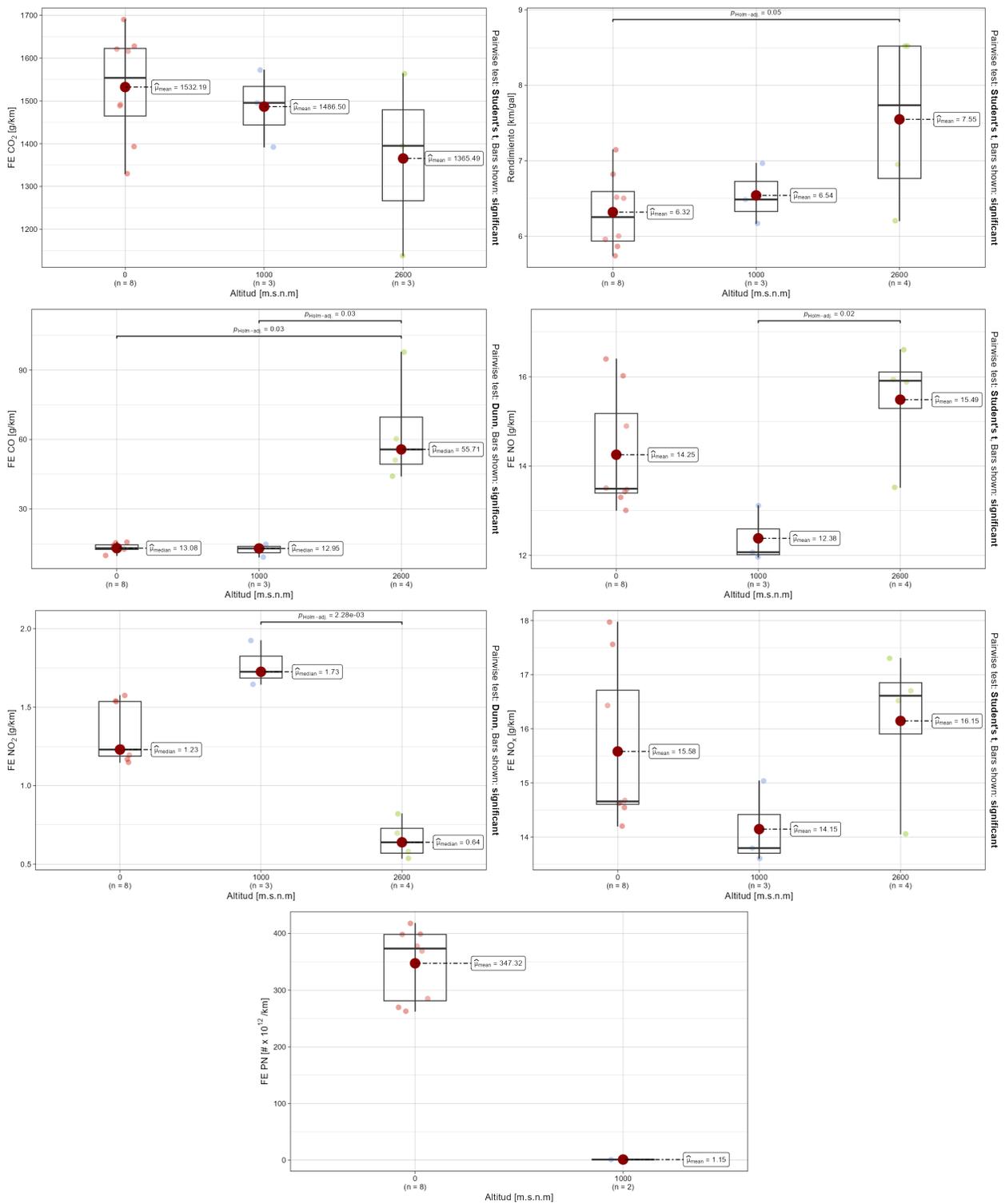


Fig. 37. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en tractocamiones (TC) grupo 1.

Aunque la diferencia no es significativa, existe una tendencia lineal de disminución de las emisiones de  $CO_2$  con el incremento de la altitud. Específicamente, hay una reducción del 2,28 % de las emisiones al pasar de 0 m.s.n.m a 1000 m.s.n.m, y una reducción adicional del 8,14 % al pasar de 1000 m.s.n.m a 2600 m.s.n.m. Esta tendencia podría estar relacionada con la menor densidad del aire a mayores altitudes, lo que reduce la resistencia aerodinámica, como lo mencionaron Wang et al. [39]. Al analizar el rendimiento del combustible, se observa que también mejora con el incremento de la altitud. De 0 a 1000 m.s.n.m el rendimiento tiene un aumento del 3,48 %, al pasar de 1000 a 2600 m.s.n.m se tiene un aumento del 15,46 %.

Al igual que para el grupo 1, se mantuvo la misma tendencia en las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO$ ,  $NO_2$  y  $NO_x$ ). Para el caso del FE  $CO$ , en la **Fig. 39** se observa un aumento aproximadamente 330 % para 2600 m.s.n.m en comparación con 0 y 1000 m.s.n.m. Esto indica que, a pesar de que se tiene un mejor rendimiento a esa altitud, las emisiones de  $CO$  son significativamente más elevadas. Las emisiones de  $PN$  presentaron una disminución muy significativa, a 1000 m.s.n.m ( $1,15 \times \#10^{12}$  partículas/km) en comparación con 0 m.s.n.m ( $347,32 \times \#10^{12}$  partículas/km), lo cual representa una reducción del 99,67 %.

2) *Camiones de dos ejes pequeños - Categoría C2P*. Al igual que en la categoría anterior, se formaron dos grupos: uno con tecnología de control de emisiones Euro II y otro con tecnología Euro IV. La **Tabla 10** presenta las especificaciones de los camiones de dos ejes pequeños pertenecientes al grupo 1. Esta categoría es usada para distribución de paquetería urbana de última milla.

La **Tabla 11** resume los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la categoría camiones de dos ejes pequeños del grupo 1. Los resultados muestran que la altitud tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento de combustible y los factores de emisión (FE), con excepción de las emisiones de  $CO$ . Aunque no se observaron diferencias significativas para el  $CO$ , en la **Fig. 38** se evidencia un incremento casi lineal en las emisiones

TABLA 10  
 CARACTERÍSTICAS CAMIONES DE DOS EJES PEQUEÑOS (C2P) GRUPO 1.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	CHEVROLET	NKR	2006	337122	2771	Euro 2/II
0	CHEVROLET	NKR	2006	385588	2771	Euro 2/II
1000	JAC	HFC1035KD	2011	N.A	2771	Euro 2/II
1000	CHEVROLET	NKR	2006	N.A	2771	Euro 2/II
2600	CHEVROLET	NKR	2009	344000	2771	Euro 2/II
2600	CHEVROLET	NKR	2006	474000	2771	Euro 2/II

de *CO* al aumentar la altitud. Específicamente, las emisiones de *CO* aumentaron aproximadamente un 97,35 % al pasar de 0 m.s.n.m a 1000 m.s.n.m, y un 150,82 % al comparar 1000 m.s.n.m con 2600 m.s.n.m, lo cual refleja una tendencia creciente significativa en la formación de *CO* a mayores altitudes.

TABLA 11  
 IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE CAMIONES DE DOS EJES PEQUEÑOS (C2P) GRUPO 1.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
<i>CO</i> <sub>2</sub>	0,0133	Sí	$1,1411e^{-4}$	Sí	0,0840	No
<i>Rend.</i>	0,0225	Sí	$2,9297e^{-4}$	Sí	0,1085	No
<i>CO</i>	0,2231	No	0,2231	No	0,0552	No
<i>NO</i>	0,4219	No	0,0040	Sí	0,0603	No
<i>NO</i> <sub>2</sub>	$1,7061e^{-5}$	Sí	$2,1307e^{-4}$	Sí	0,1146	No
<i>NO</i> <sub>x</sub>	0,7418	No	0,0180	Sí	0,0521	No
<i>HC</i>	-	-	$1,6653e^{-4}$	Sí	-	-
<i>PN</i>	$6,4637e^{-3}$	Sí	$5,0358e^{-5}$	Sí	$3,7190e^{-3}$	Sí

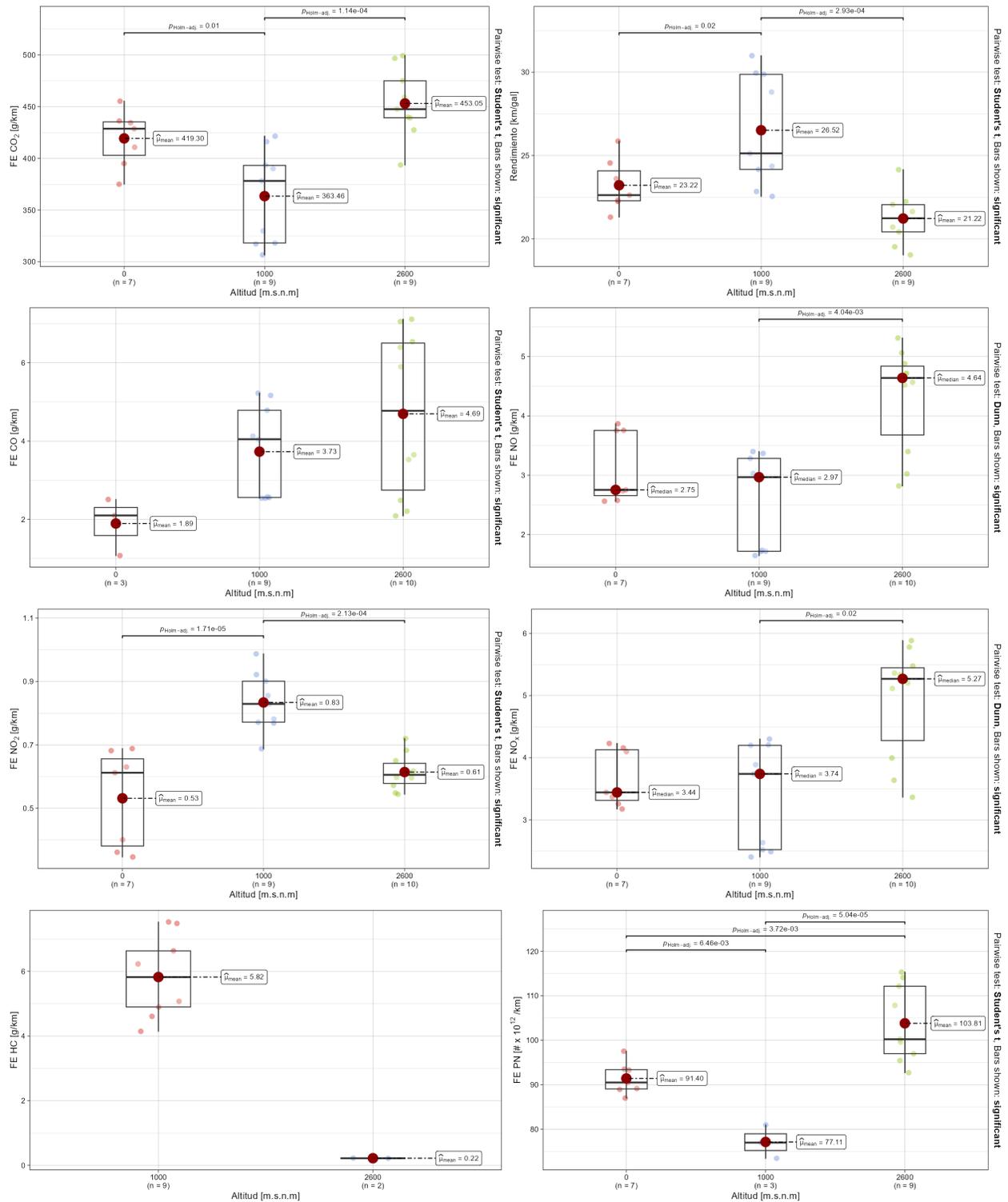


Fig. 38. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 1.

Para las emisiones de hidrocarburos (HC), se aprecia una disminución significativa a 2600 m.s.n.m en comparación con las otras altitudes. En contraste, no se observa una tendencia clara en las emisiones de partículas ( $PN$ ),  $CO_2$ ,  $NO_2$  y rendimiento, ya que los valores muestran variabilidad sin un patrón definido al cambiar la altitud.

Las emisiones de  $NO$  y  $NO_x$  muestran una tendencia a aumentar con la altitud. En cuanto al  $NO_2$ , se observa una tendencia similar de aumento significativo a 1000 m.s.n.m en comparación con las otras altitudes, al igual que ocurrió con la categoría tractocamiones.

La **Tabla 12** resume las especificaciones para los camiones de dos ejes pequeños del grupo 2, el cual abarca vehículos con tecnología de control de emisiones Euro IV/4.

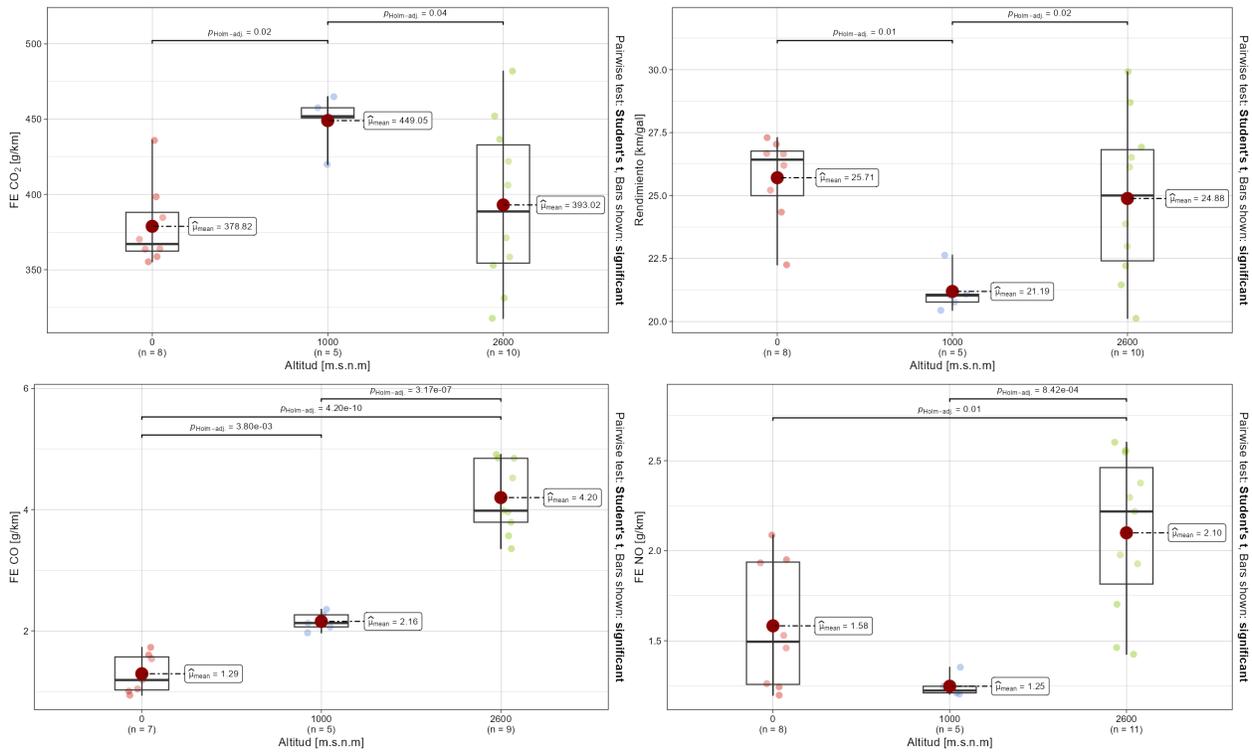
TABLA 12  
CARACTERÍSTICAS CAMIONES DE DOS EJES PEQUEÑOS (C2P) GRUPO 2.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	CHEVROLET	NKR	2022	35045	2299	Euro 4/IV
0	CHEVROLET	NKR	2021	97578	2299	Euro 4/IV
1000	CHEVROLET	NKR	2016	N.A	2299	Euro 4/IV
2600	FOTON	FKR	2022	27000	2771	Euro 4/IV
2600	FOTON	FKR	2022	29000	2771	Euro 4/IV

La **Tabla 13** muestra que la altitud sobre el nivel del mar no tuvo efecto estadísticamente significativo solo para el FE  $NO_x$ . Al igual que con el grupo 1, se observa una tendencia a aumentar el FE  $CO$  a medida que aumenta la altitud, para este caso si existe diferencia estadística significativa entre las comparaciones (**Fig. 39**). Para el caso de las otras variables no se observa una tendencia clara de variación con la altitud (**Fig. 40**). Las emisiones de óxidos de nitrógeno se comportan de la misma manera que para la categoría tractocamiones, presentando como punto de inflexión la altitud de 1000 m.s.n.m. Las emisiones de hidrocarburos (HC), son significativamente menores a 2600 m.s.n.m (0,25 g/km) en comparación con 1000 m.s.n.m (1,89 g/km).

**TABLA 13**  
**IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE CAMIONES DE DOS EJES PEQUEÑOS (C2P) GRUPO 2.**

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,02063	Sí	0,4232	No	0,4725	No
Rend.	0,0116	Sí	0,0231	Sí	0,4818	No
$CO$	$3,7953e^{-3}$	Sí	$4,1971e^{-7}$	Sí	$3,1699e^{-10}$	Sí
$NO$	0,1199	No	$8,4226e^{-4}$	Sí	0,0118	Sí
$NO_2$	$7,0715e^{-11}$	Sí	$7,9672e^{-15}$	Sí	$5,5030e^{-10}$	Sí
$NO_x$	0,7409	No	0,2365	No	0,2365	No
$HC$	-	-	$1,3051e^{-3}$	Sí	-	-
$PN$	$6,2926e^{-3}$	Sí	$3,0547e^{-8}$	Sí	$3,2024e^{-6}$	Sí



**Fig. 39. Impacto de la altitud sobre FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 2.**

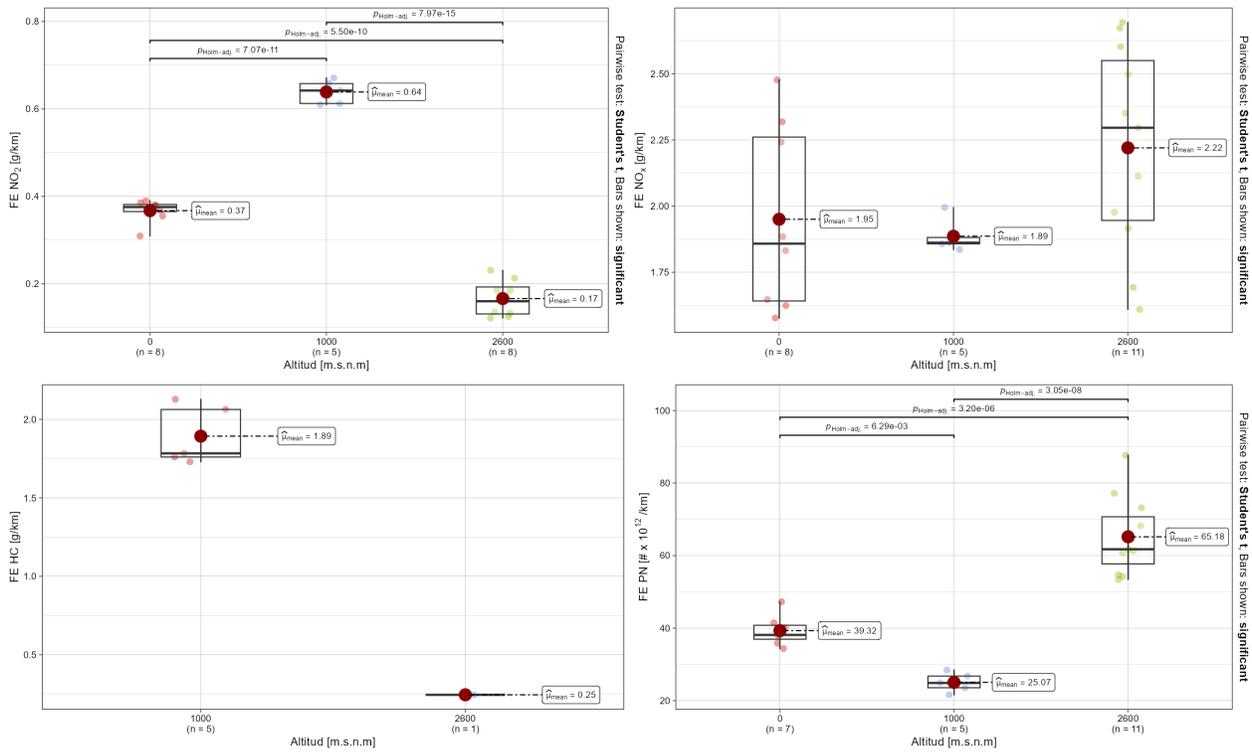


Fig. 40. Impacto de la altitud sobre los FE en camiones de dos ejes pequeños (C2P) grupo 2.

3) Camiones de dos ejes grandes - Categoría C2G. La **Tabla 14** muestra las especificaciones para los camiones de dos ejes grandes pertenecientes al grupo 1, con cilindradas que rondaban los 8 litros.

