



**EFECTO DE LOS EVENTOS DINÁMICOS DE CONDUCCIÓN EN EL
CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES CONTAMINANTES DE
VEHÍCULOS EN COLOMBIA**

Alejandro Mesa Mesa

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Andrés Felipe Agudelo Santamaría
Departamento de ingeniería mecánica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Mesa, 2024 [1]
Referencia	[1] Mesa, A. “EFECTO DE LOS EVENTOS DINÁMICOS DE CONDUCCIÓN EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES CONTAMINANTES DE VEHÍCULOS EN COLOMBIA”, Trabajo de grado profesional, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

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

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud con todas las personas que hicieron parte de este proceso, que en medio del camino se convirtieron en mis amigos y me motivaron en todo momento a salir adelante.

A mis amigos, Pilar, Mariana y Juan, que llegaron a mi vida en el mejor momento y siempre me apoyaron incondicionalmente.

A los profesores John Ramiro Agudelo y Andrés Felipe Agudelo, quienes me dieron la oportunidad de trabajar con ellos, permitiéndome crecer como persona y profesional.

A mis amigos Edgard y Edwin, los mejores compañeros de trabajo que pude tener.

A cada persona que hizo parte de mi vida en estos últimos años, por todas las experiencias vividas que hicieron que pueda recordar esta etapa universitaria con cariño.

Y por supuesto, a la Universidad de Antioquia, que hizo que todo esto fuera posible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT.	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. OBJETIVOS	16
A. Objetivo general	16
B. Objetivos específicos.	16
III. ANTECEDENTES	17
IV. MARCO TEÓRICO.	21
A. Emisiones contaminantes en transporte terrestre	21
1) Bióxido de carbono (CO_2):	21
2) Monóxido de carbono (CO):	22
3) Óxidos de nitrógeno (NO_x):.	23
4) Óxidos de azufre (SO_x):	23
5) Hidrocarburos sin quemar (HC) y compuestos orgánicos volátiles (VOC):	23
6) Material particulado (PM):.	24
B. Factores de emisión y FECOC+.	25
C. Sincronización	28
D. Eventos de conducción	31
V. METODOLOGÍA	33
A. Sincronización	33
B. Base de datos.	38
C. Eventos de conducción	41

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
A. Sincronización	45
B. Base de datos.	46
C. Eventos de conducción	47
VII. CONCLUSIONES	60
VIII. RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS	63
ANEXOS	66
Anexo A. Resultados de flujos máxicos.	66
Anexo B. Resultados de índice de agresividad.	68

LISTA DE TABLAS

II	Factores de emisión en eventos de aceleración clasificados por índice en FE-COC+ fase 3.	44
III	Resumen de pruebas realizadas.	46
IV	Fronteras entre rangos de agresividad para cada categoría vehicular	52
V	Flujos máxicos en ralentí	66
VI	Flujos máxicos en aceleración	66
VII	Flujos máxicos en desaceleración	67
VIII	Resultados para tractocamiones por rangos de agresividad.	68
IX	Resultados para camiones pequeños por rangos de agresividad.	68
X	Resultados para camiones grandes por rangos de agresividad.	69
XI	Resultados para autobuses por rangos de agresividad.	69
XII	Resultados para vehículos livianos por rangos de agresividad.	69
XIII	Resultados para motocicletas por rangos de agresividad.	69
XIV	Resultados para motocicletas con ciclo AMVA por rangos de agresividad. . .	69

LISTA DE FIGURAS

1	Ciclos de conducción para cada categoría vehicular.	20
2	Comparación de tamaños del material particulado.	25
3	Variables medidas en una prueba sin sincronizar.	29
4	Verificación de las mediciones de velocidad y seguimiento del ciclo de conducción para un vehículo.	34
5	Metodología para la sincronización.	35
6	Algoritmo de sincronización estática.	36
7	Algoritmo de sincronización dinámica.	38
8	Algoritmo para procesamiento de datos en FECOC+ fase 3.	39
9	Estructura de organización de datos.	41
10	Ciclo de conducción separado por eventos de ralentí, aceleración y desaceleración.	42
11	Metodología para clasificación de emisiones por eventos y rangos de agresividad.	44
12	Comparación visual de los diferentes métodos de sincronización.	45
13	Correlaciones obtenidas para los diferentes métodos de sincronización.	45
14	Factores de emisión obtenidos para todos los vehículos medidos.	47
15	Diagramas de cuartiles para consumo de combustible y Flujo de CO_2 instantáneos.	48
16	Comparación entre eventos de conducción para algunas variables.	49
17	Tendencias encontradas en factores de emisión y rendimiento de combustible con el índice de agresividad.	51
18	Curva del codo para selección del número de <i>clusters</i>	51
19	Separación por clústers por rangos del índice de agresividad.	52
20	CO real y normalizado para tractocamiones.	53
21	CO Original y normalizado para motocicletas.	53
22	HC en camiones pequeños y autobuses.	54

23	<i>PM</i> Original y normalizado en tractocamiones.	55
24	<i>PM</i> real y normalizado en camiones grandes.	56
25	<i>PN</i> en las 2 categorías de motocicletas.	56
26	Rendimiento de vehículos pesados en desaceleración.	57
27	Efecto de la agresividad en desaceleración en el rendimiento en motocicletas.	58
28	<i>PM</i> en desaceleración en camiones grandes y autobuses.	58
29	Cantidad de eventos de aceleración en tractocamiones	59
30	Resultados para tractocamiones en aceleración.	70
31	Resultados para camiones pequeños en aceleración.	71
32	Resultados para camiones grandes en aceleración.	72
33	Resultados para autobuses en aceleración.	73
34	Resultados para vehículos livianos en aceleración.	74
35	Resultados para motocicletas en aceleración.	75
36	Resultados para motocicletas con ciclo AMVA. en aceleración	76
37	Resultados para tractocamiones en desaceleración	77
38	Resultados para camiones pequeños en desaceleración	78
39	Resultados para camiones grandes en desaceleración	79
40	Resultados para autobuses en desaceleración	80
41	Resultados para vehículos livianos en desaceleración	81
42	Resultados para motocicletas en desaceleración	82
43	Resultados para motocicletas con ciclo AMVA en desaceleración	83