TABLA 14  
CARACTERÍSTICAS CAMIONES DE DOS EJES GRANDES (C2G) GRUPO 1.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	CHEVROLET	FVR	2007	1027000	7790	Euro 2/II
0	CHEVROLET	FSR	2011	765512	7790	Euro 2/II
1000	CHEVROLET	FTR	2012	N.A	7790	Euro 2/II
2600	CHEVROLET	FTR	2012	602637	7790	Euro 2/II
2600	CHEVROLET	FTR	2012	658000	7790	Euro 2/II

En la **Tabla 15** se observa que la altitud sobre el nivel del mar si tuvo efecto es-

tadísticamente significativo sobre los FE y rendimiento de combustible en al menos una de las comparaciones. El  $CO_2$  disminuyó con la altitud y el rendimiento de combustible mejoró al incrementarse, en ambos casos siguiendo una tendencia lineal (**Fig. 41**).

TABLA 15  
IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE CAMIONES DE DOS EJES GRANDES (C2G) GRUPO 1.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	$6,9925e^{-2}$	Sí	0,0390	Sí	$4,0947e^{-5}$	Sí
Rend.	0,1778	No	0,0322	Sí	$1,4856e^{-4}$	Sí
CO	0,3403	No	$4,1370e^{-3}$	Sí	$8,3960e^{-3}$	Sí
NO	0,0849	No	0,9976	No	0,0290	Sí
$NO_2$	0,6438	No	$6,5899e^{-3}$	Sí	$3,7668e^{-4}$	Sí
$NO_x$	0,1126	No	0,6781	No	0,0135	Sí
PN	$1,6456e^{-4}$	Sí	$1,9966e^{-4}$	Sí	0,4752	No

En la **Fig.41**, las emisiones de  $NO$  y  $NO_x$  muestran una tendencia a disminuir significativamente a medida que se incremente la altitud de 0 a 1000 m.s.n.m, sin embargo, esta reducción pasa a ser poco significativa cuando se encuentran a altas altitudes. Es importante señalar que, a 0 m.s.n.m, existe una dispersión considerable entre los dos vehículos medidos, a pesar de tener la misma tecnología de control de emisiones, lo que sugiere un funcionamiento inadecuado del sistema de postratamiento. Para las emisiones de  $NO_2$ , se observa una tendencia a disminuir con la altitud, siendo más marcada cuando se está a grandes altitudes. En este caso, las variables de  $CO$  y  $PN$  no presentan una tendencia clara al variar la altitud.

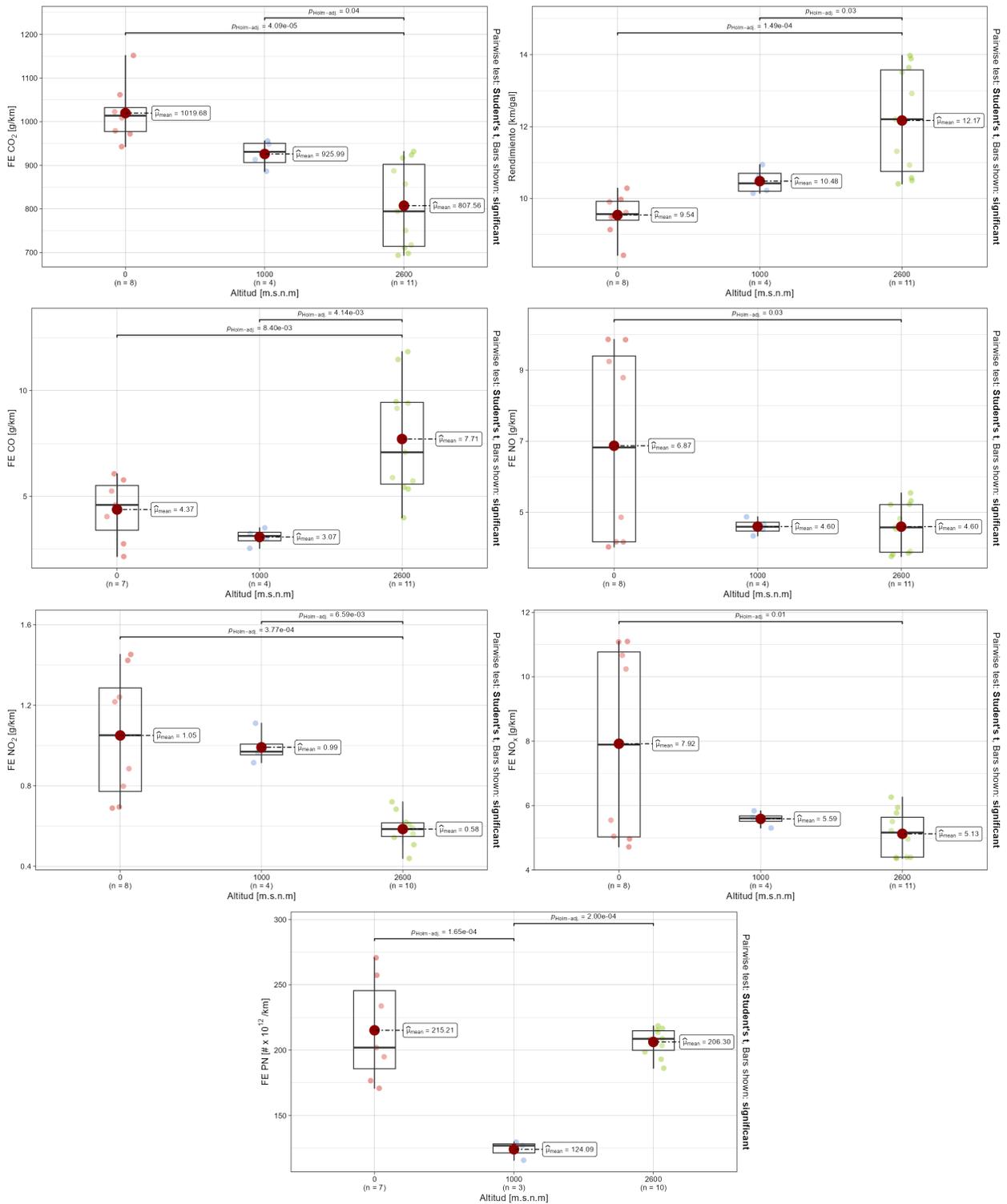


Fig. 41. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes grandes (C2G) grupo 1.

En la **Tabla 16** se muestran las características de los camiones de dos ejes grandes (C2G) que pertenecen al grupo 2.

TABLA 16  
CARACTERÍSTICAS CAMIONES DE DOS EJES GRANDES (C2G) GRUPO 2.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	FOTON	ESTM	2022	96264	6700	Euro 5/V
0	CHEVROLET	FVR	2022	127936	7790	Euro 4/IV
1000	CHEVROLET	FVR	2021	N.A	7790	Euro 4/IV
1000	HINO	GH8JM8A	2022	N.A	7684	Euro 5/V
2600	CHEVROLET	FVR	2021	89948	7790	Euro 6/VI
2600	CHEVROLET	N.A	2021	146733	7790	Euro 4/IV

La **Tabla 17** resume los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la categoría camiones grandes de dos ejes (C2G) del grupo 2. La altitud no tuvo efecto estadísticamente significativo en las emisiones de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_2$  y rendimiento de combustible. En este caso no se observa una tendencia clara que permita identificar el efecto de la altitud en los FE y rendimiento de combustible (**Fig. 42**). En este grupo, los óxidos de nitrógeno se comportaron de manera similar a la categoría de tractocamiones.

TABLA 17  
IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE CAMIONES DE DOS EJES GRANDES (C2G) GRUPO 2.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,2991	No	0,6102	No	0,4997	No
<i>Rend.</i>	1	No	1	No	1	No
$CO$	0,9365	No	0,4644	No	0,6229	No
$NO$	$2,5751e^{-7}$	Sí	$4,2875e^{-3}$	Sí	$5,1177e^{-5}$	Sí
$NO_2$	0,6152	No	0,3670	No	0,5793	No
$NO_x$	$9,1737e^{-3}$	Sí	0,2308	No	0,1175	No
$PN$	0,0980	No	$3,1658e^{-3}$	Sí	0,0980	No

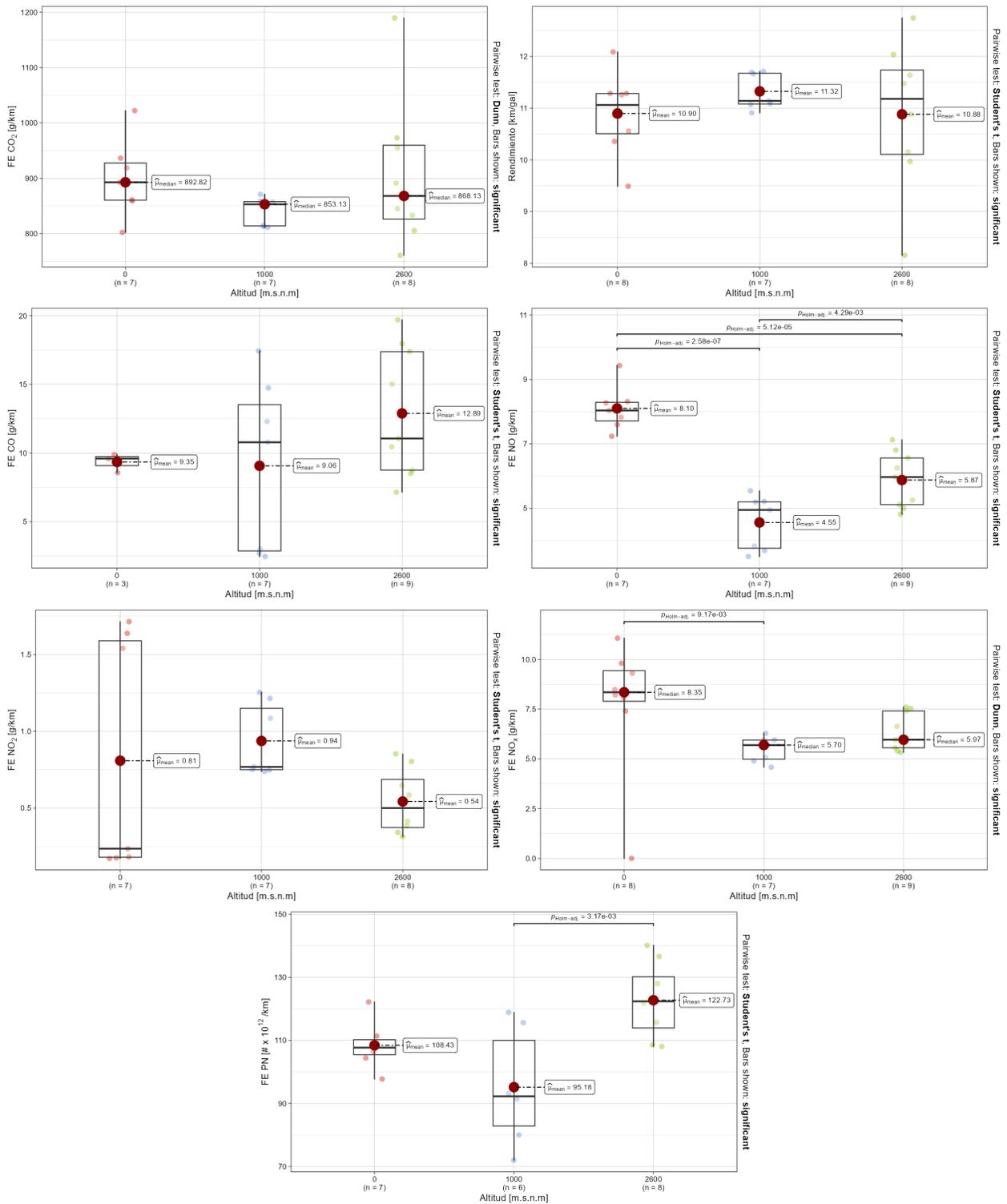


Fig. 42. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en camiones de dos ejes grandes (C2G) grupo 2.

4) *Buses urbanos - Categoría AB* Para el caso de los buses urbanos, con capacidad entre 20 y 38 pasajeros, se dividieron en grupos para abarcar tecnologías de control de emisiones similares. La **Tabla 18** muestra las características de los autobuses urbanos que pertenecen al grupo 1.

TABLA 18  
CARACTERÍSTICAS BUSES URBANOS (AB) GRUPO 1.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Cilindrada	Norma emisión
0	CHEVROLET	NKR	2006	2771	Euro 2/II
0	CHEVROLET	NKR	2006	2771	Euro 2/II
1000	JAC	HFC1035KD	2011	2771	Euro 2/II
1000	CHEVROLET	NKR	2011	2771	Euro 2/II
2600	CHEVROLET	NKR	2006	2771	Euro 2/II
2600	CHEVROLET	NKR	2006	2771	Euro 2/II

La **Tabla 19** presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la categoría autobuses urbanos (*AB*) del grupo 1. La altitud sobre el nivel del mar no tuvo efecto significativo en las emisiones de  $CO_2$  y rendimiento de combustible (**Fig. 43**), al igual que lo reportaron Huertas et al. [41].

A pesar de que algunas emisiones mostraron un efecto estadísticamente significativo, no se observa una tendencia clara al incrementar la altitud (**Fig. 43**). Sin embargo, las emisiones de  $NO$ ,  $NO_x$  y  $PN$  mantienen una tendencia similar a las de categorías que ya se analizaron. En particular, para el  $NO$  y  $PN$ , el punto de emisiones mínimas se encuentra consistentemente a los 1000 m.s.n.m, mientras que el valor máximo se presenta a los 2600 m.s.n.m. Para el  $NO_2$ , sucede lo contrario: el valor máximo se observa a los 1000 m.s.n.m y el mínimo a los 2600 m.s.n.m.

Por otro lado, al igual que las categorías y grupos en los que se ha reportado FE  $HC$ , siempre existe efecto estadísticamente significativo muy marcado, en este caso, las emisiones

se reducen hasta en 28 veces. Esto sugiere que, a grandes altitudes, se mejora la mezcla de aire-combustible, reduciendo problemas asociados con regiones de extrema pobreza antes de la ignición o bajas velocidades de inyección del combustible cerca del final de la combustión.

TABLA 19  
IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE BUSES URBANOS (AB) GRUPO 1.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,1421	No	0,2350	No	0,5455	No
$Rend.$	0,0800	No	0,1039	No	0,6292	No
$CO$	0,1616	No	0,7678	No	0,1385	No
$NO$	0,1259	Sí	0,0642	No	0,7373	No
$NO_2$	$9,3523e^{-8}$	Sí	$2,7380e^{-10}$	Sí	$1,8342e^{-2}$	Sí
$NO_x$	1	No	1	No	1	No
$HC$	-	-	$2,2706e^{-5}$	Sí	-	-
$PN$	0,0022	Sí	0,0064	Sí	0,2754	No

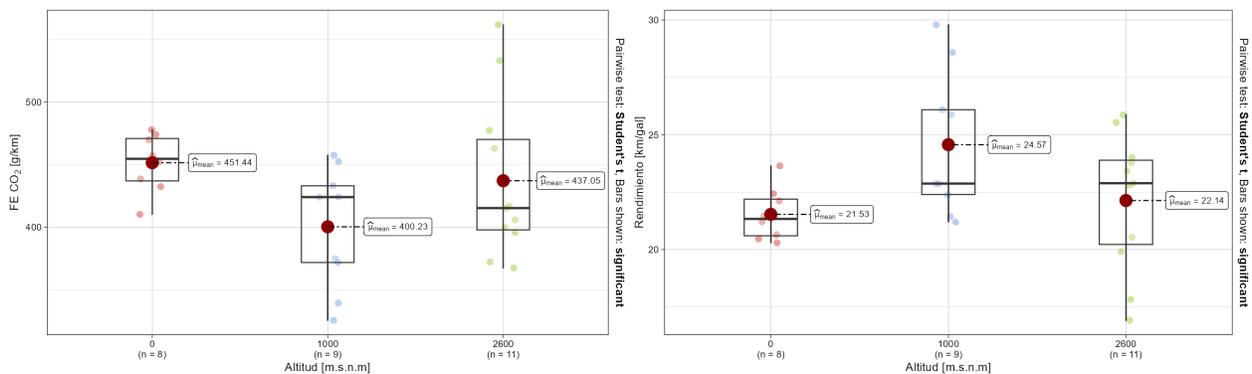


Fig. 43. Impacto de la altitud sobre FE  $CO_2$  y rendimiento de combustible en buses urbanos (AB) grupo 1.

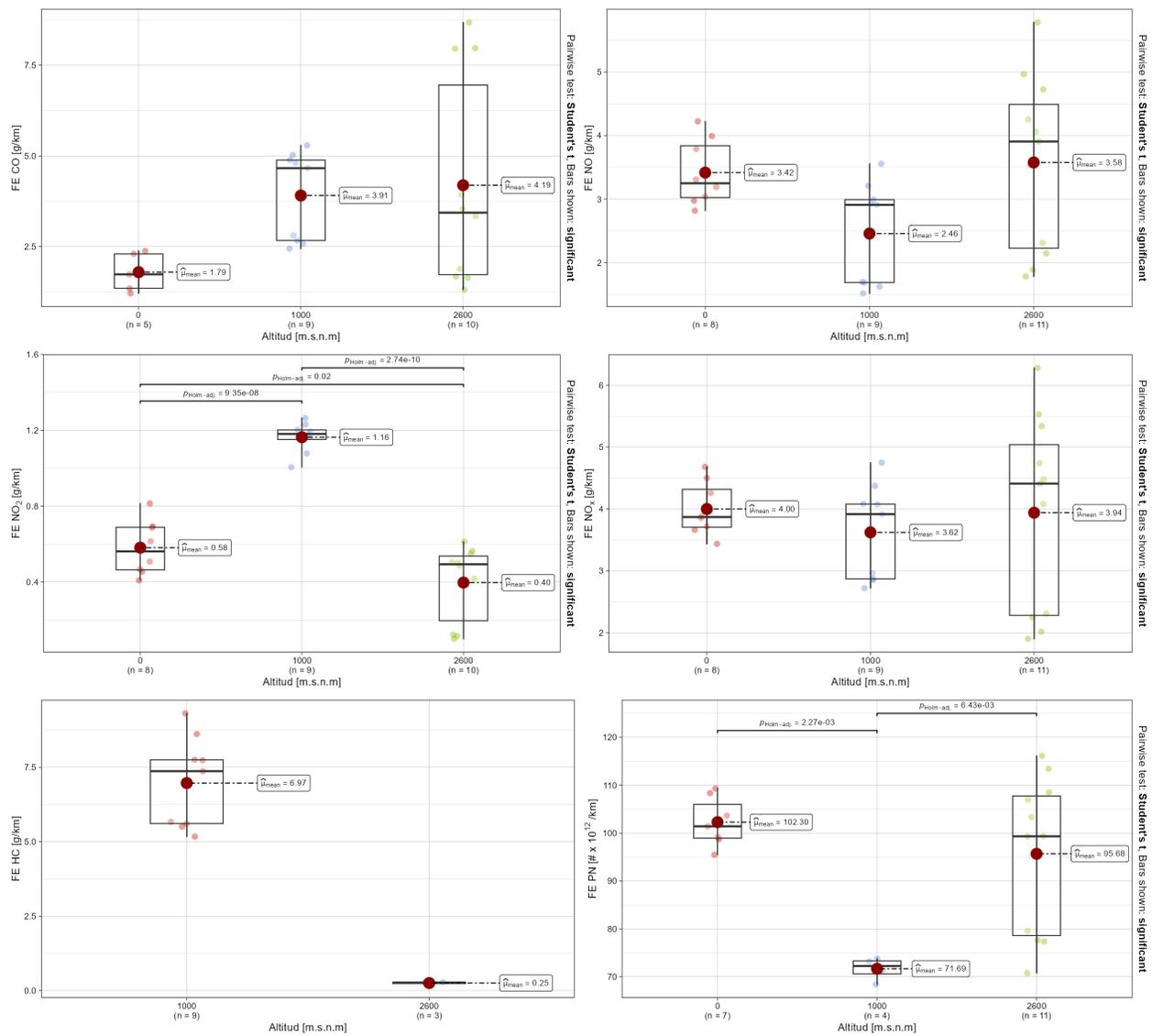


Fig. 44. Impacto de la altitud sobre los FE en buses urbanos (AB) grupo 1.

En la **Tabla 20** se muestran las características de los autobuses de pasajeros (AB) que pertenecen al grupo 2, con capacidad de 26 pasajeros.

La altitud sobre el nivel del mar si tuvo efecto estadísticamente significativo sobre los FE y rendimiento de combustible, en al menos una de las comparaciones, como se muestra en la **Tabla 21**. En la **Fig. 45** se observa que las emisiones de  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $HC$  y  $PN$  presentan la misma tendencia que en el grupo 1, en este caso, sí hubo un efecto estadístico

TABLA 20  
CARACTERÍSTICAS BUSES URBANOS (AB) GRUPO 2.

Altitud	Marca	Línea	Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Norma emisión
0	CHEVROLET	NKR	2022	35045	2999	Euro 4/IV
0	CHEVROLET	NKR	2021	97578	2999	Euro 4/IV
1000	CHEVROLET	NKR	2016	N.A	2999	Euro 4/IV
2600	FOTON	FKR	2022	N.A	2771	Euro 4/IV
2600	FOTON	FKR	2022	27000	2771	Euro 4/IV

significativo en las comparaciones. Por otro lado, el FE de  $CO$  tiende a aumentar de manera lineal con la altitud en este grupo.