Siglas, acrónimos y abreviaturas

DNP	Departamento Nacional de Planeación
<i>NO_x</i>	Óxidos de nitrógeno
<i>NO</i>	Monóxido de nitrógeno
<i>NO₂</i>	Bióxido de nitrógeno
<i>PM</i>	Material particulado
<i>PM10</i>	Material particulado de tamaño menor o igual a 10 micras
<i>PM2,5</i>	Material particulado de tamaño menor o igual a 2.5 micras
<i>PN</i>	Número de partículas
<i>CO₂</i>	Bióxido de carbono
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>HC</i>	Hidrocarburos
<i>COV</i>	Compuestos orgánicos volátiles
<i>SO_x</i>	Óxidos de azufre
<i>SO₂</i>	Bióxido de azufre
<i>SO₃</i>	Trióxido de azufre
GEI	Gases de efecto invernadero
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COP	Conferencia de las Partes
BUR	Informes Bienales de Actualización
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
UdeA	Universidad de Antioquia
FE	Factor de emisión
FECOC+	Factores de Emisión de Combustibles Colombianos

RUNT	Registro único nacional de tránsito
RNDC	Registro nacional de despachos de carga
PEMS	Sistema portátil de medición de emisiones
SCR	Reducción catalítica selectiva
GPS	Sistema de posicionamiento global
MAF	<i>Mass air flow</i>
msnm	Metros sobre el nivel del mar
ppm	Partes por millón
g	Gramos
s	Segundos
km	Kilómetros
ton	Tonelada
J	<i>Joules</i>
AMVA	Área metropolitana del Valle de Aburrá
ANOVA	Análisis estadístico de varianza

RESUMEN

Este trabajo toma como base los datos resultantes de los proyectos FECOC+, llevados a cabo por el grupo GIMEL de la universidad de Antioquia, donde se midieron los factores de emisión y el rendimiento de las categorías vehiculares más representativas de Colombia. Estas mediciones se realizaron a partir de la reproducción de ciclos de conducción con diferentes eventos de conducción y diferentes agresividades. En este trabajo se realiza una preparación mediante procesos de sincronización y unificación de los datos instantáneos obtenidos en los proyectos, para finalmente estudiar el efecto de los eventos de conducción y su agresividad en el rendimiento de combustible y las emisiones contaminantes. Se propone un índice de agresividad que cuantifica esta última en términos de variables dinámicas de operación presentes en los eventos de conducción, y se establece la relación de esta variable con las emisiones contaminantes y el rendimiento para cada categoría vehicular, entre las que se encuentran: tractocamiones, camiones de 2 ejes, autobuses, vehículos livianos y motocicletas.

Palabras clave — Emisiones contaminantes, rendimiento de combustible, eventos de conducción, sincronización, agresividad

ABSTRACT

This work is based on the data resulting from the FECOC+ projects carried out by the GIMEL group at the University of Antioquia, where the emission factors and fuel efficiency of the most representative vehicle categories in Colombia were measured. These measurements were taken by reproducing driving cycles with different driving events and varying levels of aggressiveness. In this study, synchronization and unification processes are applied to the instantaneous data obtained from these projects to ultimately examine the effect of driving events and their aggressiveness on fuel efficiency and pollutant emissions. An aggressiveness index is proposed, in terms of dynamic operational variables present in the driving events. The relationship between this variable, pollutant emissions, and fuel efficiency is established for each vehicle category, including: tractor-trailers, 2-axle trucks, buses, light duty vehicles, and motorcycles.

Keywords — Pollutant emissions, fuel efficiency, driving events, synchronization, aggressiveness

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire y la contaminación atmosférica son temas de creciente preocupación en todo el mundo, dado su impacto directo en la salud humana, el medio ambiente y la economía. En la actualidad, nos enfrentamos a desafíos significativos derivados de la emisión de contaminantes atmosféricos, tanto a nivel local como global. Desde las emisiones industriales hasta las provenientes del transporte y la generación de energía, diversas actividades humanas contribuyen a la degradación de la calidad del aire, afectando la calidad de vida de las personas y exacerbando problemas como el cambio climático. A nivel nacional, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) estimó que, durante el año 2015, los efectos de estos fenómenos estuvieron asociados a 10.527 muertes [1].

El papel de los vehículos en la calidad del aire es fundamental, debido a su contribución a la emisión de contaminantes atmosféricos. Los vehículos motorizados, ya sean automóviles, camiones o motocicletas, emiten una variedad de contaminantes nocivos, como óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), entre otros. Estas emisiones provienen de la quema de combustibles fósiles en los motores de combustión interna y tienen un impacto directo en la calidad del aire, contribuyendo a la formación de smog, la lluvia ácida y la contaminación del aire interior y exterior. Dada la proliferación de vehículos en las zonas urbanas y su constante uso en la movilidad cotidiana, la gestión efectiva de las emisiones vehiculares se ha convertido en una prioridad para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública en todo el mundo.

A pesar de la creciente adopción de vehículos eléctricos y el impulso hacia la movilidad sostenible, estas estrategias aún tienen limitaciones tecnológicas y sociales para su implementación completa en la vida diaria, remplazando los vehículos convencionales. Debido a esto, es necesario continuar estudiando los vehículos con motores de combustión interna, con el objetivo de lograr una movilidad sostenible, reduciendo las emisiones contaminantes y buscando una mayor eficiencia en el consumo de combustible.

En este contexto, Colombia como suscriptor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), se ha comprometido a remitir a la Conferen-

cia de las Partes (COP) los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas de todos los gases de efecto invernadero (GEI) no controlados por el protocolo de Montreal, mediante los informes Bienales de Actualización (BUR por sus siglas en inglés), empleando para su desarrollo la metodología planteada por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para mediciones de emisiones contaminantes en fuentes móviles [2].

Con el fin de cumplir con los compromisos antes mencionados, el gobierno de Colombia, por medio de la Unidad de Planeación Minero Energética del ministerio de minas y energía (UPME) y la Universidad de Antioquia (UdeA), ha llevado a cabo una serie de proyectos conocidos como "Factores de Emisión de Combustibles Colombianos" (FECOC+), donde se realizaron mediciones dinámicas de las emisiones contaminantes y del flujo de combustible a las categorías más representativas de vehículos terrestres presentes en Colombia, mientras se reproducían los respectivos ciclos de conducción, diseñados de acuerdo con un estudio previo de la movilidad característica para cada uno en Colombia. A partir de los datos recolectados, se obtuvieron los factores de emisión (FE) y el rendimiento de combustible para cada vehículo, con el fin de realizar estudios dentro del propio país y comparativas con otros estudios similares y con las regulaciones internacionales.