TABLA 21  
IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE BUSES URBANOS (AB) GRUPO 2.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1000-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,0028	Sí	0,2523	No	0,0064	Sí
$Rend.$	0,0029	Sí	0,5391	No	0,0029	Sí
$CO$	0,2167	No	0,1433	No	0,0013	Sí
$NO$	0,0309	Sí	$1,3342e^{-5}$	Sí	$1,7033e^{-4}$	Sí
$NO_2$	$4,4231e^{-6}$	Sí	$7,5499e^{-8}$	Sí	$8,3259e^{-3}$	Sí
$NO_x$	0,8105	No	0,0047	Sí	$5,6960e^{-4}$	Sí
$HC$	-	-	$5,5899e^{-6}$	Sí	-	-
$PN$	0,1137	No	$2,1079e^{-7}$	Sí	$2,2395e^{-7}$	Sí

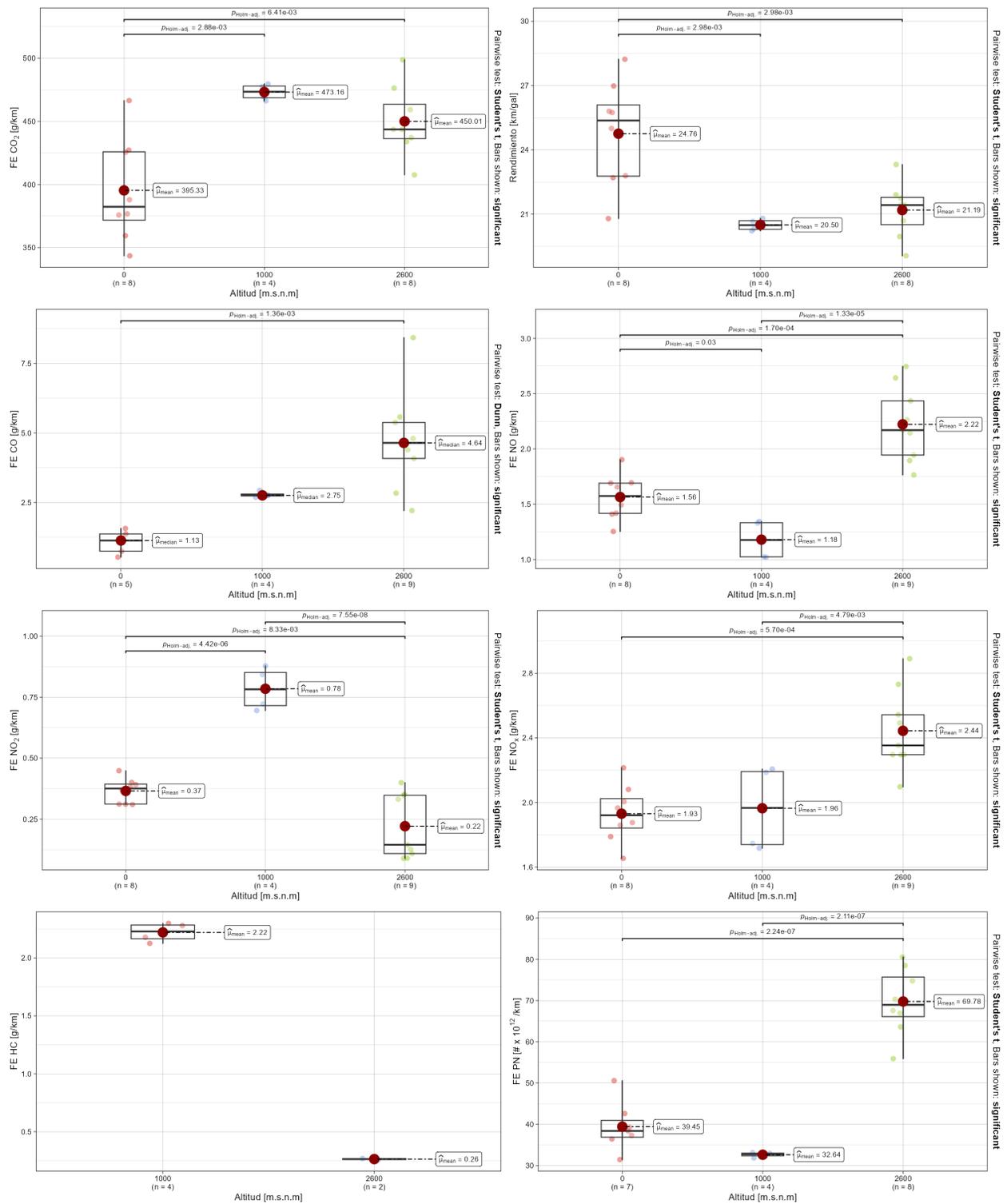


Fig. 45. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible en buses urbanos (AB) grupo 2.

5) *Vehículos livianos* En esta categoría, se midieron dos vehículos, las especificaciones de cada uno se muestran en la **Tabla 22** y **24**. Las altitudes evaluadas corresponden a Apartadó (aproximadamente 0 msnm), Medellín (1500 msnm) y Bogotá (2600 msnm).

TABLA 22  
 CARACTERÍSTICAS VEHÍCULOS LIVIANOS CILINDRADA 1600 CC.

Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Alimentación	Transmisión
2016	80331	1598	Multipunto (MPI)	Mecánica

En la **Tabla 23** se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el vehículo 1 (1600 cc). La altitud tuvo efecto estadísticamente significativo sobre las emisiones de  $CO_2$ , presentando una tendencia a disminuir de manera lineal con la altitud (**Fig. 46**), al igual que lo reportaron Wang et al. [39]. Sin embargo, el rendimiento de combustible no presentó diferencias significativas, ni la misma tendencia que las emisiones de  $CO_2$ .

TABLA 23  
 IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE VEHÍCULO LIVIANO 1600 CC.

Variable	Valor p					
	0-1000	Diferencia	1500-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,0242	Sí	0,0775	No	0,0013	Sí
<i>Rend.</i>	0,0614	No	0,6010	No	0,0614	No
$CO$	0,0157	Sí	0,0103	Sí	0,9567	No
$NO$	0,1729	No	0,0061	Sí	0,0567	No
$NO_2$	0,0037	Sí	0,0109	Sí	0,1338	No
$NO_x$	0,0588	No	0,0011	Sí	0,0696	No
$HC$	0,0023	Sí	$2,6340e^{-5}$	Sí	0,0019	Sí
$PN$	$2,8879e^{-6}$	Sí	$2,7478e^{-5}$	Sí	$7,3046e^{-4}$	Sí
$PM$	$4,9340e^{-4}$	Sí	0,0049	Sí	0,0152	Sí

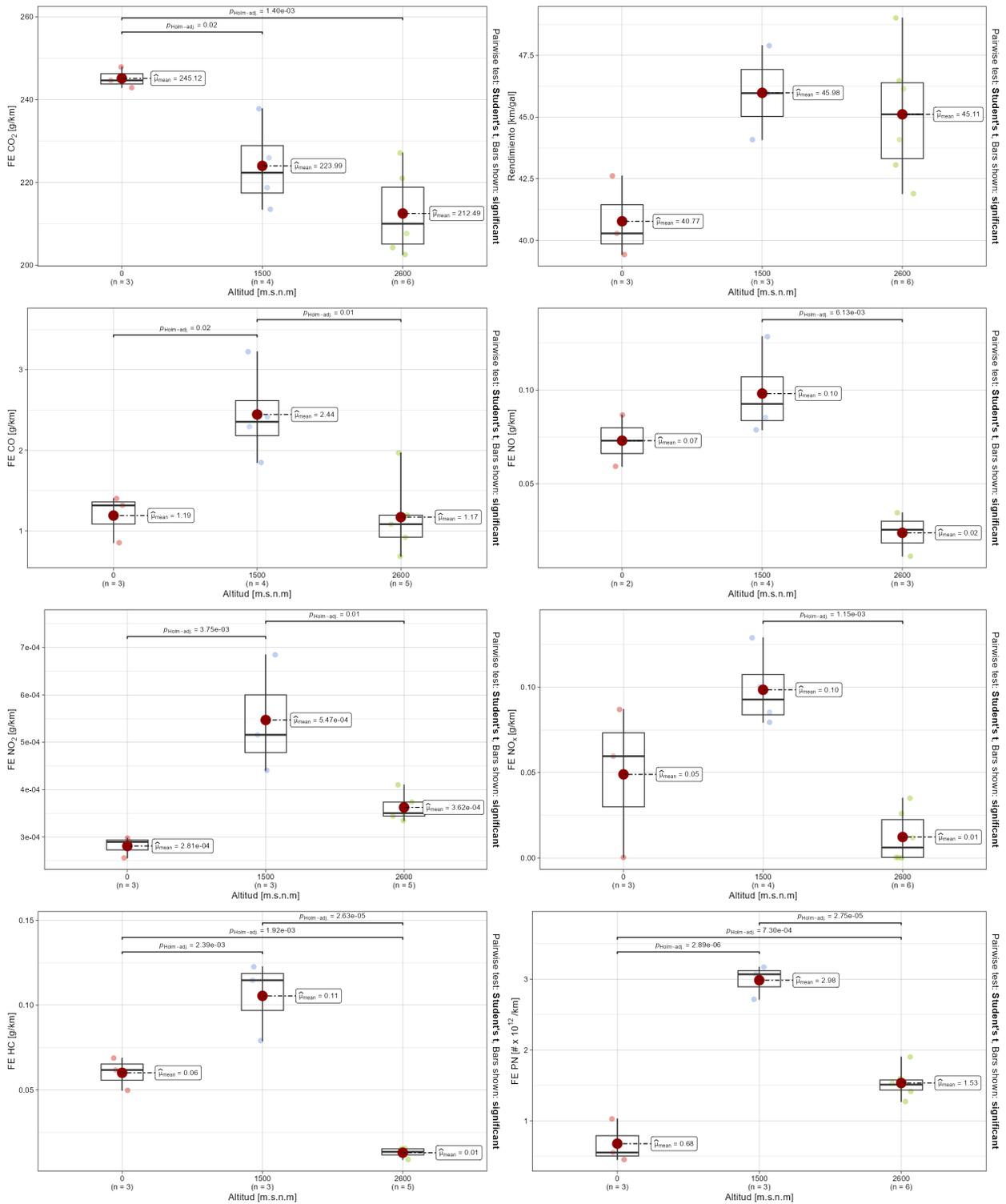


Fig. 46. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 1600 cc.

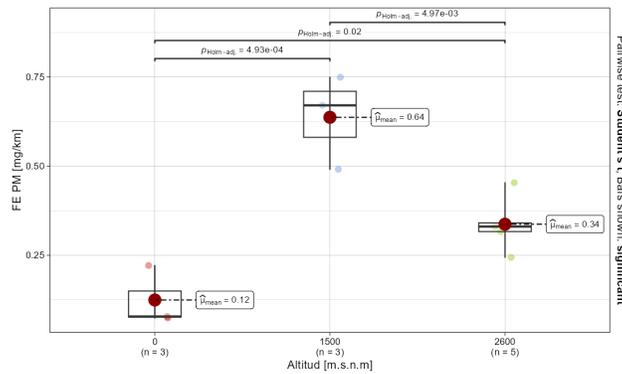


Fig. 47. Impacto de la altitud sobre FE PN vehículo liviano 1600 cc.

En la Fig. 46 y 47 se observa que las emisiones tuvieron efecto estadísticamente significativo en al menos una de las comparaciones. Todas las emisiones, a excepción del  $CO_2$ , presentaron una tendencia de aumento para la altitud de 1500 m.s.n.m. Para el caso del material particulado, tanto en número (PN), como en masa (PM), tuvieron una disminución muy marcada cuando se está al nivel del mar; al igual que sucedió con los hidrocarburos a la mayor altitud 2600 m.s.n.m.

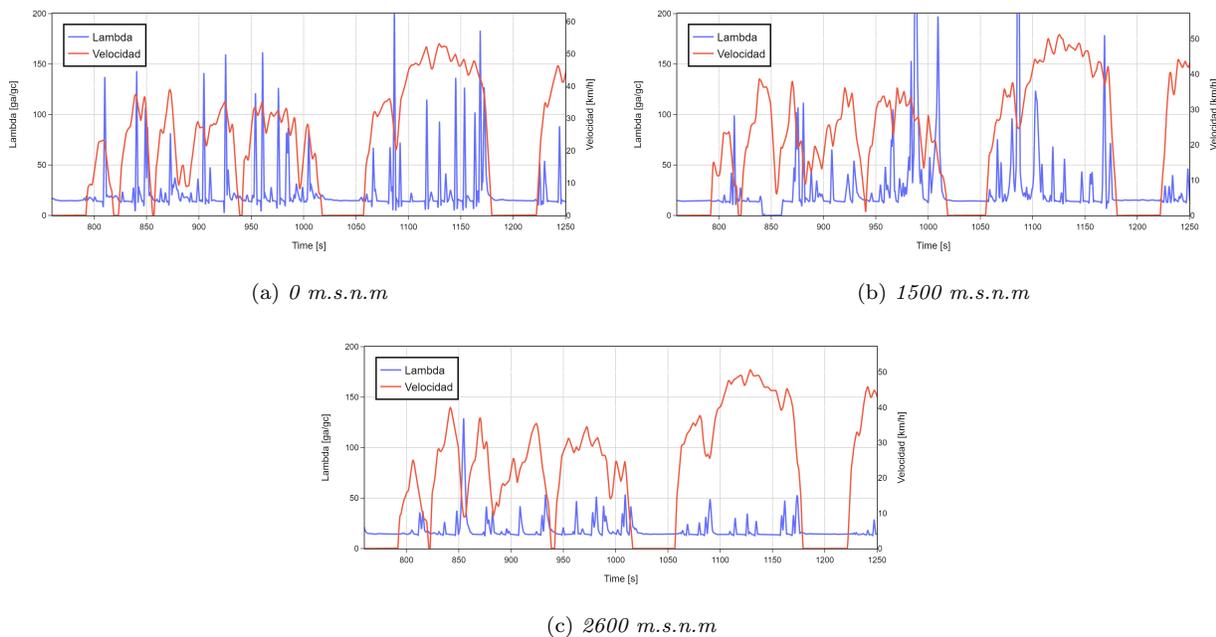


Fig. 48. Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 1598 cc.

Como se mencionó al principio de este capítulo, muchos autores afirman que las variaciones en las emisiones y rendimiento de combustible se deben a fluctuaciones en la relación aire-combustible, especialmente durante los transitorios. Por esto, dado que se cuenta con la medición de la relación aire-combustible para las categorías vehículos livianos y motocicletas se realizará este análisis adicional. En la **Fig. 48a** se observan las señales de velocidad y relación aire-combustible ( $\Lambda$ ) para el vehículo de 1600 cc a nivel del mar. La relación  $\Lambda$  muestra fluctuaciones moderadas durante los ciclos transitorios, lo que indica una mezcla de aire-combustible que responde adecuadamente a las demandas del motor. Esta adaptabilidad contribuye a una combustión más completa lo que se traduce en menores emisiones de  $CO$  y  $NO_x$ , como se observa en las **Fig. 46** y **47**.

Para la altitud de 1500 metros (**Fig. 48b**), la relación aire-combustible presenta más fluctuaciones durante los ciclos transitorios en comparación con el nivel del mar, lo que indica una mejor adaptación de la mezcla a las exigencias del motor. Esta mejor respuesta puede llevar a una combustión más eficiente, lo que se traduce en un aumento del rendimiento de combustible en comparación con el nivel del mar. Sin embargo, se observa un incremento en las emisiones, posiblemente debido al funcionamiento del sistema de post-tratamiento.

En la **Fig. 48c** se observan las señales de velocidad y relación aire-combustible ( $\Lambda$ ) para el vehículo de 1600 cc a 2600 m.s.n.m. A esta altitud, la relación aire-combustible muestra menos fluctuaciones, debido a la compensación por la menor cantidad de oxígeno en el aire. Esta compensación, hace que a grandes altitudes disminuyan las emisiones para este vehículo, lo que indica que la electrónica del vehículo se ajustó bien a esa altitud. Además, esto se puede evidenciar también en la disminución de las emisiones de  $CO_2$ , y un aumento del rendimiento de combustible con respecto al nivel del mar, como se muestra en las **Fig. 46** y **47**.

TABLA 24  
 CARACTERÍSTICAS VEHÍCULOS LIVIANOS CILINDRADA 3500 CC.

Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Alimentación	Transmisión
2005	165041	3500	Multipunto (MPI)	Automática

En la **Tabla 25** se muestran los resultados del análisis de varianza (ANOVA). La altitud sobre el nivel del mar tuvo efecto estadísticamente para los FE y rendimiento de combustible, en al menos una de las comparaciones. Al igual que el vehículo anterior, en la **Fig. 49**, se observa que las emisiones de  $CO_2$  tienden a disminuir con la altitud, a pesar de que este efecto sea ligeramente menor cuando se pasa de 0 a 1500 m.s.n.m. Al igual que para el vehículo 1, se presenta la misma tendencia en las demás emisiones (**Fig. 49 y 50**).

TABLA 25  
 IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE VEHÍCULO LIVIANO 3500 CC.

Variable	Valor p					
	0-1500	Diferencia	1500-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	0,5138	No	$3,4486e^{-4}$	Sí	$1,6348e^{-4}$	Sí
<i>Rend.</i>	0,4618	No	0,0064	Sí	0,0180	Sí
$CO$	0,0049	Sí	$4,2205e^{-4}$	Sí	0,2285	No
$NO$	0,9913	No	0,0182	Sí	0,0183	Sí
$NO_2$	0,0220	Sí	0,0713	No	0,4093	No
$NO_x$	0,5164	No	0,0283	Sí	0,1031	No
$HC$	0,5767	No	0,0427	Sí	0,0805	No
$PN$	$1,8447e^{-8}$	Sí	$4,3343e^{-8}$	Sí	0,2302	No
$PM$	$1,3097e^{-4}$	Sí	$9,0723e^{-7}$	Sí	0,0030	Sí

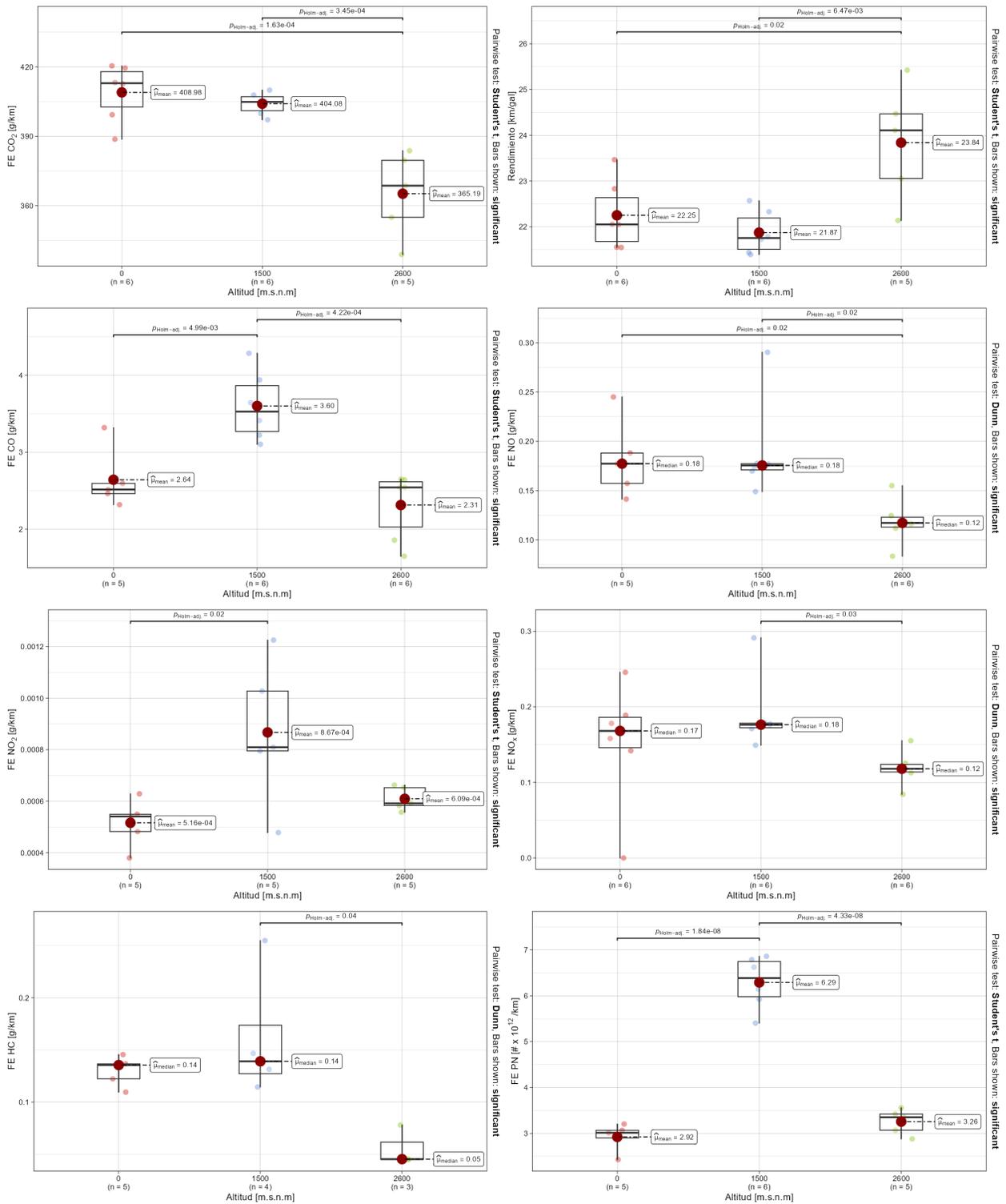


Fig. 49. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 3500 cc.

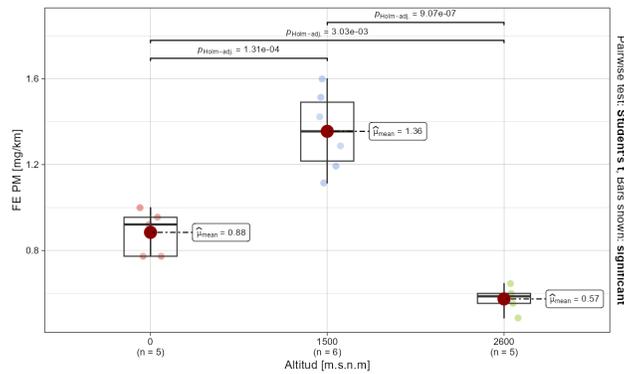


Fig. 50. Impacto de la altitud sobre FE PM vehículo liviano 3500 cc.

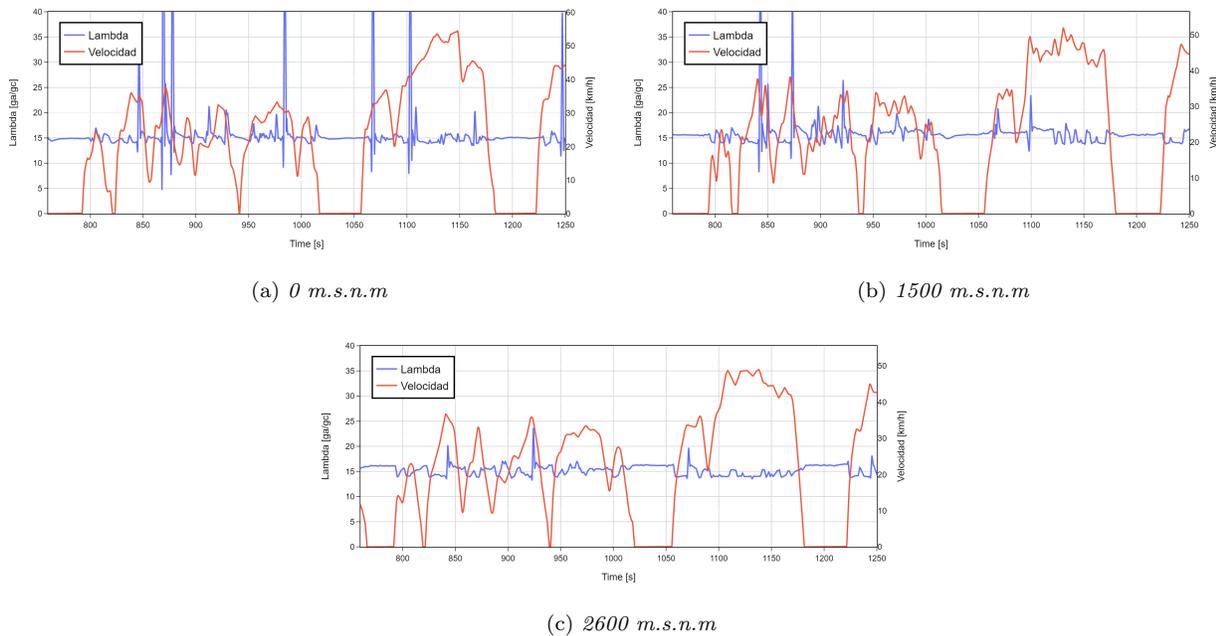


Fig. 51. Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible vehículo liviano 3500 cc.

Para este vehículo en particular, se observa que la relación aire-combustible se mantiene casi igual en las tres altitudes (**Fig. 51**). Esto puede deberse al año de modelo del vehículo (2005), que es significativamente más antiguo en comparación con el vehículo de 1600 cc. La razón es que los sistemas de control de motores han evolucionado a lo largo de los años. Estos sistemas modernos buscan que los motores se adapten mejor a las condiciones de operación impuestas por el entorno, manteniendo niveles óptimos de consumo y emisión

de contaminantes [42].

6) *Motocicletas* Al igual que para los vehículos livianos, se midieron dos motocicletas en las tres altitudes. En la **Tabla 26** y **28** se muestran las características de las motocicletas que se midieron.

TABLA 26  
CARACTERÍSTICAS MOTOCICLETA CILINDRADA 149 CC.

Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Alimentación	Transmisión
2022	13677	149	Inyección	Mecánica

La altitud sobre el nivel del mar tuvo efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento de combustible y FE, a excepción del  $NO_2$ , en al menos una de las comparaciones para la motocicleta de 149 c.c (**Tabla 27**). En la **Fig. 52** se observa una disminución significativa del rendimiento de combustible a 1500 m.s.n.m., siendo un 44 % menor que a nivel del mar y un 34 % menor que a la mayor altitud. Esta disminución sugiere que la motocicleta debería calibrarse para operar a esa altitud, con el fin de mejorar su rendimiento.

TABLA 27  
IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE MOTOCICLETA 149 CC.

Variable	Valor p					
	0-1500	Diferencia	1500-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	$2,6594e^{-4}$	Sí	0,0020	Sí	0,0430	Sí
<i>Rend.</i>	$1,0178e^{-6}$	Sí	$1,1304e^{-5}$	Sí	$6,3390e^{-4}$	Sí
$CO$	$7,0577e^{-4}$	Sí	0,2820	No	$11,6443e^{-4}$	Sí
$NO$	$1,1545e^{-4}$	Sí	0,4881	No	$1,1545e^{-4}$	Sí
$NO_2$	-	-	0,3764	No	-	-
$NO_x$	$1,1633e^{-4}$	Sí	0,4913	No	$1,1633e^{-4}$	Sí
$HC$	0,0148	Sí	0,2602	No	0,2249	No
$PN$	0,0631	No	0,2221	No	0,0330	Sí
$PM$	0,0279	Sí	0,1398	No	0,0125	No

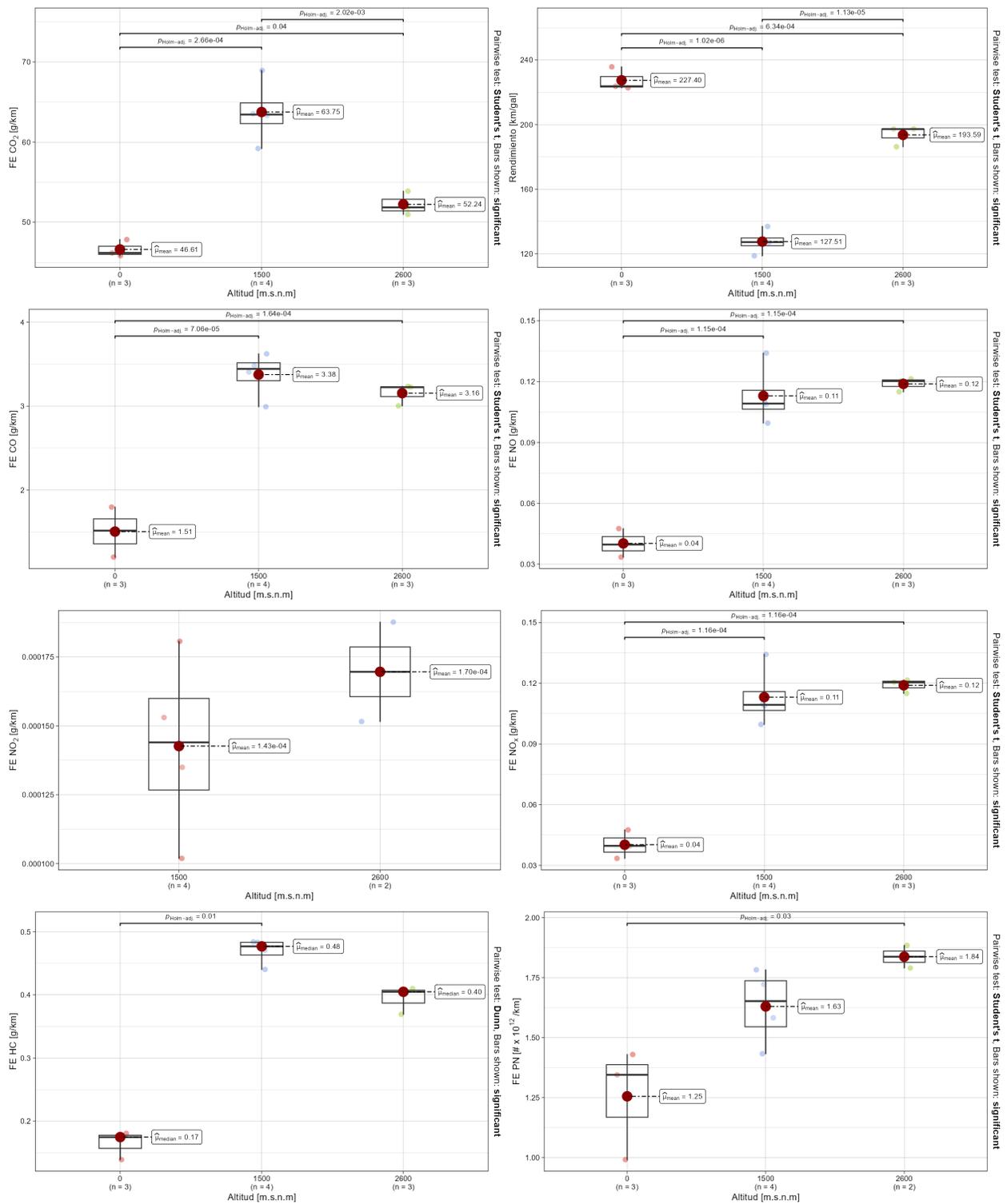


Fig. 52. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 149 cc.

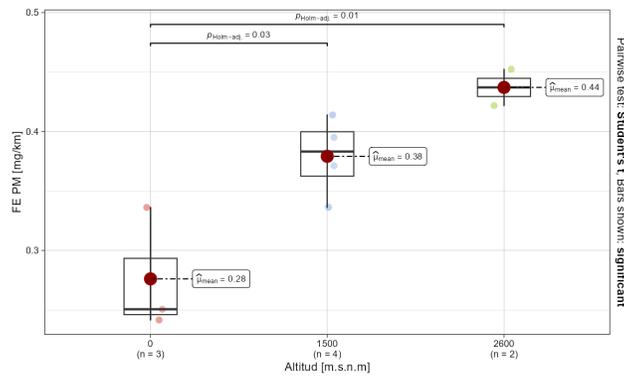
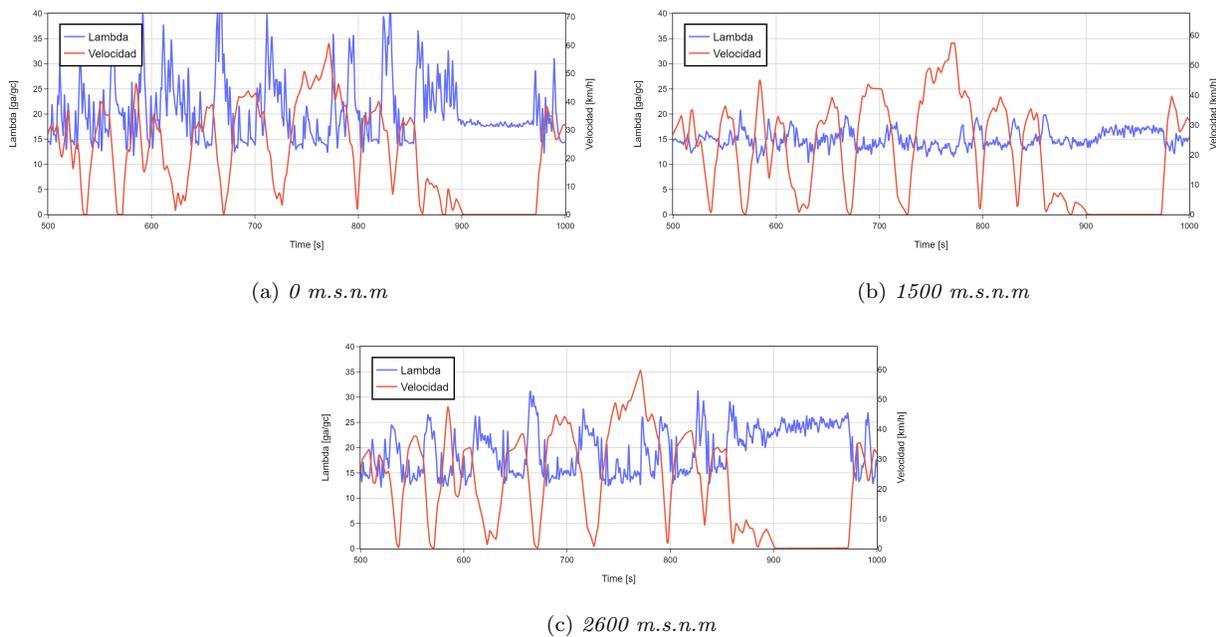


Fig. 53. Impacto de la altitud sobre los FE PM motocicleta 149 cc.

En la **Fig. 52** se observa que los FE de  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$  y  $HC$  presentan una tendencia a aumentar con la altitud. En todos los casos, las emisiones a nivel del mar son menores en comparación con las emisiones a 1500 y 2600 m.s.n.m., siendo estas dos últimas altitudes ligeramente cercanas en sus valores de emisión. Para el caso del material particulado, tanto en número como en masa, se observa una tendencia a aumentar con la altitud de manera lineal (**Fig. 52** y **53**).



(a) 0 m.s.n.m

(b) 1500 m.s.n.m

(c) 2600 m.s.n.m

Fig. 54. Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 149 cc.

En la **Fig. 57** se observan las señales de velocidad y relación aire-combustible (Lamb-  
da) para la motocicleta de 149 cc. En la **Fig. 54a**, se observa una tendencia a mantener una  
relación lambda más estable a nivel del mar, la cual reacciona a las demandas de potencia  
durante los ciclos transitorios. Además, se aprecia que cuando se presenta una disminución  
de velocidad, equivalente a soltar el pedal del acelerador, se disminuye lambda y, por tanto,  
la fracción de combustible usado. Esta estabilidad en la relación lambda, cercana a la rela-  
ción estequiométrica, sugiere una mezcla de aire-combustible más eficiente y controlada, lo  
que resulta en una combustión más completa. Como consecuencia, las emisiones son menores  
a esta altitud, ya que la combustión más eficiente se traduce en menos emisiones de estos  
contaminantes.

Para la altitud de 1500 metros (**Fig. 54b**), la relación aire-combustible presenta po-  
cas fluctuaciones durante los ciclos transitorios, en comparación con el nivel del mar, lo que  
indica una mezcla que no se adapta muy bien a las demandas del motor. Además, se puede  
apreciar que, en comparación con las otras altitudes, en esta, la señal está más por debajo de  
los 15, lo que refleja una mezcla mucho más rica. Esta inestabilidad puede llevar a una com-  
bustión menos eficiente, resultando en mayores emisiones, y una disminución muy marcada  
en el rendimiento de combustible (**Fig. 52 y 53**).

En la **Fig. 54c** se observan las señales de velocidad y relación aire-combustible (Lamb-  
da) para la motocicleta de 149 cc a 2600 m.s.n.m. Aunque la estabilidad de la mezcla mejora  
ligeramente en comparación con 1500 m.s.n.m., el rendimiento del combustible sigue siendo  
considerablemente inferior al nivel del mar, siendo un 34 % menor. Lo mismo sucede con  
las emisiones, las cuales permanecen elevadas debido a la mezcla menos eficiente y la menor  
cantidad de oxígeno disponible para la combustión a esta altitud.

TABLA 28  
 CARACTERÍSTICAS MOTOCICLETA CILINDRADA 180 CC.

Modelo	Kilometraje	Cilindrada	Alimentación	Transmisión
2008	N.A	180	Carburada	Mecánica

La altitud sobre el nivel del mar tuvo efecto estadísticamente significativo sobre los FE, a excepción del  $NO_2$  y rendimiento, en al menos una de las comparaciones para la motocicleta de 180 c.c (Tabla 29). En la Fig. 55 y 56, se observa que las emisiones tienden a ser menores a una altitud de 1500 m.s.n.m., a pesar de presentar el menor rendimiento de combustible. A nivel del mar, se obtuvo el mejor rendimiento, pero también las mayores emisiones de contaminantes, con la excepción del  $CO$ , que fue ligeramente superior al de 1500 m.s.n.m. Una posible explicación para esto es que la motocicleta medida es un modelo 2008 y se utiliza a diario a una altitud de 1500 m.s.n.m., lo que sugiere que podría estar calibrada para operar de manera óptima a esa altitud, resultando en menores emisiones.

TABLA 29  
 IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LOS FE MEDIDOS Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE MOTOCICLETA 180 CC.

Variable	Valor p					
	0-1500	Diferencia	1500-2600	Diferencia	0-2600	Diferencia
$CO_2$	$2,0888e^{-4}$	Sí	0,0013	Sí	0,0157	Sí
Rend.	0,1740	No	0,5155	No	0,5155	No
$CO$	0,5559	No	$8,5937e^{-5}$	Sí	$9,1423e^{-4}$	Sí
$NO$	0,0037	Sí	0,3806	No	0,0048	Sí
$NO_2$	0,6303	No	0,4400	No	0,6923	No
$NO_x$	0,0036	Sí	0,3786	No	0,0047	Sí
$HC$	$6,2375e^{-4}$	Sí	0,0296	Sí	0,0040	Sí
$PN$	0,0107	Sí	0,0107	Sí	0,8488	No
$PM$	$7,3107e^{-6}$	Sí	$5,7980e^{-4}$	Sí	$3,0041e^{-4}$	Sí

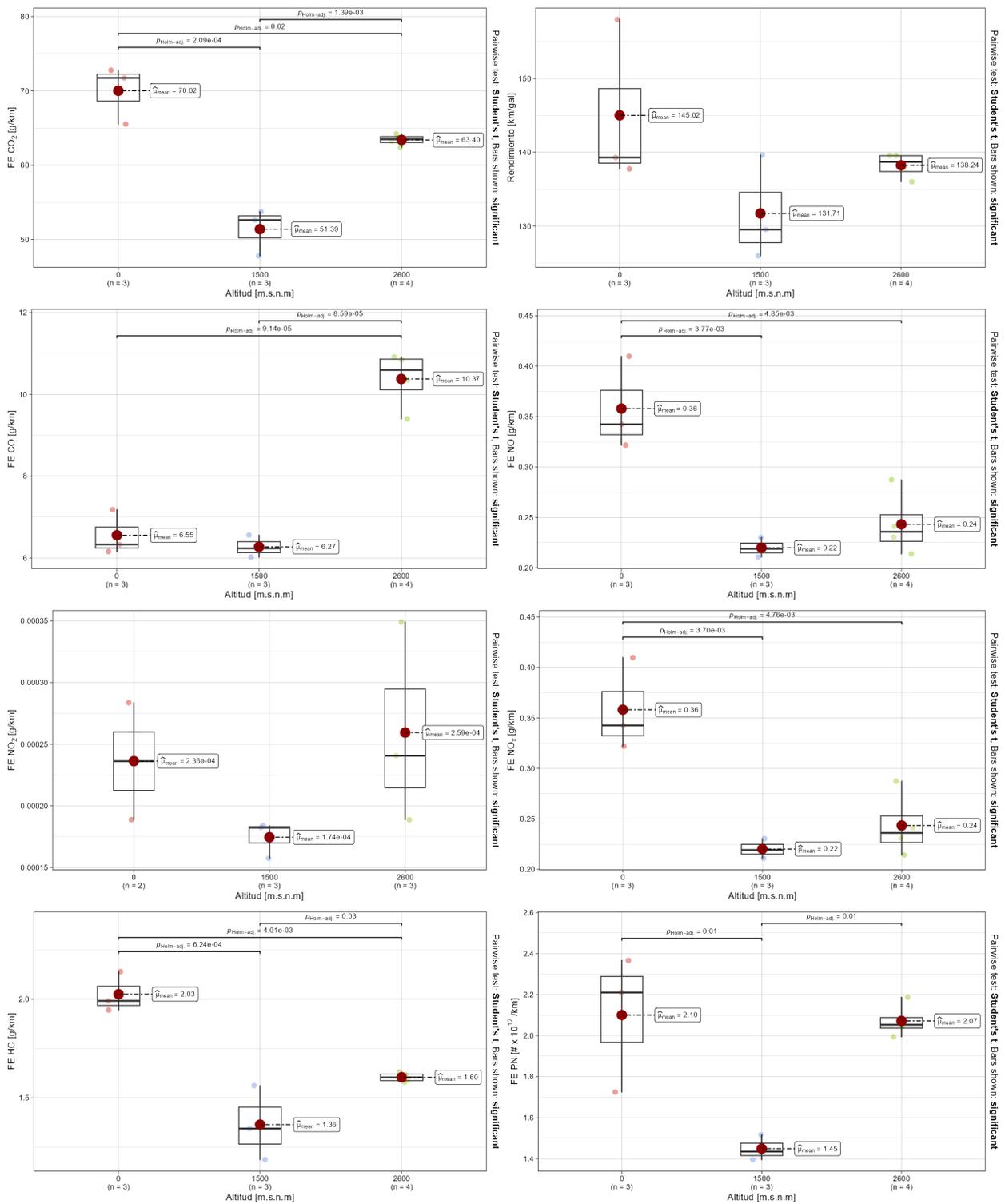


Fig. 55. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 180 cc.