Por lo anterior, surge la necesidad de llevar a cabo un análisis detallado de las emisiones contaminantes y las variables que contribuyen a que estas aumenten, entre los cuales se encuentra un factor determinante, que consiste en la forma en la que conducen las personas en el país.

El patrón de conducción de un vehículo, definido por los arranques, paradas y grados de aceleración y desaceleración, puede considerarse entre sosegado o agresivo. La conducción sosegada se caracteriza por aceleraciones y deceleraciones progresivas, en las cuales el conductor aprovecha la inercia del vehículo, y evita frenar más de lo necesario, manteniéndose en movimiento la mayor parte del tiempo, disminuyendo los arranques y paradas del vehículo. En la conducción agresiva, las aceleraciones y deceleraciones son más súbitas o rápidas, requiriendo el uso constante de los frenos, y llevando a que haya muchas paradas y arranques innecesarios. Entender y promover prácticas de conducción eficientes es fundamental para mitigar el impacto ambiental de los vehículos en nuestras comunidades y contribuir a

la sostenibilidad del transporte.

Debido a que se cuenta con los datos resultantes de los proyectos FECOC+, en los que se midieron datos instantáneos de movilidad, consumo de combustible y emisiones contaminantes, existe el potencial de explorar la relación entre las emisiones contaminantes y los eventos de conducción, es decir, cómo se comportan estas durante eventos de aceleración, ralentí, velocidad constante o desaceleración. Si bien en un ciclo de conducción todos estos eventos son necesarios, se puede buscar la forma de modificarlos, de manera que se aumente la eficiencia del combustible, mientras se reducen las emisiones contaminantes. Lo anterior resume el objetivo principal de este trabajo, que busca ser una herramienta para contribuir a la mejora de la calidad del aire y reducción de la contaminación en Colombia, sin necesidad de intervenciones tecnológicas significativas, enfocándose en la forma de conducir.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Explorar las relaciones de las emisiones contaminantes y el consumo de combustible con los eventos de conducción dinámicos característicos de las diferentes categorías vehiculares en Colombia mediante un procesamiento adecuado de los datos obtenidos en los proyectos FECOC+, que incluye la organización detallada de la información por niveles jerárquicos y el tratamiento de las señales obtenidas para cada variable medida en cada vehículo.

B. Objetivos específicos

1. Realizar una sincronización adecuada de las señales de las diferentes variables obtenidas en las mediciones.
2. Consolidar la base de datos de los datos de conducción, flujos máxicos y emisiones contaminantes instantáneas de los vehículos medidos durante los proyectos FECOC+.
3. Determinar el efecto de algunas variables dinámicas y de los eventos de conducción sobre el consumo de combustible y las emisiones contaminantes para las diferentes categorías de vehículos.

III. ANTECEDENTES

Este proyecto se basa en los datos recogidos durante los proyectos FECOC+, UPME y la UdeA, ejecutados por el grupo GIMEL de la Universidad de Antioquia, entre 2020 y 2023. Los proyectos se dividieron en 3 fases:

- ✓ **Fase 1:** Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia (Convenio CV-001-2020) [3].

En esta fase se realizó una caracterización del parque automotor colombiano, según su representatividad y actividad, tomando como base datos del registro único nacional de tránsito (RUNT) y registro nacional de despachos de carga (RNDC). Mediante un análisis estadístico, se detectaron cuáles eran los vehículos más representativos por cilindraje del motor, año del modelo y capacidad de carga.

En segundo lugar, se realizó una caracterización de la movilidad de las diferentes categorías vehiculares en las principales áreas metropolitanas del país, así como del transporte de carga por carretera. Se llevó a cabo un análisis de bases de datos de movilidad, encuestas origen-destino y consultas a expertos, lo que permitió determinar las vías claves, así como las horas del día representativas que permitió realizar la campaña de medición de movilidad de motocicletas, vehículos livianos y buses. Finalmente, se desarrolló un ciclo de conducción representativo para el país para cada categoría vehicular: motocicletas, vehículos livianos, buses, camiones y tractocamiones. Se utilizó la técnica estocástica de micro viajes utilizando 23 parámetros característicos de la cinemática de los vehículos en cada categoría.

En todos los casos se seleccionaron tres grupos representativos (*clusters*) de patrones de tráfico fluido, congestionado y mixto, como la división de los datos que mostraba una agrupación ideal de las variables. Se generaron 1000 ciclos de conducción aleatorios por cada categoría vehicular que contuvieran los tres patrones de tráfico y que cumplieran con el criterio de duración máxima del ciclo fijada por la experiencia del grupo ejecutor entre 25 y 35 minutos. Se escogieron los 15 mejores ciclos basados en la forma de conducción representativa de cada categoría para cada tipo de tráfico. Estos ciclos fueron sometidos a validación del que mejor representa la categoría vehicular para el país. En la figura 1 se

muestran los ciclos obtenidos para cada categoría en esta fase.

✓ **Fase 2:** Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses). Esta fase estuvo dividida en 2 convenios diferentes:

- **Fase 2.1:** Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) a la altitud del área metropolitana de Bucaramanga (Convenio CV 003-2021) [4].

En esta fase se midieron los factores de emisión de 12 vehículos pesados de transporte de carga y 4 de pasajeros en el área metropolitana de Bucaramanga (1000 msnm). Entre los gases contaminantes medidos se encontraban CO_2 , CO , NO_x , NO_2 , HC y CH_4 ; también se midió material particulado, tanto en masa como en número (PM y PN). Los factores de emisión gaseosos fueron medidos con el equipo HORIBA OBS ONE, que además tiene la capacidad de medir flujo de gases de escape; el material particulado fue medido con un equipo Dekati ELPI, que mide partículas desde 6 nm hasta 10 μm . El consumo de combustible se midió con un sensor de flujo de la marca Ono Sokki; la velocidad de los vehículos de prueba se midió con un GPS integrado al módulo OBS ONE para los vehículos medidos en ruta (camiones de 2 ejes grandes y tractocamiones), y con ayuda del banco de rodillos para los medidos en este (camiones de 2 ejes pequeños y autobuses).