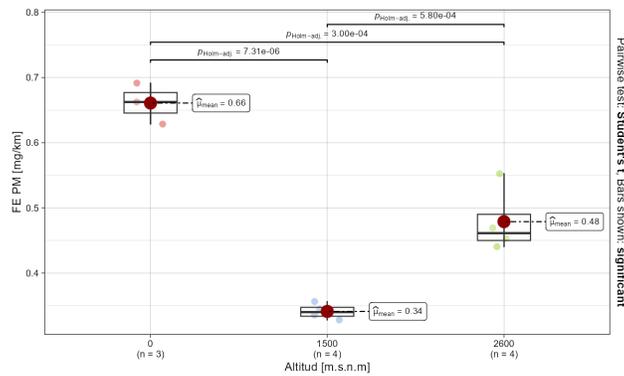


Fig. 56. Impacto de la altitud sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 180 cc.

Además, este efecto sobre el rendimiento de combustible en las motocicletas se puede deber a que para la motocicleta con carburador, en la cual no hay un sistema de control electrónico que regule con precisión el suministro de combustible, no se compensan los cambios de la relación aire/combustible y del rendimiento volumétrico del motor, a medida que cambia la altitud.

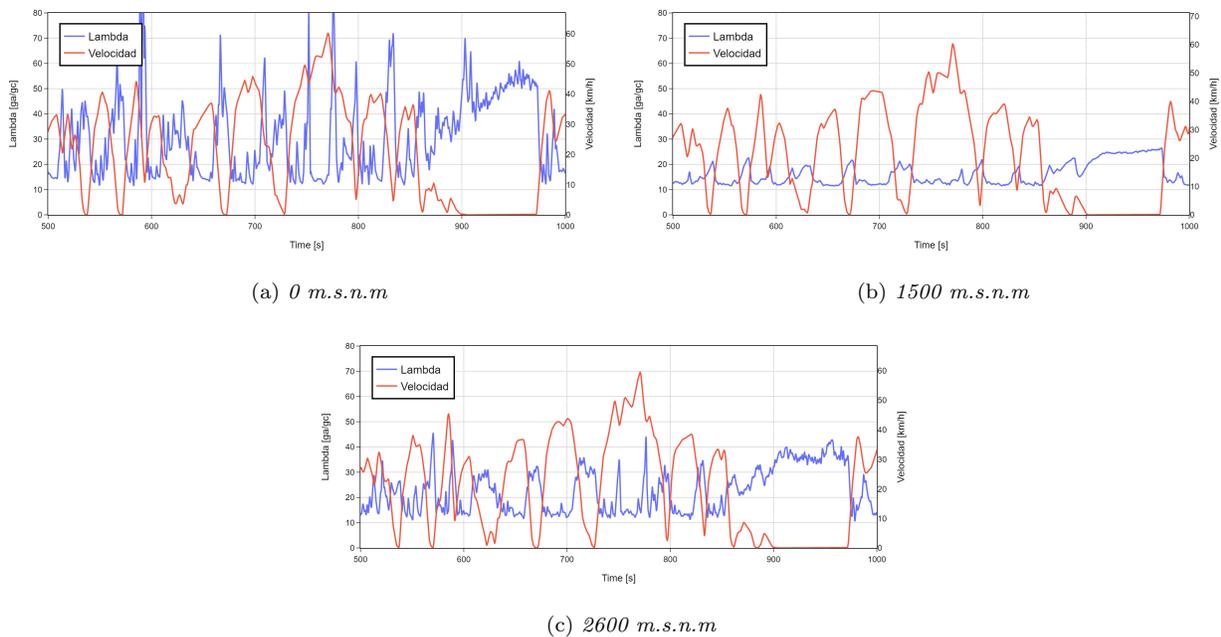


Fig. 57. Impacto de la relación aire-combustible sobre los FE y rendimiento de combustible motocicleta 180 cc.

### 7) Conclusiones

#### Tractocamiones - Categoría TC

- Los tractocamiones del grupo 1 (Euro 5/V) no presentaron una tendencia en las emisiones ni rendimiento de combustible al variar la altitud. Sin embargo, las emisiones de  $NO_x$ ,  $NO$  y  $PN$  son notablemente menores a 1000 m.s.n.m, lo que sugiere que el motor de esos vehículos se adaptó mejor a condiciones intermedias de altitud.
- En los tractocamiones del grupo 2 (Euro 2/II), existe una tendencia lineal de disminución de las emisiones  $CO_2$  con el incremento de la altitud, a pesar de que no existe diferencia estadística significativa. La reducción fue de un 2,28% al pasar de 0 a 1000 msnm, y del 8,14% al pasar de 1000 a 2600 msnm. De igual manera, se observó que el rendimiento de combustible también mejora con el incremento de la altitud. De 0 a 1000 msnm, tiene un aumento del 3,48%, al pasar de 1000 a 2600 msnm se tiene un aumento del 15,46%.

#### Camiones de dos ejes pequeños - Categoría C2P

- Para los C2P del grupo 1 (Euro 2/II), no se observó una tendencia clara en las emisiones de  $PN$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$  y rendimiento, ya que los valores mostraron variabilidad sin un patrón definido al cambiar la altitud. Las emisiones de  $CO$ ,  $NO$  y  $NO_x$  tendieron a aumentar con la altitud.
- Los C2P del grupo 2 (Euro 4/IV), al igual que el grupo 1, se observó una tendencia a aumentar el FE  $CO$  con la altitud sobre el nivel del mar. Para el caso de las otras variables no se observó una tendencia clara de variación con la altitud. Sin embargo, las emisiones de óxidos de nitrógeno presentan un punto de inflexión en la altitud de 1000 msnm.
- Las emisiones de  $HC$  tienden a disminuir significativamente a grandes altitudes para ambos grupos. Para el grupo 1, es de 5,82 g/km para 1000 msnm, y 0,22 g/km para la mayor altitud (2600 msnm), lo que significa una reducción del 96,22%.

#### Camiones de dos ejes grandes - Categoría C2G

- Para los C2G del grupo 1 (Euro 2/II) el  $CO_2$  disminuyó significativamente con la altitud y el rendimiento de combustible mejoró al incrementarse, en ambos casos siguiendo una

tendencia lineal. Las emisiones de óxidos de nitrógeno se observó una tendencia a disminuir con la altitud, siendo más marcada cuando se está a grandes altitudes.

- Los C2G del grupo 2 (Euro IV/V), no presentaron diferencias estadísticas significativas en la mayoría de contaminantes, esto debido a la dispersión entre los datos. Las emisiones de óxidos de nitrógeno tienden a ser menores con el incremento de la altitud.

### **Buses urbanos - Categoría AB**

- Para el grupo 1 (Euro 2/II), la altitud sobre el nivel del mar no tuvo efecto estadístico significativo en las emisiones de  $CO_2$  y rendimiento de combustible. Las emisiones de  $PN$  y  $NO$  tienen un mínimo a los 1000 msnm, mientras que el valor máximo se presenta a los 2600 msnm.
- Para el grupo 2 (Euro 4/IV), el FE  $CO$  y  $NO_x$  tienden a aumentar de manera lineal con la altitud. Las emisiones de  $PN$  tienden a ser mucho mayores a grandes altitudes, en comparación 0 y 1000 msnm.
- Las emisiones de  $HC$  se reducen hasta 28 veces cuando los vehículos están a la máxima altitud (2600 msnm).

### **Vehículos livianos**

- Sobre el vehículo de 1600 cc, la altitud tuvo efecto estadístico significativo sobre las emisiones de  $CO_2$ , presentando una tendencia a disminuir de manera lineal con la altitud, sin embargo, el rendimiento de combustible no presentó la misma tendencia.
- Todas las emisiones, a excepción del  $CO_2$ , presentaron una tendencia de aumento para la altitud de 1500 msnm para ambos vehículos. Para el material particulado, tanto en número  $PN$ , como en masa ( $PM$ ), presentaron una disminución muy marcada cuando se está a nivel del mar; al igual que sucedió con los  $HC$  a la mayor altitud.
- Para el vehículo de 3500 cc, las emisiones de  $CO_2$  disminuyeron con la altitud, a pesar de que este efecto sea ligeramente menor cuando se pasa de 0 a 1500 msnm.
- El vehículo de 3500 cc, con año de modelo 2005, presentó variaciones poco significativas en la relación aire-combustible de una altitud a otra, lo que afectó en las emisiones y rendimiento de combustible. Lo anterior, dejó en evidencia la importancia de la evolución

de los sistemas de control del motor. Estos sistemas modernos buscan que los motores se adapten mejor a las condiciones de operación impuestas por el entorno, con el objetivo de mantener niveles óptimos de consumo y emisiones.

### **Motocicletas**

- La altitud tuvo efecto estadístico significativo sobre las emisiones y rendimiento de combustible sobre la motocicleta de 149 cc. Los FE de *CO*, *NO*, *NO<sub>2</sub>*, *NO<sub>x</sub>* y *HC* presentaron una tendencia a aumentar con la altitud. Para el material particulado, tanto en número (*PN*), como en masa (*PM*), se observó una tendencia a aumentar con la altitud de manera lineal.
- Se observó una disminución significativa del rendimiento de combustible a 1500 msnm, siendo un 44 % menor que a nivel del mar y un 34 % menor que a la mayor altitud. Esto sugiere que la motocicleta debería ser calibrada si se va a operar a esa altitud.
- Para la motocicleta de 180 cc, las emisiones de *CO* tendieron a aumentar drásticamente a grandes altitudes. Mientras que las emisiones de *NO*, *NO<sub>x</sub>* y *HC* lo hicieron a nivel del mar.

*C. Efecto de la tecnología sobre los factores de emisión y el consumo de combustible.*

En un estudio reciente, Kim et al. [43] analizaron la eficiencia de diversos dispositivos de reducción de  $NOx$ , como la recirculación de gases de escape (EGR), la trampa de  $NOx$  (LNT), la reducción catalítica selectiva (SCR) y el catalizador de oxidación de amoníaco (AOC). Se encontró que la eficiencia de reducción de  $NOx$  es mayor con el sistema SCR, alcanzando hasta un 97% bajo el modo de conducción WLTP. Este sistema es más efectivo que los dispositivos LNT, que presentan una eficiencia menor debido a su dependencia de la regeneración periódica del  $NOx$  almacenado.

Además, la temperatura de los gases de escape juega un papel crucial en la eficiencia de los sistemas de control de emisiones. Un estudio encontró que a temperaturas de escape más bajas, la eficiencia de los catalizadores y los filtros de partículas se reduce, lo que resulta en mayores emisiones de  $NOx$  y CO. Sin embargo, se observó que el uso de tecnologías avanzadas, como los sistemas SCR, puede mitigar este efecto, mejorando la eficiencia de la conversión de  $NOx$  incluso a temperaturas más bajas [44].

Por otra parte, un estudio comparativo entre tecnologías de control de emisiones en vehículos diésel encontró que los sistemas SCR y los filtros de partículas diésel (DPF) son altamente efectivos para reducir las emisiones de  $NOx$  y partículas. Los resultados mostraron que los vehículos equipados con estas tecnologías emitían significativamente menos contaminantes en comparación con los vehículos que solo utilizan EGR. La combinación de SCR y DPF proporciona una solución eficiente para cumplir con las estrictas normas de emisiones [45]. De manera similar, en un análisis de vehículos pesados con diferentes tecnologías de control de emisiones, se observó que aquellos equipados con sistemas de postratamiento avanzados, como SCR y DPF, presentaban una reducción significativa en las emisiones de  $NOx$  y partículas [46].

En el ámbito de las motocicletas, el estudio de Huang et al. [47] comparó los factores

de emisión de motocicletas equipadas con carburadores y sistemas de inyección electrónica de combustible. Se encontró que las motocicletas con inyección electrónica mostraron una reducción significativa en las emisiones de CO y THC en comparación con las de carburador. Sin embargo, las emisiones de NO<sub>x</sub> aumentaron ligeramente en motocicletas con inyección electrónica. Estos resultados sugieren que la tecnología de inyección electrónica mejora la eficiencia de la combustión y reduce algunas emisiones contaminantes, aunque puede aumentar otras.

Asimismo, en un análisis realizado por Wang et al. [48], se evaluaron las emisiones de diferentes tipos de motocicletas en Shanghai. Se destacó que las motocicletas con motores de dos tiempos y carburador presentaban factores de emisión significativamente más altos para VOC y PM en comparación con motocicletas con motores de cuatro tiempos y sistemas de inyección. Este estudio subraya la importancia de la tecnología de inyección para reducir las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire urbano.

Finalmente, el trabajo de Du et al. [49] examinó el impacto de la tecnología de inyección de combustible en las emisiones de vehículos de gasolina. Los vehículos con inyección directa (GDI) mostraron mayores emisiones de NO<sub>x</sub> y PN en comparación con los vehículos con inyección multipunto (MPI). Las mayores emisiones de NO<sub>x</sub> y PN en los motores DI se atribuyen a la mezcla menos homogénea y a las temperaturas más altas de combustión. Estos resultados subrayan la necesidad de tecnologías avanzadas de control de emisiones para los motores GDI.

En este capítulo se presenta un análisis estadístico de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95 % ( $p = 0,05$ ) de todos los datos de FE y rendimiento de combustible, separados por altitud y tecnología de control de emisiones para el caso de los vehículos pesados de carga y pasajeros, mientras que para la categoría motocicletas y vehículos livianos, se hizo el análisis del tipo de inyección y alimentación de combustible, respectivamente.

Para el caso de los vehículos pesados, los fabricantes han adoptado diversas estrategias para el control de emisiones, las cuales varían entre ellos. Algunos se han enfocado en optimizar los diseños de las cámaras de combustión, aumentar la presión de inyección, emplear técnicas de inyección dividida o múltiples inyecciones, y utilizar diferentes tipos de sistemas de postratamiento para los gases de escape. En términos generales, las tecnologías de control de emisiones se pueden resumir en:

- PreEuro: ningún sistema de postratamiento, bajas presiones de inyección, sistemas de inyección hidráulicos.
- Euro I, Euro II y Euro III (o sus equivalentes en EPA): pueden incluir sistemas de mediana presión de inyección, y en algunos casos incorporan una preinyección. Dependiendo del fabricante incorporan sistema EGR de alta presión, y sistema de oxidación catalítica diésel (DOC).
- Euro IV: Normalmente elevan la presión por encima de los 1000 bar, algunos incluyen estrategias de preinyección, vienen dotados con EGR de alta presión refrigerado y DOC. Algunos fabricantes incluyen turbina de geometría variable.
- Euro V: Además de los sistemas EURO IV, este incluye el sistema de catálisis selectiva a NO<sub>x</sub> (SCR).
- Euro VI: Incorporan todas las tecnologías de Euro V y añaden un filtro de partículas diésel (DPF) y un sistema mejorado de catálisis selectiva (SCR) para reducir aún más las emisiones de NO<sub>x</sub>. También suelen incluir sistemas de monitorización y diagnóstico a bordo (OBD) más avanzados para asegurar el cumplimiento continuo de los límites de emisiones. [6]

1) *Tractocamiones - Categoría TC* El análisis estadístico de varianza (ANOVA) arrojó que existen diferencias significativas en todas las comparaciones por tecnología de control de emisiones para los vehículos medidos en las tres altitudes.

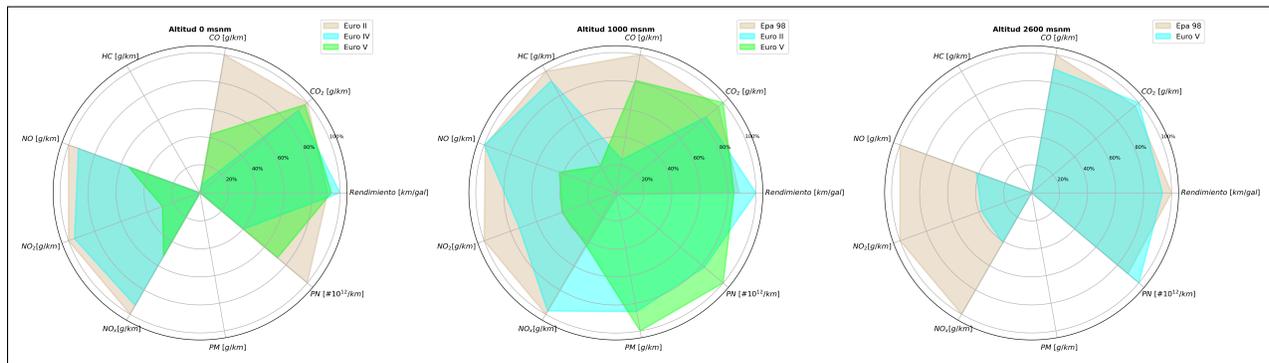


Fig. 58. Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos TC.

En la **Fig. 58**, se muestra una vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre los factores de emisión (FE) y el rendimiento de combustible para vehículos de la categoría TC a diferentes altitudes (0 m.s.n.m, 1000 m.s.n.m, y 2600 m.s.n.m). En estas gráficas, los valores promedio están normalizados, lo que permite apreciar en términos de porcentaje la variación entre diferentes tecnologías.

A nivel del mar (0 m.s.n.m), se observa una reducción significativa en las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) con la tecnología Euro V/5 en comparación con Euro II/2. Esto refleja la efectividad de las tecnologías avanzadas de control de emisiones, como el sistema de Reducción Catalítica Selectiva (SCR), en reducir las emisiones de contaminantes. Sin embargo, el rendimiento de combustible no muestra una mejora notable con la tecnología Euro V/5, lo que sugiere que, aunque las emisiones se reducen, la eficiencia de combustible no necesariamente aumenta con la tecnología más avanzada en estas condiciones.

A una altitud de 1000 y 2600 m.s.n.m, el impacto de la tecnología de control de emisiones sigue siendo notable. La reducción en las emisiones para los vehículos con tecnologías más nuevas para los  $NO_x$  se mantiene alrededor del 60%. Sin embargo, similar a las otras altitudes, no se observa una mejora significativa en el rendimiento de combustible con la tecnología Euro V/5, lo que sugiere que estas tecnologías, aunque efectivas en la reducción

de emisiones, no mejoran la eficiencia del combustible en condiciones de alta altitud. Por otro lado, el vehículo con tecnología Euro V/5 a 1000 m.s.n.m, presentó mayores emisiones de material particulado, por lo que es recomendable ajustar un sistema DPF para ayudar a reducirlas.

En la **Fig. 59 y 60**, se muestra una comparativa entre un vehículo Euro V/5 provisto con SCR y un vehículo Euro II. Se puede apreciar el papel crucial que juega la temperatura de las gases de escape en la eficiencia de los sistemas de control de emisiones. Durante la fase de flujo congestionado y mixto, la temperatura de los gases de escape se mantiene alrededor de los 100°. Según lo reportaron, el funcionamiento óptimo del sistema SCR se da a partir de los 200°. Por lo que, a medida que el motor alcanza velocidades mucho más altas, este alcanza esa temperatura ideal de operación, lo que resulta en una reducción muy significativa de las emisiones de  $NO_x$  (línea azul) durante esta sección del ciclo fluido. Esto también se evidencia a través de la línea verde de  $NO_x$  acumulado, en la que se evidencia como disminuye la pendiente a partir de esa temperatura, en comparación con el inicio de esa parte del ciclo.

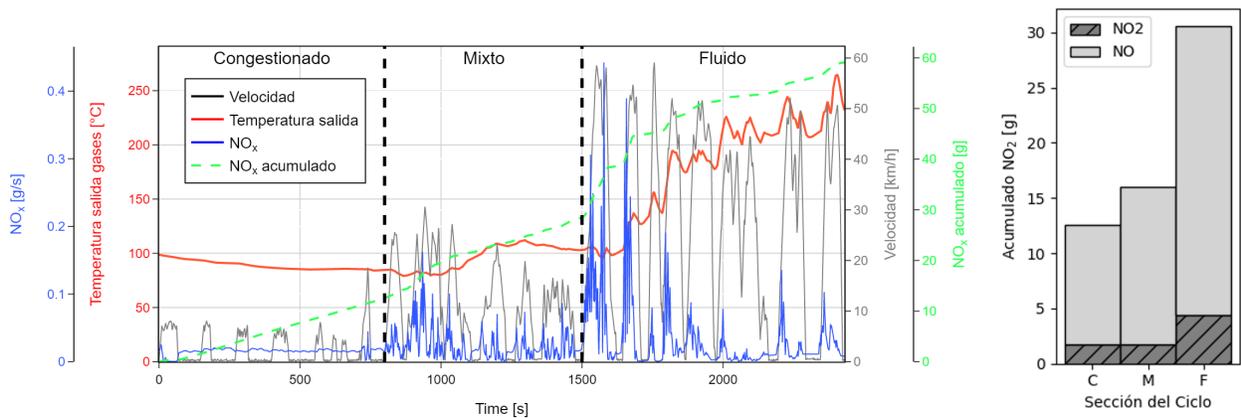


Fig. 59. Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo Euro V.

Para el caso del vehículo Euro II (**Fig. 60**), se observa como las emisiones de  $NO_x$  son máximas durante la fase fluida, teniendo un valor acumulado de 95 g, mientras que para el vehículo provisto con SCR es de 30 g, lo que refleja una reducción del 70 %, destacando la

importancia de la introducción de esta tecnología en los vehículos.

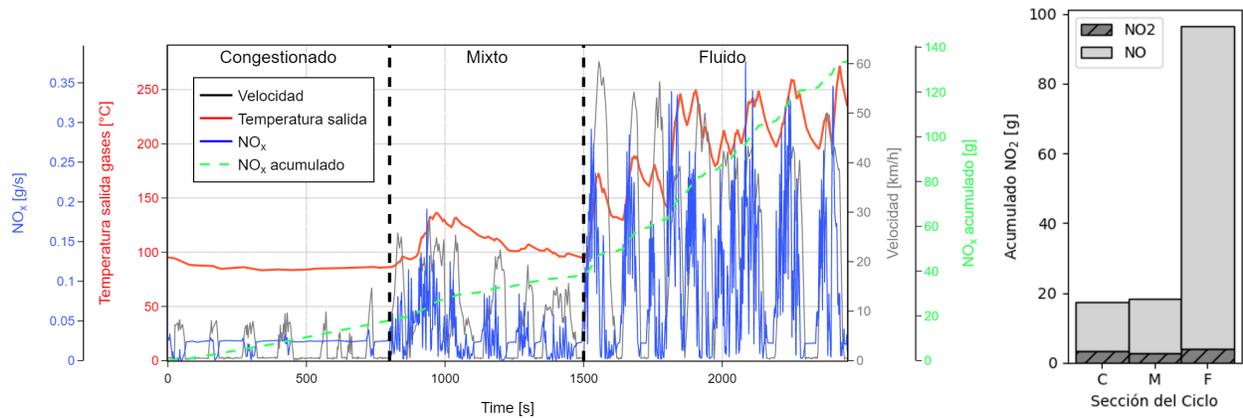


Fig. 60. Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo Euro II.

2) Camiones de dos ejes pequeños - Categoría C2P Los resultados del análisis estadístico de varianza (ANOVA) mostraron que existen diferencias estadísticas significativas entre las tecnologías de control de emisiones que se compararon.

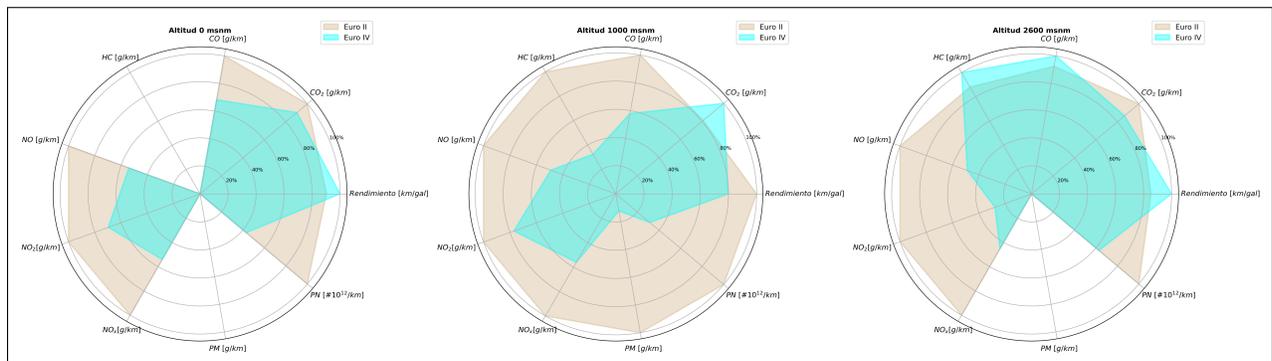


Fig. 61. Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos C2P.

Al igual que para la categoría TC, en la Fig. 61, se observa que para todas las altitudes, los vehículos con tecnología Euro IV muestran una reducción significativa en las emisiones de  $NO_x$  en comparación con los vehículos Euro II. Sin embargo, el rendimiento de combustible aumentó para la tecnología de control Euro IV medidas a 0 y 2600 m.s.n.m. Además, las emisiones de CO, HC y material particulado (PM y PN), disminuyeron para

las altitudes de 0 y 1000 m.s.n.m. Esta reducción puede deberse a que estos vehículos están equipados con catalizadores de oxidación diésel (DOC), los cuales contribuyen indirectamente a la disminución de partículas (PM) al oxidar hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) presentes en los gases de escape.

3) *Camiones de dos ejes grandes - Categoría C2G* El análisis de varianza (ANOVA) demostró que existen diferencias estadísticas significativas para todas las variables y comparaciones que se realizaron para esta categoría.

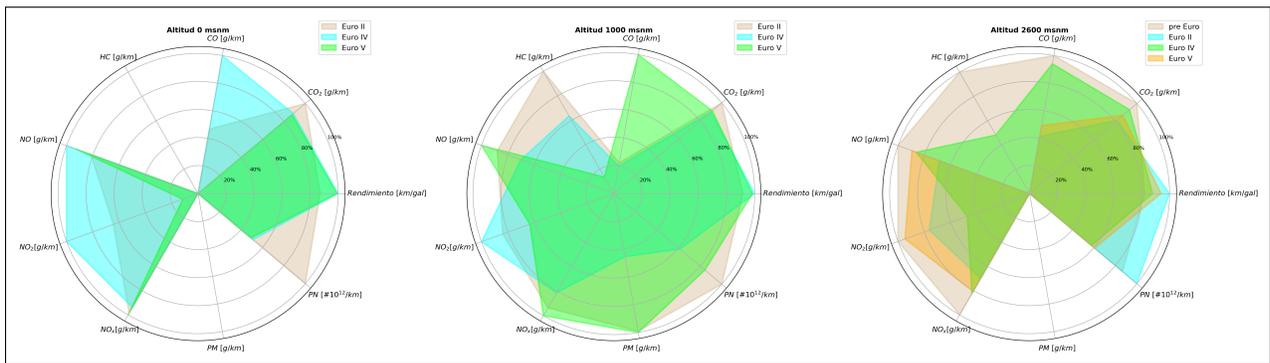


Fig. 62. Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos C2G.

En la Fig. 62, se observa que para el nivel del mar, la tendencia de reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno sigue siendo igual a las categorías que se mencionaron anteriormente. Las emisiones de  $NO_x$  se reducen en un 90% para los vehículos Euro V, en comparación con el vehículo Euro IV, que fue el que presentó mayores emisiones de estos contaminantes. Por otro lado, para todas las altitudes se observa como el rendimiento de combustible aumenta ligeramente con las tecnologías de control más recientes, esto puede estar relacionado con la necesidad que tienen estos sistemas de mantener una temperatura óptima de operación para que el sistema de postratamiento opere de la mejor manera, lo que puede llevar a un aumento en el consumo de combustible.

Para el caso de los vehículos Euro V/5 que se midieron a 1000 y 2600 metros sobre el nivel del mar, se observaron incrementos en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) a pesar de estar equipados con sistemas de Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Este fenómeno podría indicar que los sistemas SCR no estaban funcionando de manera óptima o que se encontraban inactivos durante las pruebas. Esta ineficiencia también se reflejó en las emisiones de material particulado (PM), tanto en masa como en número.

Por ejemplo, a 2600 metros sobre el nivel del mar, los vehículos Euro V/5 presentaron niveles de emisiones de NOx similares a los de un vehículo pre Euro, lo cual es notable dado que las tecnologías Euro V y pre Euro tienen aproximadamente 20 años de diferencia en términos de avances tecnológicos. Este resultado sugiere que, aunque los vehículos modernos están equipados con tecnologías avanzadas de control de emisiones, su eficacia puede verse comprometida por factores externos al vehículo.

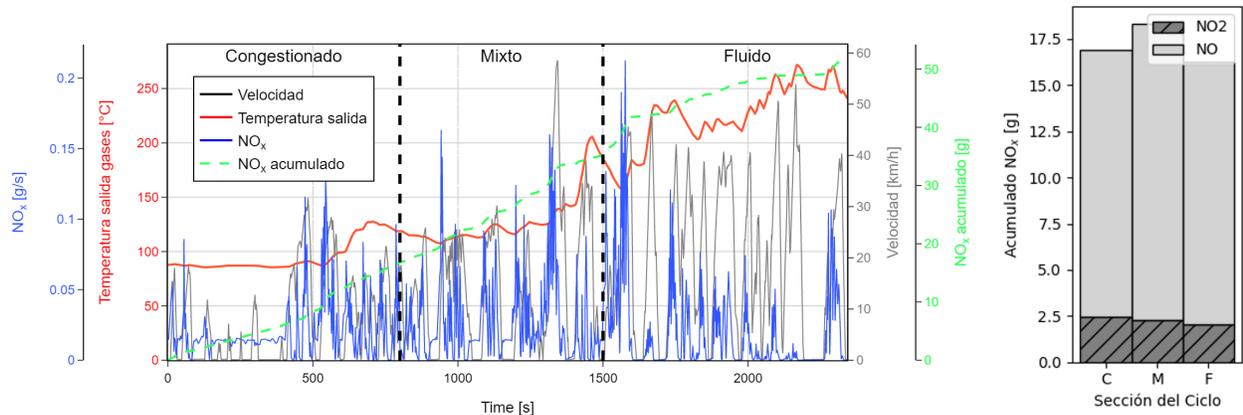


Fig. 63. Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo C2G Euro V.

En las Fig. 63, 64 y 65, se presentan las señales de velocidad, temperatura de los gases de escape y emisiones de óxidos de nitrógeno para los vehículos con tecnologías Euro V/5, Euro IV/4 y Euro II/2, respectivamente.

Para el vehículo con tecnología Euro V (Fig. 63), se observa una disminución nota-

ble en las emisiones de  $NO_x$  cuando la temperatura de los gases de escape supera los  $200^\circ\text{C}$ . Aunque la gráfica de barras de la derecha muestra que el vehículo emitió aproximadamente la misma cantidad de  $NO_x$  en las tres fases del ciclo (congestionado, mixto y fluido), es importante destacar que la fase fluida tiene una mayor duración y las velocidades son más altas. Este comportamiento se refleja en la pendiente de la línea de  $NO_x$  acumulado (línea verde), que es menos pronunciada en la fase fluida en comparación con las otras fases, indicando una mayor eficiencia del sistema SCR a altas temperaturas.

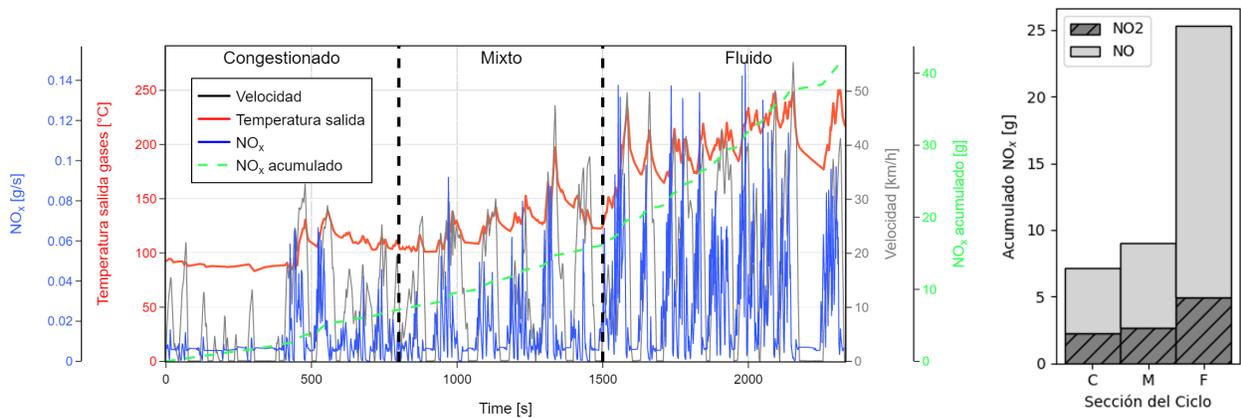


Fig. 64. Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo C2G Euro IV.

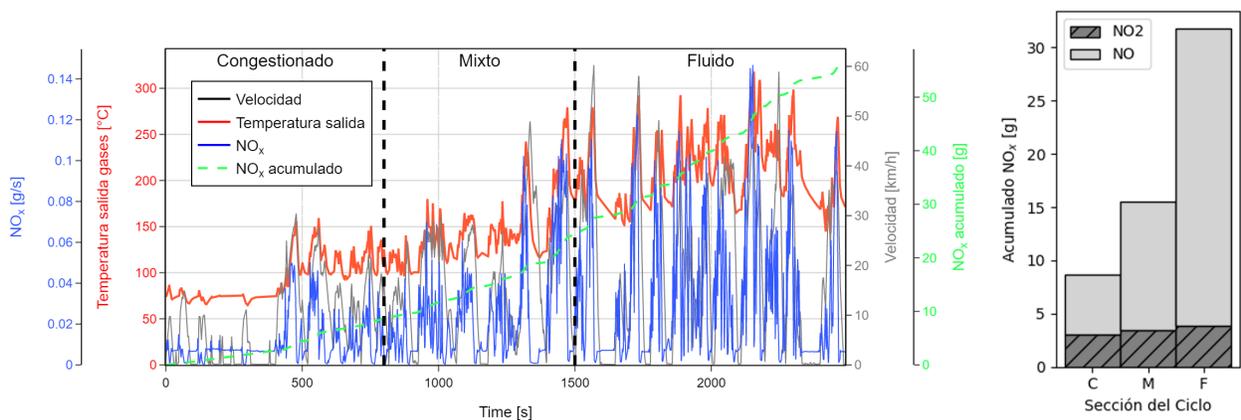


Fig. 65. Impacto de la temperatura en la eficiencia de los sistemas de postratamiento vehículo C2G Euro II.

Para los vehículos que no contaban con SCR (**Fig. 64** y **65**), se observa que no existe

una reducción significativa en las emisiones de  $NO_x$ , debido a la ausencia de este sistema. Durante la fase de régimen fluido, las emisiones de  $NO_x$  fueron un 30 % y un 42 % más altas para los vehículos Euro IV/4 y Euro II/2, respectivamente, en comparación con el vehículo Euro V/5. No obstante, el acumulado total de  $NO_x$  muestra que el vehículo con tecnología Euro V/5 emitió una cantidad similar al vehículo Euro II/2 y Euro IV/4.

Al observar los gráficos de barra de la derecha, se nota que el vehículo Euro V/5 emitió aproximadamente la misma cantidad de  $NO_x$  en las tres fases del ciclo, mientras que los vehículos con tecnologías anteriores presentaron menores emisiones durante las fases congestionada y mixta. Específicamente, las emisiones fueron aproximadamente un 50 % menores en la fase congestionada para ambos vehículos Euro IV/4 y Euro II/2. Para la fase mixta, las emisiones del vehículo Euro IV/4 fueron un 50 % menores y las del Euro II/2 un 17 % menores comparadas con el vehículo Euro V/5.

Esto sugiere que, aunque la reducción de emisiones de  $NO_x$  durante la fase de flujo fluido es notable en comparación con tecnologías anteriores, las fases de flujo congestionado y mixto presentaron mayores emisiones para el vehículo Euro V/5. Esta diferencia en la eficiencia de reducción de emisiones en distintas fases del ciclo resalta la importancia de las condiciones de operación y la gestión térmica en los sistemas de postratamiento de gases de escape. Es crucial para los sistemas SCR mantener temperaturas adecuadas para maximizar su efectividad en la reducción de  $NO_x$ , especialmente en condiciones de tráfico congestionado y mixto [50].

4) *Buses urbanos - Categoría AB* En la **Fig. 66**, se muestra una vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre los FE y el rendimiento de combustible para vehículos de la categoría AB a diferentes altitudes. El análisis de varianza (ANOVA), mostró que existen diferencias estadísticas significativas para todas las comparaciones.

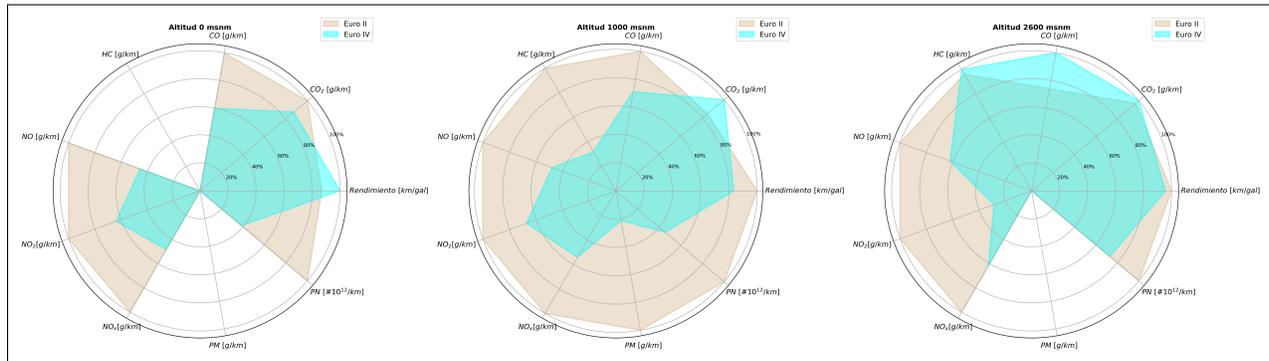


Fig. 66. Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos AB.

A nivel del mar y a 2600 m.s.n.m, se observa una reducción significativa en las emisiones de  $NO_x$  con tecnología Euro IV/4 en comparación con Euro II, una tendencia consistente con la observada en otras categorías. Sin embargo, el rendimiento de combustible no muestra una mejora notable con la tecnología Euro IV/4, lo que sugiere que, aunque las emisiones se reducen, el rendimiento de combustible no necesariamente aumenta con la implementación de tecnología más avanzada en estas condiciones.

A una altitud de 1000 metros sobre el nivel del mar, el impacto de la tecnología de control de emisiones sigue siendo notable para los  $NO_x$  y  $CO$ . Además, se observa una reducción en las emisiones de material particulado, tanto en número (PN) como en masa (PM), así como en los hidrocarburos totales sin quemar (HC). La reducción supera el 60% al mejorar a tecnología Euro IV/4 en comparación con Euro II. Estas mejoras reflejan la eficacia de las tecnologías avanzadas en la reducción de emisiones en condiciones de altitud intermedia.

5) *Vehículos livianos* Para los vehículos livianos se presenta el análisis sobre el impacto del tipo de alimentación, a saber, inyección por multipunto e inyección directa para 30 vehículos livianos que se midieron a la altitud de la ciudad de Medellín (1500 m.s.n.m). En la **Tabla 30** se muestran los resultados del análisis estadístico de varianza (ANOVA), donde se obtuvieron los valores P, con un nivel de significancia del 95% (valor  $P < 0.05$ ). El

tipo de alimentación solo tuvo efecto estadístico significativo sobre los FE de  $CO$ ,  $NO$  y  $NO_x$ .

TABLA 30  
IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA SOBRE LOS FE Y EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE  
VEHÍCULOS LIVIANOS.

Variable	Valor p	Diferencia
$CO_2$	0,8120	No
<i>Rend.</i>	0,1053	No
$CO$	$1,1372E - 7$	Sí
$NO$	0,0059	Sí
$NO_2$	0,1178	No
$NO_x$	0,0019	Sí
$HC$	0,3900	No
$PN$	0,4981	No
$PM$	0,4084	No

En la **Fig. 67**, se muestra la comparación entre los resultados promedios para cada FE y rendimiento de combustible. Aunque algunas variables no mostraron diferencias estadísticamente significativas, se realizó el análisis con los valores promedios para proporcionar una visión general del comportamiento de las diferentes tecnologías evaluadas. Los valores se encuentran normalizados para identificar diferencias en términos de porcentajes entre tecnologías. Además, la franja verde corresponde al límite máximo permisible según la Resolución 0762 de julio de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, el cual en su Capítulo II, Artículo 14 (Tabla 10) establece que los vehículos livianos nuevos que se vendan en el país a partir del 1° de enero de 2023 deben cumplir con los límites de emisiones que se muestran en la **Tabla 31**.

El ciclo de conducción FTP-75 es diferente a los elaborados por la UPME y la Universidad de Antioquia, los cuales fueron realizados a partir de las pautas de conducción y particularidades de la malla vial y niveles de congestión de las principales ciudades colombia-

TABLA 31

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN PARA FUENTES MÓVILES DE CARRETERA CLASIFICADAS COMO VEHÍCULOS LIVIANOS Y MEDIANOS CON MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA DE FUNCIONAMIENTO CON GASOLINA EN PRUEBA DINÁMICA, EVALUADOS MEDIANTE CICLOS DE ESTADOS UNIDOS (FTP-75).