De la metodología y las condiciones experimentales, se pudo concluir que entre mejor sea la tecnología de control de emisiones de los camiones, más bajas son sus emisiones contaminantes, con especial mención al sistema de reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones de NO_x . También se observó que a pesar de que las emisiones gaseosas en términos generales aumentaron con el tamaño del motor, debido a su mayor consumo de combustible por cada kilómetro, este resultado se invirtió cuando se dividió por el peso total del camión incluyendo la carga (en toneladas), lo que sugiere que, mientras no sea necesario, para transporte de carga y pasajeros no es conveniente la atomización de la flota en vehículos de tamaño pequeño.

- **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

(Convenio CV-001-2022) [5].

Se realizaron mediciones a un total de 44 vehículos pesados incluyendo autobuses, camiones pequeños de 2 ejes, camiones grandes de 2 ejes y tractocamiones a las alturas de Bogotá (2600 msnm) y Barranquilla (nivel del mar). Durante esta fase se obtuvieron los FE de gases (CO_2 , CO , HC , NO_2 y NO) y de material particulado tanto en masa como en número (PM y PN). Las mediciones de los contaminantes fueron realizadas con un PEMS (*Portable emissions measurement system*) ParSYNC plus en primera instancia, que luego se reemplazó por un ParSYNC Flex, con la diferencia de que este último tiene la capacidad de medir HC . El PEMS utilizado mide las concentraciones de cada contaminante en los gases de escape mediante 3 módulos. Se midió la relación aire/combustible con un equipo Horiba Mexa 730 λ , diseñado específicamente para este fin. Se midió el flujo de aire en la admisión del motor con un equipo MAF (*Mass air flow*) y las velocidades de la misma forma que en la fase 2.1, con un GPS para vehículos medidos en ruta y con ayuda del banco de rodillos para los medidos en éste.

Se concluyó que la altitud sobre el nivel del mar no tuvo un efecto significativo sobre el consumo de combustible de los vehículos pesados ni de los gases de efecto invernadero (CO_2). Sin embargo, sí afectó marcadamente los demás FE medidos que incrementaron a la altura de Bogotá con respecto a la de Barranquilla.

✓ **Fase 3:** Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia (Convenio CO1.PCCNTR.5104655) [6].

Se determinaron los factores de emisión de 40 motocicletas y 30 vehículos livianos a la altitud de la ciudad de Medellín (1500 msnm) mediante la reproducción del ciclo de conducción respectivo en un banco de rodillos utilizando un PEMS ParSync Flex junto con los sensores MAF y Horiba utilizados en la fase 2.2. Adicionalmente, se realizaron mediciones a diferentes altitudes de 2 vehículos livianos y 2 motos a 3 altitudes diferentes, Apartadó (nivel del mar), Medellín (1500 msnm) y Bogotá (2600 msnm).

Se concluyó que la altura no tiene un efecto estadísticamente significativo ni una tendencia clara sobre las variables medidas, además de que hay una marcada diferencia entre las emisiones de los vehículos de diversos fabricantes y con diferentes tecnologías, cilindradas, modelos y kilometrajes. Por lo anterior, se realizaron diversos análisis del efecto de las

variables mencionadas sobre los factores de emisión, con el fin de dar retroalimentación a los fabricantes sobre el estado de los vehículos que producen y ayudar, por ejemplo, en una selección más idónea de catalizadores.

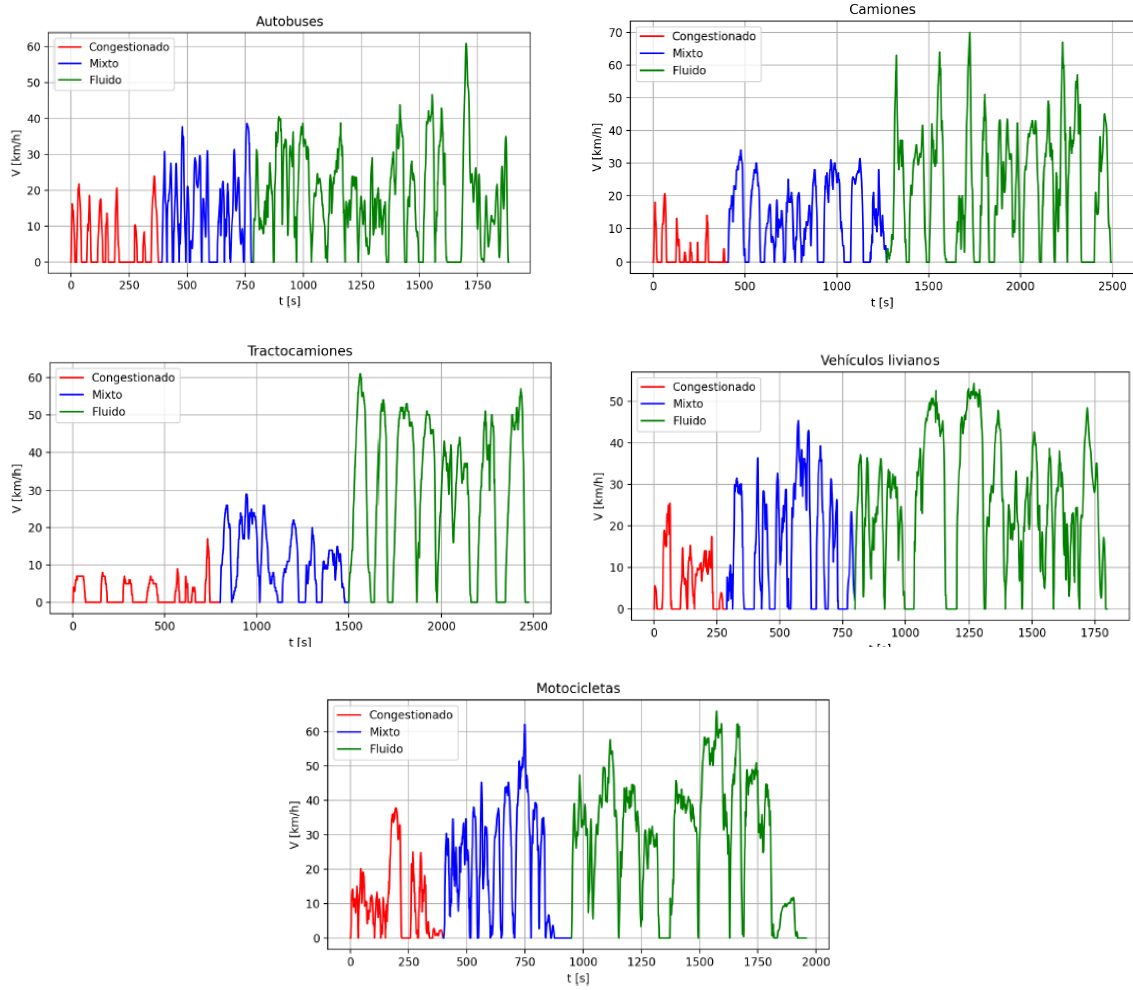


Fig. 1. Ciclos de conducción para cada categoría vehicular.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Emisiones contaminantes en transporte terrestre