<b>Categoría</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>HCNM</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>
	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
LDV	2.11	0.25	0.16	0.25

nas (Bogotá, Cali y Barranquilla). Por lo tanto, es de esperarse que los ciclos de conducción locales sean más agresivos que los de homologación, y en consecuencia, los factores de emisión (FE) sean mayores. Sin embargo, en la **Fig. 67** se observa que los vehículos provistos con inyección directa de gasolina (GDI) cumplen sobradamente con los límites exigidos por la resolución. Por otro lado, los vehículos con inyección por multipunto, cumplieron con los límites para HC y  $NO_x$ . Sin embargo, a pesar de que no cumplen con el límite para el CO, el promedio se encuentra un 10% por debajo del límite.

El rendimiento de combustible fue un 17% mejor para los vehículos con inyección directa en comparación con los de inyección multipunto. Además, los vehículos con tecnología GDI mostraron una reducción significativa en las emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO), con una reducción del 24% y 60% respectivamente, en comparación con los vehículos con inyección multipunto. Sin embargo, las emisiones de material particulado (PN) y óxidos de nitrógeno ( $NO_2$ ) fueron mayores en los vehículos con tecnología GDI, a pesar de que estos últimos se emitan en cantidades muy pequeñas, debido a que son motores que operan en condiciones estequiométricas. Estos resultados destacan la efectividad de la inyección directa en la mejora del rendimiento de combustible y la reducción de las emisiones contaminantes, a excepción del número de partículas (PN), lo que subraya la necesidad de mejorar el control de emisiones de PN en esta tecnología, al igual que lo señalaron Du et al [49].

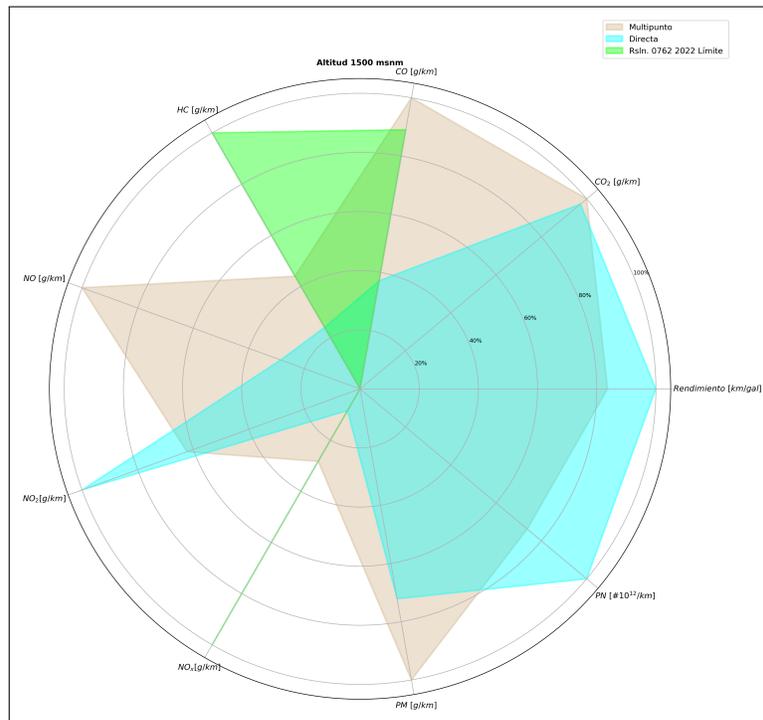


Fig. 67. Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de vehículos livianos.

6) *Motocicletas* En el caso de las motocicletas se realizó el análisis para el tipo de alimentación de combustible, a saber, carburador e inyección electrónica. La **Tabla 32** resume los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las motocicletas medidas a 1500 m.s.n.m. Las motocicletas evaluadas incluyeron modelos con cilindradas inferiores a 200 c.c. Se encontró que el tipo de alimentación tuvo un efecto estadístico significativo sobre el rendimiento de combustible y los factores de emisión (FE), con excepción de las emisiones de  $NO$  y  $NO_x$ .

En la **Fig. 68**, se muestra la comparación entre los resultados promedios para cada FE y rendimiento de combustible. Además, las franjas verde y roja, representan los límites máximo permisible según la Resolución 0762 de julio de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, el cual en su Capítulo I, Artículo 13 (Tabla 7) establece que las motocicletas nuevas que se vendan en el país a partir del 1° de enero de 2023 deben cumplir con los límites de emisiones de la **Tabla. 33**.

TABLA 32  
IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA SOBRE LOS FE Y EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE DE  
MOTOCICLETAS.

Variable	Valor p	Diferencia
$CO_2$	0,0148	Sí
<i>Rend.</i>	$2,3E - 5$	Sí
$CO$	$4,2330E - 8$	Sí
$NO$	0,1621	No
$NO_2$	0,0074	Sí
$NO_x$	0,6912	No
$HC$	$2,0091E - 8$	Sí
$PN$	$1,5192E - 8$	Sí
$PM$	$2,5568E - 8$	Sí

TABLA 33  
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN PARA MOTOCICLETAS (DOS RUEDAS) CON  
MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA EN PRUEBA DINÁMICA, EVALUADOS MEDIANTE  
CICLOS DE LA UNIÓN EUROPEA (ECE R-40 Y ECE R-40 + EUDC, SEGÚN CORRESPONDA) -  
EURO 3.

Categoría	Ciclo	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
Cilindraje < 150 cc	ECE R-40	2,0	0,8	0,17
Cilindraje $\geq$ 150 cc	ECE R-40 + EUDC	2,0	0,3	0,15

Por las mismas razones que para los vehículos livianos, los ciclos de homologación para motocicletas difieren de los elaborados por la UPME. En consecuencia, es esperable que los ciclos de conducción locales sean más exigentes que los de homologación, lo que resulta en factores de emisión más altos. No obstante, en la **Fig. 68**, se observa que las motocicletas equipadas con inyección electrónica cumplen con las normativas de emisión colombianas, equivalentes a Euro III/3, incluso bajo condiciones de conducción más severas. Por otro lado, las motocicletas con carburador no cumplieron las exigencias de  $CO$  y  $HC$  para motocicletas con cilindradas mayores a 150 c.c. El factor de emisión ( $FE$ ) de  $CO$  estuvo aproximadamente un 70% por encima de lo que exige la resolución, mientras que para  $HC$  se encuentra un 10% por arriba. Esto refleja la necesidad de impulsar el uso de la inyección electrónica como

estrategia para disminuir las emisiones contaminantes y, a su vez, cumplir con los límites exigidos por la normativa colombiana.

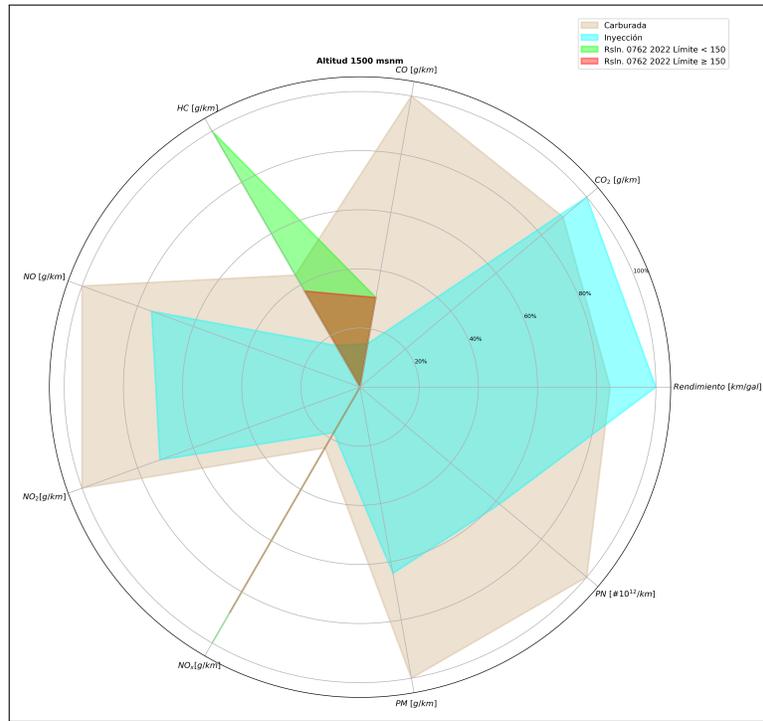


Fig. 68. Vista esquemática del impacto de la tecnología de control de emisiones sobre rendimiento de combustible y factores de emisión de motocicletas.

En la **Fig. 68**, se evidencia que las motocicletas equipadas con inyección electrónica no solo cumplen con las normativas de emisión colombianas equivalentes a Euro III/3, sino que también presentan un rendimiento significativamente superior en comparación con las motocicletas con carburador. Específicamente, las motocicletas con inyección electrónica muestran un rendimiento de combustible un 20% mayor que las provistas con carburador. Además, la inyección electrónica permite una reducción notable en todas las emisiones contaminantes, incluidos *CO*, *HC*, *NO<sub>x</sub>*, *PM* y *PN*. En comparación con las motocicletas de carburador, las motocicletas con inyección electrónica reducen las emisiones de *CO* aproximadamente en un 70% y las emisiones de *HC* en un 60%. Estos resultados subrayan la efectividad de la tecnología de inyección electrónica no solo en mejorar la eficiencia del combustible, sino también en disminuir significativamente las emisiones de contaminantes.

## 7) Conclusiones

### Tractocamiones - Categoría TC

- La tecnología de control de emisiones Euro V/5 para tractocamiones mostró una reducción significativa de  $NO_x$  en todas las altitudes, pero no mejoró el rendimiento de combustible en comparación con Euro II/2. Las emisiones de  $NO_x$  se redujeron en un 60% al comparar los vehículos Euro II/2 con Euro V/5.
- El análisis de la temperatura de los gases de escape mostró que la eficiencia del sistema SCR es óptima a temperaturas superiores a 200°C, las cuales se alcanzaron en condiciones de tráfico fluido. Sin embargo, en condiciones de tráfico congestionado y mixto, donde las temperaturas son más bajas, se observó una mayor emisión acumulada de  $NO_x$ , lo que indica la necesidad de optimizar la gestión térmica del SCR.

### Camiones de dos ejes pequeños - Categoría C2P

- Para camiones de dos ejes pequeños (C2P), la tecnología Euro IV/4 demostró una disminución notable en las emisiones de  $NO_x$  y material particulado en comparación con Euro II/2, sin embargo, no se observó una mejora considerable en el rendimiento de combustible.
- Las emisiones de PM y HC se redujeron significativamente con la tecnología Euro IV.

### Camiones de dos ejes grandes - Categoría C2G

- Los camiones de dos ejes grandes (C2G) con tecnología Euro V/5 mostraron incrementos en emisiones de  $NO_x$  en altitudes elevadas, indicando posibles ineficiencias en el sistema SCR. A pesar de esto, el rendimiento de combustible fue ligeramente mejor que en tecnologías anteriores.
- El análisis de la temperatura de los gases de escape indicó que a temperaturas más bajas, el sistema SCR no es tan efectivo, resultando en mayores emisiones de  $NO_x$  durante fases de conducción congestionada y mixta.

### Buses urbanos - Categoría AB

- En los buses urbanos (AB), las tecnologías Euro IV/4 mostraron reducciones significativas en  $NO_x$  y material particulado en comparación con Euro II, pero no mejoraron el rendimiento de combustible.

- Las emisiones de  $NO_x$  se redujeron en un 60 % en promedio con la tecnología Euro IV/4 en comparación con Euro II/22.

### **Vehículos livianos**

- Los vehículos livianos con inyección directa (GDI) mostraron mejoras en el rendimiento de combustible y reducción en emisiones de CO y HC en comparación con la inyección multipunto (MPI). Sin embargo, las emisiones de NO<sub>2</sub> y material particulado fueron mayores en GDI.
- Los vehículos con inyección multipunto cumplieron con las normativas de emisión de HC y NO<sub>x</sub>, pero presentaron emisiones de CO ligeramente superiores a los límites establecidos.

### **Motocicletas**

- Las motocicletas con inyección electrónica no solo cumplieron con las normativas de emisión colombianas (Euro III/3), sino que también mostraron un rendimiento de combustible superior y menores emisiones en comparación con las motocicletas con carburador.
- Las motocicletas equipadas con carburador superaron los límites de emisión de CO y HC, destacando la necesidad de adoptar tecnologías de inyección electrónica para cumplir con las normativas ambientales y mejorar la eficiencia del combustible.

## REFERENCIAS

- [1] L. Benbrahim-Tallaa, R. A. Baan, Y. Grosse, B. Lauby-Secretan, F. El Ghissassi, V. Bouvard, N. Guha, D. Loomis, and K. Straif, “Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes,” *The lancet oncology*, vol. 13, no. 7, pp. 663–664, 2012.
- [2] D. N. de Planeación (DNP), “Política para el mejoramiento de la calidad del aire,” Bogotá, Tech. Rep., 2018.
- [3] IQAir, “World Air Quality Report,” Tech. Rep., 2023.
- [4] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, “Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de vehículos pesados en el Valle de Aburrá (FEVA-II),” 2019.
- [5] U. de Planeación Minero Energética UPME, “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia,” 2020.
- [6] —, “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia,” 2023.
- [7] Ideam and PMC, “Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia,” Bogotá: IDEAM, 2015.
- [8] A. Arrieta, F. Janna, D. López *et al.*, “Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos-FECOC,” Medellín, Colombia, 2016.
- [9] H. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,” 2006.

- 
- [10] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, and FMAM, “Segundo Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC),” *Bogotá DC, Colombia*, 2018.
- [11] —, “Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC),” *Bogotá*. Available online at: [http://www.ideam.gov.co/documents/24277/77448440/PNUD-IDEAM\\_2RBA.pdf/ff1af137-2149-4516-9923-6423ee4d4b54](http://www.ideam.gov.co/documents/24277/77448440/PNUD-IDEAM_2RBA.pdf/ff1af137-2149-4516-9923-6423ee4d4b54). Accessed, vol. 10, 2021.
- [12] N. Unidas, “La Agenda 30 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe,” 2019.
- [13] —, “Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2022,” 2022.
- [14] ACCEFYN, “Factores de emisión de los combustibles colombianos,” *Bogotá, Colombia*, 2003.
- [15] U. de Planeación Minero Energética UPME, “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos de carga (camiones y tractocamiones) a la altura del área metropolitana de Bucaramanga,” 2021.
- [16] —, “Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+). Fase 2.2: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud de Bogotá y Barranquilla,” 2022.
- [17] J. Gonzales, “Determinación Experimental de Factores de Emisión para Vehículos Livianos,” 2007.
- [18] M. Gaitán and P. Cárdenas, *Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.
- [19] S. D. de Ambiente, “Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes Atmosféricos,” *Bogotá, Colombia*, 2020.

- 
- [20] N. Batuak, "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático," 1998.
- [21] Understanding global warming potentials us epa. [Online]. Available: [\url{https://acortar.link/1Ne2hc}](https://acortar.link/1Ne2hc)
- [22] F. Leon, "Análisis comparativo de los mecanismos de reacción y cinética química de los compuestos orgánicos volátiles para la formación de Smog fotoquímico en la ciudad de México," 1999.
- [23] N. A. Y. Rojas, "Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel," *Revista de Ingeniería*, pp. 58 – 68, 11 2004. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932004000200007&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932004000200007&nrm=iso)
- [24] M. L. Botero, J. Londoño, A. F. Agudelo, and J. R. Agudelo, "Particle Number Emission for Periodic Technical Inspection in a Bus Rapid Transit System," *Emission Control Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 128–139, 2023.
- [25] L. G. Sanchez Vela, M. Fabella Gallegos, O. Flores Centeno, J. Hernandez Jimenez, D. Vazquez Vega, and M. Cruz Acevedo, "Revisión de la Normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera," *Publicación Técnica*, no. 562, 2019.
- [26] K. Reif, *Gasoline engine management*. Friedrichshafen, Germany: Konrad Reif, 2015.
- [27] E. Lehrmittel, *Modern Automotive Technology: Fundamentals, Services, Diagnostics*. Stuttgart, Alemania: R. Gscheidle, Studiendirektor, Winnenden, 2014, vol. 2.
- [28] C. Ortiz Ruiz, "Análisis de sistemas de reducción catalítica selectiva con inyección de urea mediante CFD," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2018.
- [29] A. B. Williams and F. J. Taylor, *FINITE IMPULSE-RESPONSE FILTERS*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2006. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071471718/chapter/chapter13>

- 
- [30] J. Restrepo, “Efectos de la sincronización de señales en la determinación del desempeño ambiental de vehículos mediante pruebas en carretera.” 2023.
- [31] Z. Qi, M. Gu, J. Cao, Z. Zhang, C. You, Y. Zhan, Z. Ma, and W. Huang, “The Effects of Varying Altitudes on the Rates of Emissions from Diesel and Gasoline Vehicles Using a Portable Emission Measurement System,” *Atmosphere*, vol. 14, no. 12, p. 1739, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/atmos14121739>
- [32] J. Huang, J. Gao, Y. Wang, C. Yang, C. Ma, and G. Tian, “Effect of asymmetric fuel injection on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of a hydrogen opposed rotary piston engine,” *Energy*, vol. 262, p. 125544, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125544>
- [33] Y. Gao, X. Zhao, Z. Liu, C. Liu, and G. Ouyang, “Experimental research on brisance of explosive in simulated high altitude environment,” *Initiators & Pyrotechnics*, vol. 5, pp. 36–39, 2013.
- [34] L. Zhou, R. Liu, Z. Liu, C. Liu, and G. Ouyang, “Experimental study on adaptability of high pressure common-rail diesel engine at different altitudes,” *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 12, pp. 2690–2096, 2016.
- [35] J. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, New York, 1988.
- [36] P. Benjumea, J. Agudelo, and A. Agudelo, “Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine,” *Fuel*, vol. 88, pp. 725–731, 2009.
- [37] H. Yin, Y. Ge, X. Wang, L. Yu, Z. Ji, and W. Chen, “Idle emission characteristics of a light-duty diesel van at various altitudes,” *Atmospheric Environment*, vol. 70, pp. 117–122, 2013.
- [38] H. Wang, Y. Ge, L. Hao, X. Xu, J. Tan, J. Li, L. Wu, J. Yang, D. Yang, J. Peng, J. Yang, and R. Yang, “The real driving emission characteristics of light-duty diesel

- vehicle at various altitudes,” *Atmospheric Environment*, vol. 191, pp. 141–149, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.060>
- [39] Y. Wang, Y. Ge, J. Wang, X. Wang, H. Yin, L. Hao, and J. Tan, “Impact of altitude on the real driving emission (RDE) results calculated in accordance to moving averaging window (MAW) method,” *Fuel*, vol. 277, p. 117929, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117929>
- [40] Y. Wang, X. Wang, X. Feng, H. Zhao, C. Hao, L. Hao, J. Tan, H. Yin, J. Wang, Y. Ge, and H. Zhang, “Experimental study of CO<sub>2</sub> and pollutant emission at various altitudes: Inconsistent results and reason analysis,” *Fuel*, vol. 307, p. 121793, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121793>
- [41] J. I. Huertas, O. Serrano-Guevara, J. Díaz-Ramírez, D. Prato, and L. Tabares, “Real vehicle fuel consumption in logistic corridors,” *Applied Energy*, vol. 314, p. 118892, 2022.
- [42] Embien Technologies, “Engine Control Unit or Engine Control Module Overview,” 2024, accessed: 2024-07-01. [Online]. Available: <https://www.embien.com/automotive-insights/engine-control-unit-or-engine-control-module-overview>
- [43] H. Kim *et al.*, “Analysis of NO<sub>x</sub> emissions according to after-treatment devices,” *Fuel*, vol. 310, p. 122297, 2022.
- [44] J. M. Luján, V. Bermúdez, V. Dolz, and J. Monsalve-Serrano, “An assessment of the real-world driving gaseous emissions from a Euro 6 light-duty diesel vehicle using a portable emissions measurement system (PEMS),” *Atmospheric Environment*, vol. 174, pp. 112–121, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231017308178>
- [45] J. Cha, J. Lee, and M. S. Chon, “Evaluation of real driving emissions for Euro 6 light-duty diesel vehicles equipped with LNT and SCR on domestic sales in Korea,” *Atmospheric Environment*, vol. 196, pp. 133–142, 2019.

- 
- [46] T. Lähde, B. Giechaskiel, J. Pavlovic, R. Suarez-Bertoa, V. Valverde, M. Clairotte, and G. Martini, “Solid particle number emissions of 56 light-duty Euro 5 and Euro 6 vehicles,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 159, p. 105873, 2022.
- [47] Z. Huang, Y. Zhang, J. Feng *et al.*, “Effect of ethanol-blended gasoline on emissions of motorcycles equipped with carburetor and fuel injection systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 30, pp. 104–112, 2012.
- [48] T. Wang, J. Jiang, W. Huang *et al.*, “Emissions from motorcycles in Shanghai: Evaluation of pollutant contributions and reduction strategies,” *Science of the Total Environment*, vol. 398, pp. 60–67, 2008.
- [49] J. Du *et al.*, “Impact of fuel injection technology on emissions of gasoline vehicles,” *Science of The Total Environment*, vol. 720, p. 137376, 2020.
- [50] A. Munnannur, N. Ottinger, and Z. G. Liu, “Thermal Management of Exhaust Aftertreatment for Diesel Engines,” in *Advances in Thermal Management of Automotive Systems*. Springer, 2021, pp. 19–42. [Online]. Available: [https://dx.doi.org/10.1007/978-981-16-8570-5\\_2](https://dx.doi.org/10.1007/978-981-16-8570-5_2)

ANEXOS

Anexo A. Base de datos interactiva

En la **Fig. 69** se muestra la primera sección de la aplicación, la cual presenta detalladamente la información de los vehículos medidos mediante gráficos de tipo "sunburst". Estos gráficos permiten visualizar de manera clara y estructurada la información específica de cada categoría, permitiendo acceder a ella a través de niveles los cuales se seleccionan al hacer click en cada porción del pastel.