Las emisiones contaminantes se refieren a la liberación de sustancias nocivas al medio ambiente, particularmente a la atmósfera, como resultado de diversas actividades humanas. En el contexto del transporte terrestre, estas emisiones incluyen gases y partículas generados por la combustión de combustibles en vehículos como automóviles, camiones, autobuses y motocicletas. El transporte terrestre es un importante contribuyente a las emisiones contaminantes, aportando grandes cantidades de bióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos sin quemar (HC), compuestos orgánicos volátiles (VOC , por sus siglas en inglés) y material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$), que afectan negativamente la calidad del aire y la salud pública. Estos contaminantes no solo contribuyen al calentamiento global y al cambio climático, sino que también están asociados con problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y otros impactos adversos en el bienestar humano y ambiental [7].

1) *Bióxido de carbono (CO_2):* Es un gas incoloro e inodoro compuesto por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno. Es uno de los principales gases de efecto invernadero y se forma naturalmente en la atmósfera a través de procesos como la respiración de los seres vivos y la descomposición de la materia orgánica. Sin embargo, las actividades humanas han incrementado significativamente sus niveles, especialmente a través de la combustión de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. En el contexto del transporte terrestre, el CO_2 se produce cuando los vehículos queman hidrocarburos para generar energía. Este proceso de combustión combina el carbono del combustible con el oxígeno del aire, resultando en la liberación de CO_2 . Por esto, se busca siempre optimizar el rendimiento del combustible en los vehículos: si se puede recorrer una distancia mayor utilizando una menor cantidad de combustible, las emisiones de CO_2 pueden disminuir en gran manera.

Los efectos del aumento de CO_2 en la atmósfera son múltiples y preocupantes. Al ser un gas de efecto invernadero, contribuye al calentamiento global al atrapar el calor en la

atmósfera, lo que lleva a un aumento de las temperaturas globales. Este cambio climático provoca alteraciones en los patrones meteorológicos, el aumento del nivel del mar debido al derretimiento de los glaciares y los casquetes polares, y fenómenos climáticos extremos como huracanes y sequías. Además, el exceso de CO_2 también puede acidificar los océanos, afectando gravemente a la vida marina y a los ecosistemas acuáticos [8].

2) *Monóxido de carbono (CO)*: Es un gas incoloro, inodoro y tóxico para el ser humano. Se produce durante la combustión cuando se dan mezclas ricas en combustible, que no tienen suficiente cantidad de aire para lograr una reacción estequiométrica. También puede formarse cuando se da una extinción de llama en la combustión. Durante el proceso de combustión, el CO se forma como molécula intermedia a partir de la reacción de la molécula de oxígeno con el carbono en los combustibles, y luego reacciona nuevamente con oxígeno para formar CO_2 . Si el CO no encuentra más oxígeno para reaccionar debido a deficiencia de este o a un mezclado pobre, hará parte de los gases de escape.

En un vehículo con motor de encendido provocado, la mayor parte del CO se produce al arrancar el motor y durante la aceleración, momentos en los cuales el motor funciona con mezclas ricas en combustible. El porcentaje de CO en los gases de escape de un motor de gasolina puede ser tan bajo como 0.1 % y tan alto como 5 %. Los motores Diesel generan cantidades muy pequeñas de CO , ya que utilizan un exceso de aire en las mezclas de combustible y aire.

El monóxido de carbono priva a los órganos del cuerpo de recibir suficiente oxígeno al unirse a los glóbulos rojos que, de otro modo, lo transportarían. A niveles bajos, el CO reduce la cantidad de oxígeno suministrado al cerebro, otros órganos y músculos, ralentiza las reacciones y reflejos del cuerpo, y afecta el juicio. Representa una seria amenaza para las personas con enfermedades cardíacas debido a la condición frágil del sistema circulatorio y para los fetos debido a las necesidades de oxígeno del cerebro en desarrollo. A niveles altos, puede ser fatal, como lo demuestran numerosas muertes causadas por automóviles que se calientan en garajes cerrados o por gases de escape que se filtran en los automóviles [9].

3) *Óxidos de nitrógeno (NO_x):* El óxido nítrico (*NO*) y el bióxido de nitrógeno (*NO₂*) son producidos a altas temperaturas de combustión, que causan la disociación de las moléculas de nitrógeno (*N₂*) en el aire, que luego reaccionan con oxígeno y moléculas de *OH* presentes en la reacción de combustión para formar principalmente *NO*. El *NO₂* se forma cuando el *NO* reacciona con el oxígeno o el agua

En el ser humano, los *NO_x* pueden causar irritación e infecciones en las vías respiratorias, agravando enfermedades como bronquitis o asma. También se ha asociado con el aumento en el riesgo de enfermedades cardiovasculares y del sistema inmunológico. En el ambiente, son responsables de la formación de ozono troposférico (a nivel del suelo) y de lluvia ácida, afectando negativamente cultivos y ecosistemas [10].

4) *Óxidos de azufre (SO_x):* Principalmente bióxido de azufre (*SO₂*) y trióxido de azufre (*SO₃*) se producen debido al contenido de azufre en los combustibles fósiles. Este contenido ha sido fuertemente regulado desde finales del siglo XX y durante todo el siglo XXI, alcanzando en Colombia un contenido de 15 ppm en Diesel y 50 ppm en gasolina para 2021 [11].

La exposición a los *SO_x* puede provocar irritación de las vías respiratorias, agravamiento de enfermedades respiratorias preexistentes como el asma y la bronquitis, y daño pulmonar a largo plazo. Además, los *SO_x* pueden contribuir a la formación de partículas finas en el aire y a la lluvia ácida cuando reaccionan con el agua y otros compuestos en la atmósfera, lo que tiene efectos adversos en la vegetación, los ecosistemas acuáticos y los materiales [12].

5) *Hidrocarburos sin quemar (HC) y compuestos orgánicos volátiles (VOC):* Los combustibles fósiles, en el caso de los vehículos terrestres, gasolina y Diesel, están compuestos de hidrocarburos, moléculas basadas en hidrógeno y carbono. Al igual que en la formación de *CO*, puede ocurrir que parte del combustible no encuentre suficiente oxígeno para reaccionar, causando que los gases de escape contengan combustible sin quemar o sustancias intermedias que se forman por la disociación de éste, y que también se basan en hidrógeno y carbono (*HC*), a veces mezcladas con otros compuestos (*VOC*).

Entre los *HC* más comunes se encuentra el metano, que tiene un impacto 28 veces

mayor que el CO_2 en el calentamiento global [8]. Por otro lado, los hidrocarburos sin quemar contribuyen a la formación de *smog*¹ y ozono troposférico. Por su parte, los *VOC* pueden llegar a ser cancerígenos y pueden traer otras afectaciones a la salud, como infecciones respiratorias [13].

6) *Material particulado (PM)*: Se trata de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. Las partículas que salen de la combustión se denominan primarias, y se dan en forma de hollín y cenizas. Las partículas que se forman en la atmósfera a partir de los *HC* y *NOx* se denominan secundarias. El material particulado también se clasifica por su tamaño, siendo *PM10* partículas con tamaño menor o igual a 10 micras (gruesas) y *PM2,5* partículas con tamaño menor o igual a 2.5 micras (finas).

Las partículas, al tener un tamaño tan reducido, pueden ser fácilmente inhaladas por el ser humano y animales, entrando en las vías respiratorias e incluso al torrente sanguíneo, causando problemas de salud potenciales, como enfermedades pulmonares, cardiovasculares y cáncer; también son responsables de la visibilidad reducida en el ambiente por la formación de neblina y aceleran el descongelamiento del hielo polar al absorber radiación [14].

El material particulado se mide normalmente en términos de concentración másica por unidad de volumen, lo que da un indicativo de cuánta masa de *PM2,5* y *PM10* se emite al ambiente. Sin embargo, al existir partículas con un tamaño tan pequeño, no aportan significativamente a esta medida de masa, pero pueden ser incluso más peligrosas para la salud, por lo que se ha implementado la medición de partículas en términos de cantidad por unidad de volumen (*PN*). En la figura 2 se ilustra el tamaño del material particulado.

¹De la combinación de palabras en inglés *smoke* y *fog*

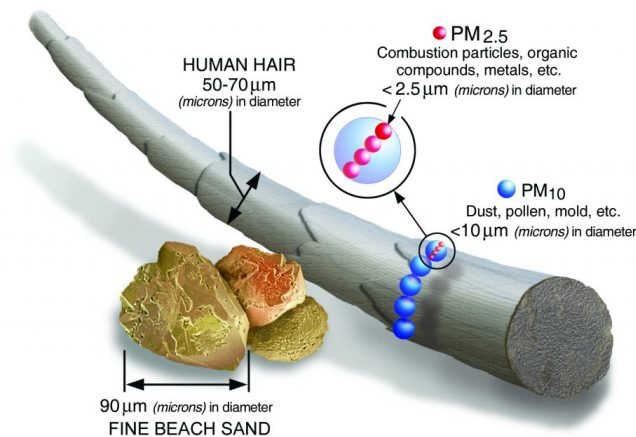


Fig. 2. Comparación de tamaños del material particulado.

Nota. Fuente: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

B. Factores de emisión y FECOC+

Dentro de los compromisos adquiridos por Colombia como suscriptor de la UNFCCC, se encuentra el de remitir a la COP, mediante los BUR, los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas de todos los GEI no controlados por el protocolo de Montreal, empleando para su desarrollo la metodología planteada por el IPCC. La construcción de dichos inventarios requiere cuantificar las emisiones generadas por el consumo de los diferentes energéticos. Este cálculo demanda que, para cada tipo de energético usado en el país, se tengan en cuenta las características de los procesos en el cual se consumen, así como las especificaciones de la tecnología empleada para su combustión.

Para este fin se utilizan los Factores de Emisión (FE) por combustible, proceso y tecnología, de tal manera que, en la medida en que se avanza en el grado de detalle de estos tres elementos, el inventario de emisiones resulta más exacto. Los FE se definen como la masa de emisión contaminante por cada unidad característica de la fuente que lo genera, es decir, distancia recorrida en el caso de los vehículos —g/km—, o energía del combustible para las fuentes fijas/industria —ton/MJ—.

Además de ser usados para los inventarios, los FE han mostrado ser una herramienta idónea para soportar técnicamente decisiones como por ejemplo: la renovación de tecnología,

el establecimiento de líneas base de consumo de combustible y emisiones tendientes a la planificación de escenarios de reducción, la delimitación de zonas geográficas de aire protegido en grandes centros urbanos, la implementación de restricciones de circulación/funcionamiento por motivos ambientales, los programas de eco-etiquetado y las bases de programas de financiación estatal y privada en materia de cambio climático y calidad del aire, entre otras. También, los FE son una herramienta potente para el sector empresarial, puesto que les permite valorar sus programas de autorregulación de emisiones, así como validar las mejores tecnologías disponibles para sus actividades.

Para la construcción de estos inventarios, el IPCC recomienda emplear información local, es decir, usar información característica de los combustibles de cada país, así como de los procesos y equipos empleados, pues estas características pueden variar considerablemente de un país a otro. Esta tarea se llevó a cabo durante los proyectos FECOC+, donde se realizó la caracterización del parque automotor colombiano, así como la forma de conducción característica de los ciudadanos, con el objetivo de obtener ciclos de conducción representativos que se pudieran reproducir en pruebas controladas para obtener factores de emisión reales de todos los distintos tipos de vehículos presentes en el país.