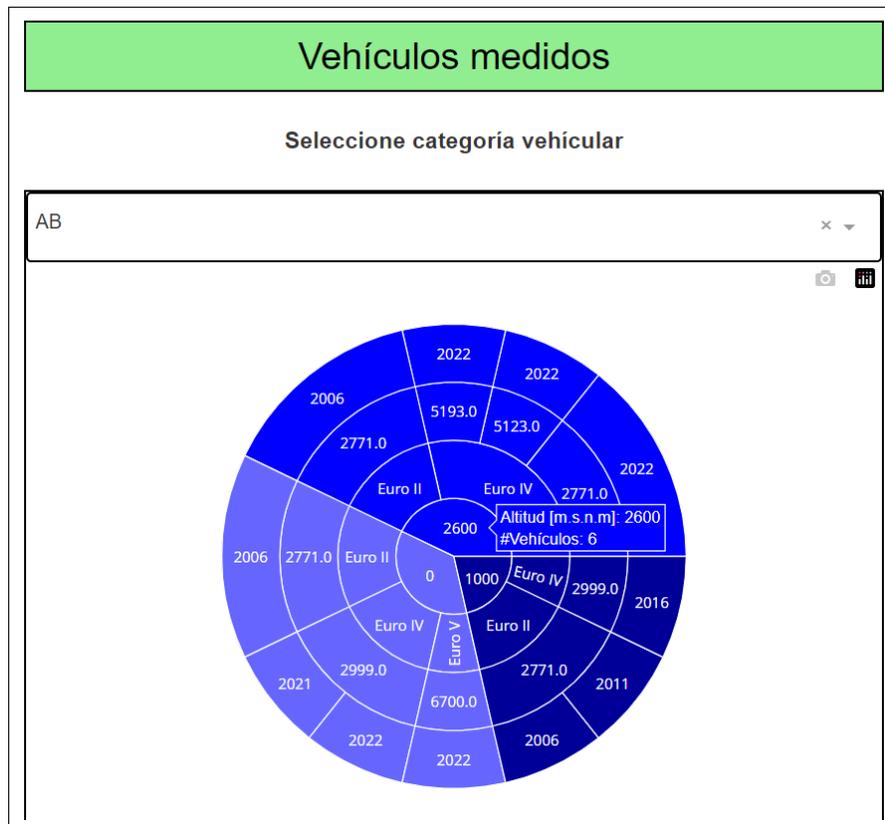


Fig. 69. Sección de información de vehículos medidos.

El usuario puede explorar detalles como la altitud, cilindrada, kilometraje, modelo, norma de emisión, tipo de alimentación, tipo de inyección y carga de prueba de cada vehículo, cada uno de estos corresponde a un nivel en el gráfico. Seleccionando la categoría deseada

entre C2P, C2G, TC, AB, vehículos livianos y motocicletas, las cuales fueron las medidas. Además, al pasar el cursor por cada segmento del diagrama aparecen el número de vehículos que se encuentran en ese segmento, lo que le permite al usuario dimensionar los datos.

En la **Fig. 70** se muestra la sección de la aplicación que presenta los factores de emisión. En esta sección, los usuarios pueden seleccionar el parámetro de interés entre los que se enumeran en la **Tabla 34**. Las distintas categorías medidas se representan en conjunto, con el objetivo de visualizar cómo se distribuyen las emisiones contaminantes mediante escalas de colores al comparar todas las categorías.

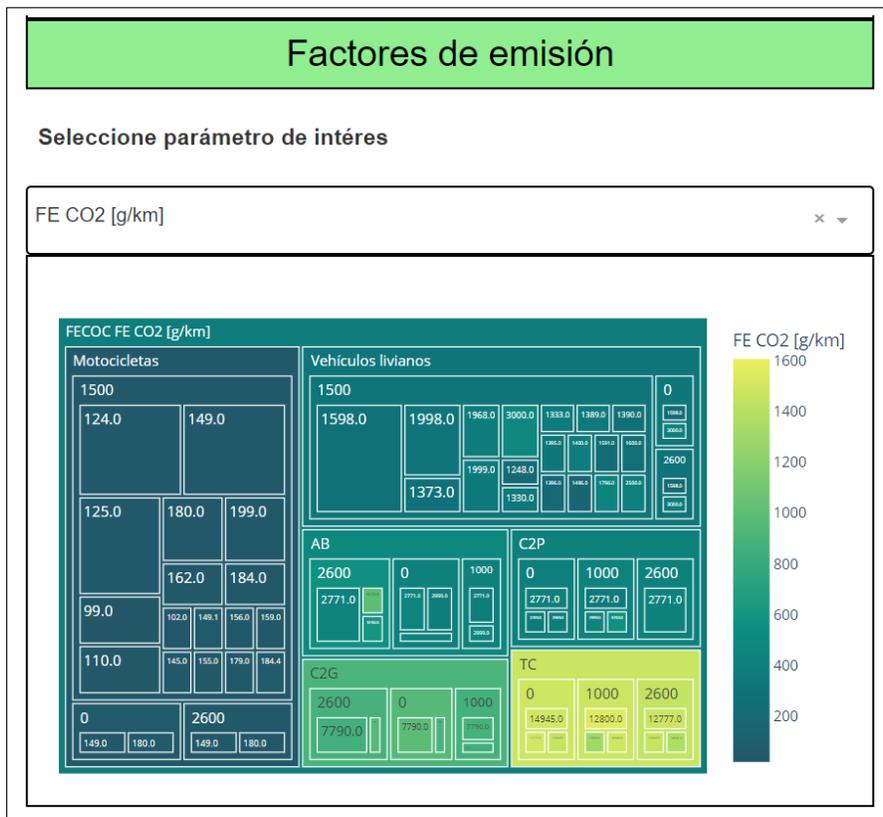


Fig. 70. Sección de FE de vehículos medidos.

Este tipo de gráfico interactivo permite acceder a niveles inferiores de información, organizados de la siguiente manera: en el primer nivel, la categoría; en el segundo nivel, la

TABLA 34  
PARÁMETROS.

Parámetros	
Rend. Comb [km/gal]	Consumo[L/100km]
CO <sub>2</sub> [g/km]	CO <sub>2</sub> [g/km-Ton]
NO[g/km]	NO <sub>2</sub> [g/km]
PN[# × 10 <sup>12</sup> /km]	PM[mg/km]
HC[g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]
CO[g/km]	Consumo[L/100km-Ton]

altitud; en el tercer nivel, la cilindrada; y, finalmente, el parámetro seleccionado. A modo de ejemplo, en **Fig. 71** se observa el nivel inferior para la categoría tractocamiones (TC).

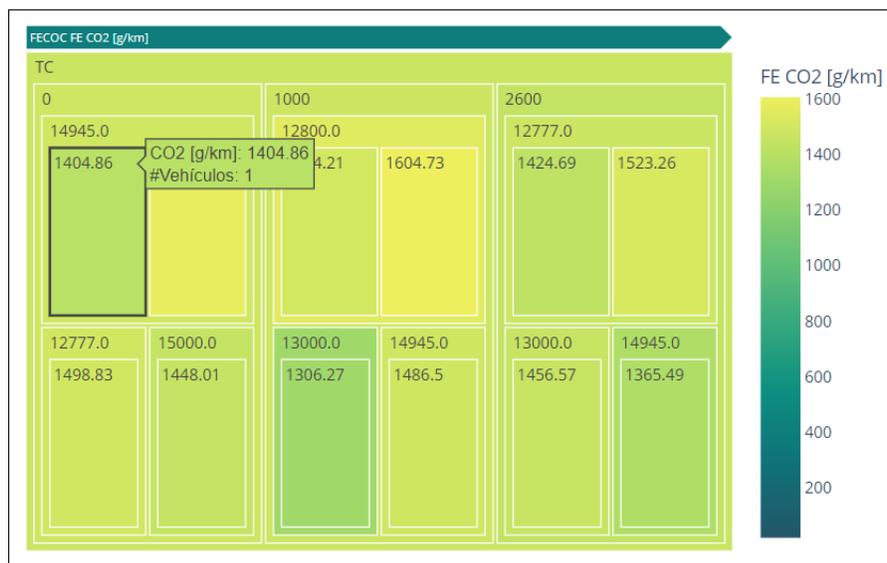


Fig. 71. Nivel inferior para la categoría TC.

En la siguiente sección se muestra el mismo tipo de gráfico, pero solo para una sola categoría seleccionada. Esto con el fin de observar de mejor manera la distribución de la escala de colores para esa selección, permitiendo identificar de manera más puntual la influencia de la cilindrada en el parámetro seleccionado en la sección anterior. En la **Fig. 72** se da un

ejemplo de lo mencionado anteriormente. Se observa que en comparación con la Fig. 71 la escala de colores se ajusta de mejor manera para ese conjunto de datos.

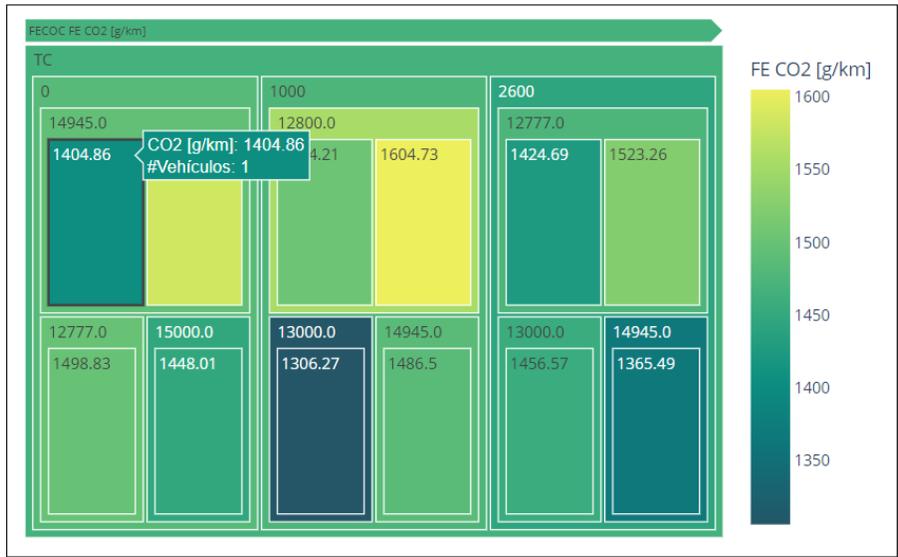


Fig. 72. Nivel inferior solo para la categoría TC.

Por último, en la Fig. 73 se muestra la sección de comparativo. Al igual que en las secciones anteriores, el usuario puede seleccionar la variable y la categoría de su interés. La parte izquierda presenta la comparación por altitud, mientras que la parte derecha muestra la comparación por tecnología.

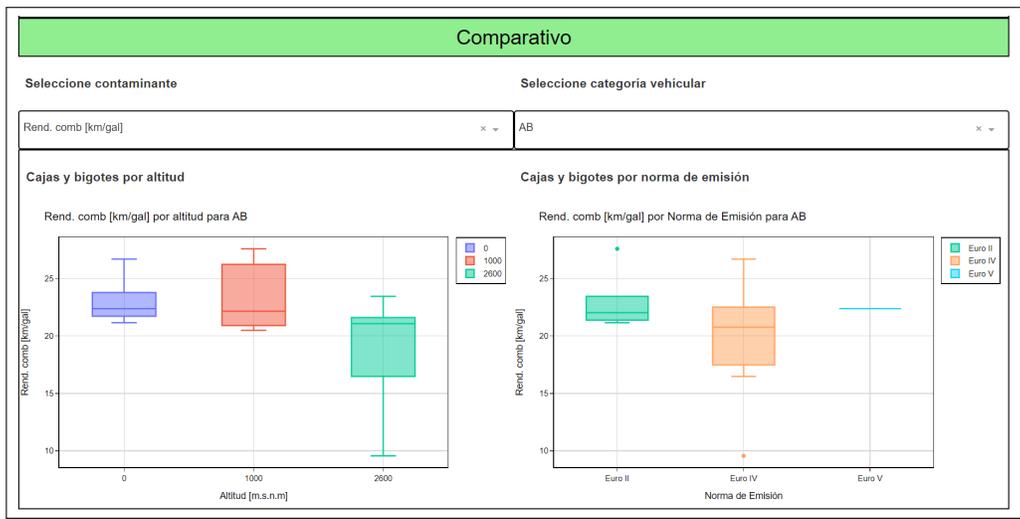


Fig. 73. Comparativo aplicación.

*Anexo B. Análisis estadístico.*

Se analizaron los  $FE$  y rendimiento de combustible por categorías y grupos. En cada caso se tomaron valores de todas las pruebas válidas de cada vehículo y se agruparon los datos según dos factores principales: Altitud y tecnología. Para el caso de la altitud, fue necesario dividir algunas categorías en subgrupos por cilindrada, tratando de que cada grupo abarcara tecnologías de control de emisión similares, con el fin de aislar el efecto de este factor. Para el caso del factor tecnología, para algunas categorías se separó el análisis por altitud, con el fin de obtener resultados dependientes solo del factor tecnología.

Para realizar la comparación de medias de varios grupos se hizo un análisis de varianza (ANOVA). Para realizar el ANOVA se debe cumplir que los residuales tengan una distribución aproximadamente normal. Lo que se verificó con un diagrama QQ, el cual permite comprobar de manera visual este supuesto, como se observa en la **Fig. 74**. Además, también se verificó la normalidad mediante una prueba formal, en este caso la prueba de Shapiro-Wilk, que es de alto poder estadístico cuando no se tienen grandes cantidades de datos. En caso de que no se cumpla normalidad, se debe usar una prueba no paramétrica, en este caso la prueba de Kruskal-Wallis.

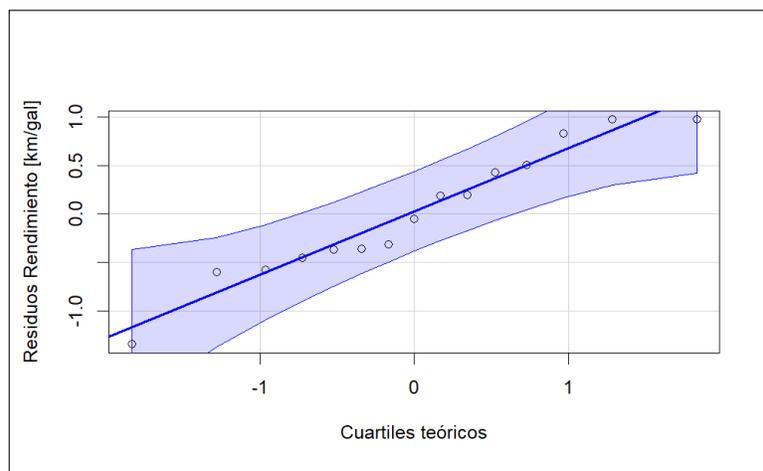


Fig. 74. Verificación gráfica normalidad.

Por otro lado, se verificó el cumplimiento de la hipótesis de varianza igual en los diferentes grupos, conocida como homocedasticidad. En la **Fig. 75** se observa que los residuales tienen una distribución aproximadamente horizontal centrada en cero, por lo que se puede considerar que se cumple la hipótesis de homocedasticidad.

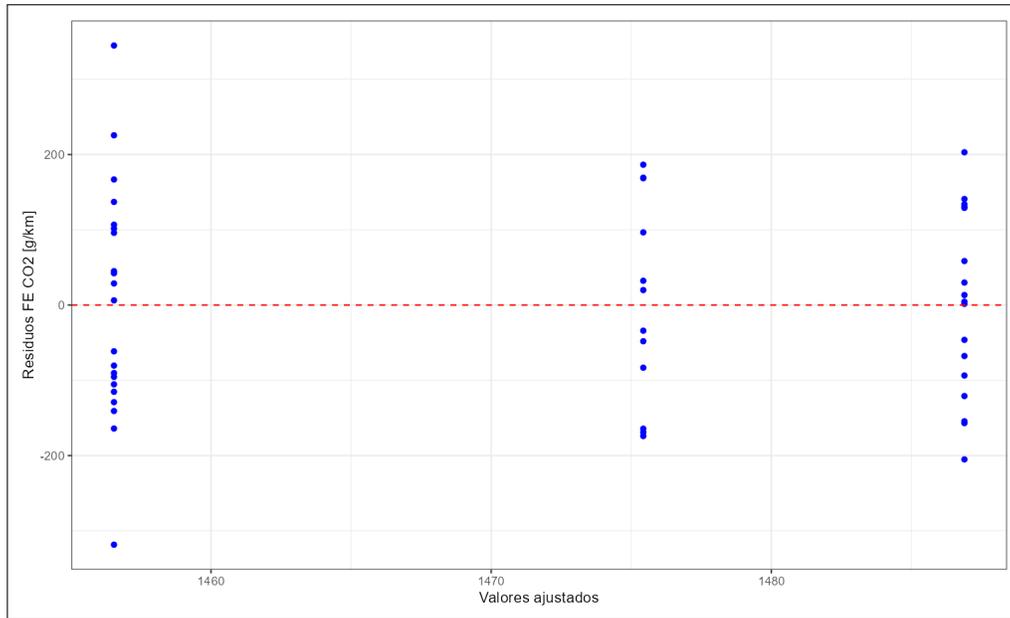


Fig. 75. Verificación gráfica homocedasticidad.

En el caso de que una variable se ajuste a una distribución normal, ésta se puede caracterizar mediante su valor promedio. En caso contrario, se debe caracterizar usando la mediana, la cual coincide con la media si se cumple normalidad.

El siguiente paso consistió en realizar un análisis post-hoc, mediante otra prueba no paramétrica (prueba de Dunn), para determinar la diferencia significativa entre pares. En este caso, cuando la diferencia es significativa, el valor p resultante es menor a 0,05, y mayor a este valor en caso contrario. A modo de ejemplo, en la **Fig. 76** se observan las comparaciones entre pares solo si existe diferencia estadística significativa. Como se observa en la gráfica, aparece una descripción al lado derecho, la que indica que tipo de prueba se usó para las comparaciones entre pares. En caso de cumplirse normalidad se aplicó la prueba t-student, y

la prueba de Dunn para el caso contrario. En estas figuras se muestran únicamente aquellos valores p que corresponden a una diferencia significativa. Cuando no se muestra un valor p entre dos altitudes, significa que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre éstas.

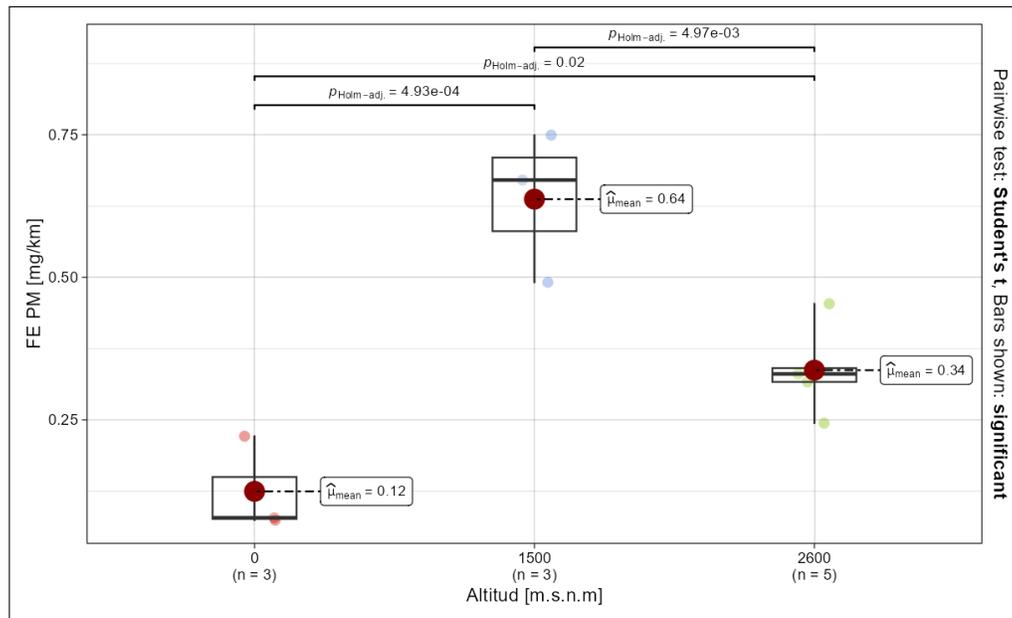


Fig. 76. Emisiones de PM vehículos livianos 1600 cc.