Dentro de las mediciones realizadas en el proyecto FECOC+, se lograron obtener datos en tiempo real para la velocidad instantánea de cada vehículo (V), así como el flujo de aire en la admisión del motor (\dot{m}_a), la relación entre aire y combustible en la combustión (λ) y la concentración en base volumétrica de cada uno de los contaminantes de interés en los gases de escape, entre los cuales se encuentran: CO_2 , CO , NO_x (divididos en NO y NO_2), HC y material particulado, tanto en masa como en número (PM y PN , respectivamente). Teniendo todos estos datos, es posible calcular los factores de emisión de cada contaminante al obtener su flujo másico (ec. 1), evaluando la integral en el tiempo de duración de la prueba y dividiendo por la distancia total recorrida durante esta, como se desarrolla a continuación:

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

Donde \dot{m}_i es el flujo másico instantáneo del contaminante i en $[g/s]$, X_i es la fracción

volumétrica medida del contaminante en unidades de concentración (% o ppm), M_i y M_g son las masas molares del contaminante y de los gases de escape respectivamente en $[kg/kmol]$, y \dot{m}_g es el flujo másico de los gases de escape. Este último se obtiene, partiendo de la ley de la conservación de la masa, al sumar el flujo másico de aire en la admisión del motor con el flujo másico de combustible (\dot{m}_c , ec. 2):

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a}{\lambda}$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_c \quad (2)$$

Ahora bien, esta forma de calcular el flujo másico a partir de las mediciones disponibles solamente es válida para los contaminantes medidos en concentración volumétrica (% o ppm). En los proyectos FECOC+, todos los contaminantes, a excepción del material particulado cumplen esta condición; este se midió en masa (PM) en $\mu g/m^3$ y en número en $\#/cm^3$. Debido a esto, los flujos se calculan como se muestra en las ecuaciones 3 y 4, y quedan en unidades de $\mu g/s$ para PM y $\#/s$ para PN , donde ρ_g es la densidad de los gases de escape.

$$\dot{PM} = X_{PM} \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \quad (3)$$

$$\dot{PN} = X_{PN} \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \quad (4)$$

Conociendo los flujos instantáneos de todos los contaminantes, se puede obtener la masa o la cantidad total de estos emitida durante todo el recorrido al integrar en el tiempo, y luego, al dividirla por la distancia total recorrida, se obtiene el FE correspondiente (ec. 5), expresado en g/km o $\#/km$ para PN . También resulta de interés calcular el rendimiento de combustible utilizado durante la prueba, es decir, qué distancia es capaz de recorrer el vehículo por volumen de combustible utilizado (ec. 6), el cual se obtiene de dividir la masa total de combustible utilizada durante el ciclo por su densidad.

$$FE_i = \frac{\int \dot{m}_i dt}{\int V dt} \quad (5)$$

$$rend = \frac{\int V dt}{\frac{\int \dot{m}_c dt}{\rho_c}} \quad (6)$$

Finalmente, con los resultados obtenidos para cada vehículo se pueden realizar diversos análisis comparativos en cuanto a múltiples factores, como fabricante, modelo, tecnología de alimentación, kilometraje, tipo de transmisión, entre otros. Mediante métodos estadísticos, se pueden encontrar tendencias que indican la influencia que tiene cada variable en las emisiones contaminantes y en el rendimiento del vehículo, con el fin de servir como soporte técnico para la toma de decisiones, ya sea a nivel de regulaciones por parte del gobierno, o a nivel de marcas y fabricantes en cuanto a la optimización de los vehículos que producen.

C. Sincronización

Las mediciones que se realizan para obtener los factores de emisión vienen condicionadas por diferentes sensores asignados para cada variable de interés. Todos estos sensores tienen principios de funcionamiento, configuraciones y tiempos de respuesta distintos, dependiendo del diseño y la implementación del fabricante. Como consecuencia, las señales que entrega cada uno al final del ciclo de conducción tienen diferencias en el tiempo de respuesta correspondiente al momento en el que ocurren ciertos eventos característicos. Por ejemplo, una aceleración, en la que se espera que las emisiones contaminantes y los flujos de aire y combustible aumenten. Lo anterior causa que los comportamientos de una señal no se correspondan con otros, lo cual se puede evidenciar gráficamente por un desfase temporal en el comportamiento esperado.

Para ejemplificar lo mencionado anteriormente, al aumentar la velocidad del vehículo, se le exige al motor una mayor cantidad de energía, por lo que el flujo de aire en la admisión y el flujo de combustible deben aumentar, este último en mayor medida. Al haber un aumento en el consumo de combustible, se debería evidenciar que los productos que se forman en la combustión se manifiesten en mayor cantidad en el escape muy poco tiempo después de

acelerar. Sin embargo, se sabe que este aumento corresponde a la aceleración, por lo que para realizar cálculos a partir de esta, es ideal que se manifiesten en el mismo instante de tiempo. A causa de lo anterior, es de esperar que las señales medidas de las emisiones contaminantes y de los flujos de aire y combustible tengan una correlación alta y un comportamiento visualmente similar al de la velocidad durante el ciclo, marcándose especialmente los instantes en los que el vehículo sale de un estado baja marcha del motor al estar detenido, pues es donde existe un mayor cambio en el consumo de combustible.

En la figura 3 se observa un ejemplo de una prueba para un vehículo específico, en donde las variables no han sido sincronizadas. Se puede evidenciar de manera muy marcada, que la señal de CO_2 se dispara varios segundos después de que la velocidad aumente por primera vez después del segundo 20 de la prueba, de la misma manera que el NO y de forma menos evidente en las demás variables.

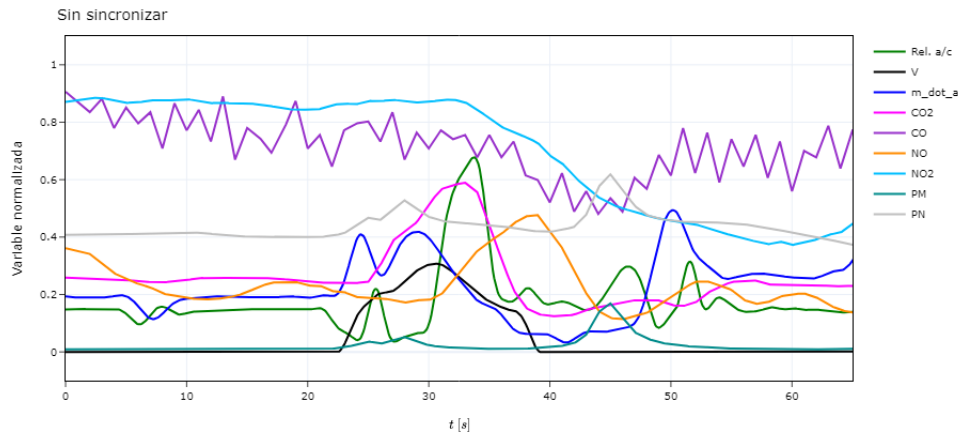


Fig. 3. Variables medidas en una prueba sin sincronizar.

La existencia de este desfase hace que, a la hora de realizar el cálculo de los factores de emisión, tomando como base la ecuación 1, el flujo másico de gases de escape no corresponda con la concentración del contaminante para un instante dado, lo cual genera un error sistemático en los flujos instantáneos, y como consecuencia, en el factor de emisión final. Por esto, es necesario realizar un proceso de sincronización de estas señales antes de proceder con el cálculo de los factores de emisión, de manera que los cambios en la velocidad del vehículo se correspondan con los comportamientos esperados para el cambio en las concentraciones de contaminantes en los gases de escape, además de los flujos de aire y combustible.

Para llevar a cabo la sincronización, se suele utilizar como referencia la señal de velocidad, en la cual se busca el primer evento súbito de aceleración, es decir, cuando el vehículo sale del ralentí inicial para empezar la marcha, con lo cual se ubica este punto en la gráfica de forma automática, buscando un cambio de signo lo suficientemente significativo en la primera derivada de la señal. De la misma manera, se busca este punto para las demás señales, y según si se encuentra a la derecha (desfase positivo) o a la izquierda (desfase negativo), se desplazan las señales de tal manera que los puntos encontrados se encuentren en el mismo instante de tiempo [15].

El método descrito consiste en una estrategia de sincronización por eventos, que, aunque visualmente tenga un desempeño bastante aceptable, no deja de ser un método manual que está muy sujeto al error humano. Debido al ruido inherente de la mayoría de señales, resulta casi imposible automatizar este método con la búsqueda de los mencionados cambios bruscos en la primera derivada. Como alternativa, Restrepo [16] propone 3 métodos de sincronización, entre los cuales se encuentra el método descrito, además de un método estático y un método dinámico.

El método de sincronización estático consiste en asumir un desfase constante a lo largo de todo el ciclo para cada variable medida, lo cual es válido debido a la relación física de las variables que se pretenden sincronizar. Partiendo de un valor semilla de desfase estático, se desplazan todos los valores de la señal en el tiempo y se realiza un algoritmo iterativo que busca el mayor coeficiente de determinación R^2 entre una señal medida, y, en el caso del trabajo de Restrepo, la señal de consumo de combustible variando este desfase estático.

Por otro lado, el método de sincronización dinámica parte de la base de que el flujo másico de los gases de escape es constante, pero debe pasar a través de cambios de sección transversal en su recorrido entre el punto de medición del flujo y el punto de medición de las concentraciones de emisiones contaminantes. Por esta razón, existe un desfase dinámico que depende de un parámetro de aceleración de los gases de escape, sumado al desfase estático, que se considera también presente en este método. Sabiendo esto, este método utiliza un algoritmo iterativo con los dos parámetros mencionados, modificando el vector de tiempo y como consecuencia recalculando el vector de la emisión correspondiente, para finalmente buscar la

mayor correlación de esta nueva señal de emisiones con la señal de flujo de combustible.

D. Eventos de conducción

Los eventos de conducción hacen referencia a las diferentes acciones que se dan a la hora de conducir un vehículo y que se definen por la velocidad y sus variaciones. Según esta clasificación, se tienen los siguientes eventos:

- **Ralentí:** $v \approx 0$. Se da cuando el vehículo está detenido, pero el motor sigue en marcha. Por ejemplo, cuando el vehículo se encuentra detenido en un semáforo en rojo.
- **Velocidad constante:** $v > 0$, $\Delta v/\Delta t \approx 0$. Cuando el vehículo está en movimiento conservando la misma velocidad durante un periodo de tiempo considerable.
- **Aceleración:** $\Delta v/\Delta t > 0$. Se da en el momento en el que el conductor usa el acelerador y el vehículo empieza a aumentar su velocidad gradualmente, o cuando el vehículo gana velocidad por su propio peso debido a pendientes negativas.
- **Desaceleración:** $\Delta v/\Delta t < 0$. Cuando el vehículo pierde velocidad, ya sea debido a un cambio de marcha, frenado, a la fricción propia de las llantas con el pavimento o al perder energía por pendientes positivas.

Cada uno de estos eventos tiene una incidencia directa en el consumo de combustible y en el régimen de giro del motor, por lo que se espera que las emisiones contaminantes en los gases de escape tengan comportamientos diferentes en cada uno. Aunque todos los eventos son necesarios y están presentes en un ciclo de conducción, pueden existir aceleraciones y desaceleraciones en mayor cantidad si se tiene un modo de conducción más agresivo, que implica un uso excesivo del acelerador, consumiendo grandes cantidades de combustible para recorrer distancias cortas, que podrían hacerse perfectamente utilizando menos combustible y aprovechando la inercia del vehículo, la fricción con el pavimento, la resistencia aerodinámica y las pendientes para avanzar y frenar de manera progresiva, sin exigir al motor con más carga de la necesaria.

La conducción más eficiente tiene un patrón más sosegado, evitando aceleraciones innecesarias que lleven a un mayor gasto de combustible, cuya energía producida tiene que

ser disipada finalmente en frenado. Mantener una velocidad constante y moderada, aprovechar la inercia del vehículo y anticiparse a las condiciones del tráfico, son estrategias claves para reducir el consumo. Además, el uso correcto de las marchas y la reducción de cargas innecesarias, contribuyen significativamente a una conducción más económica y ecológica.

V. METODOLOGÍA

Los objetivos planteados en este trabajo toman como base los datos obtenidos durante los proyectos FECOC+, en los cuales, para cada vehículo medido, se tienen disponibles las señales de velocidad, consumo de combustible, flujo de aire en la admisión del motor (flujo de gases de escape en algunos casos), relación entre aire y combustible en la combustión, concentraciones volumétricas de CO_2 , CO , HC , NO y NO_2 en los gases de escape, y concentración de material particulado, tanto en masa (PM) como en número (PN). A partir de los datos disponibles, se propone una secuencia metodológica para su procesamiento y análisis, con lo que se espera alcanzar los objetivos planteados.

A. Sincronización

Como se explicó en la sección C del marco teórico, todas las variables medidas en los proyectos estuvieron condicionadas por los sensores utilizados, además de efectos aleatorios que pueden generar problemas como interferencias, ruido o retrasos en las señales eléctricas. Debido a estos problemas, sumado con los tiempos de respuesta de cada sensor y la naturaleza dinámica de las pruebas, se evidenciaron desfases entre las señales. La existencia de estos desfases hizo que los datos instantáneos no se correspondieran unos con otros, por lo que al aplicar las ecuaciones descritas en la sección IV.B, se evidenció un error sistemático que alteró los resultados finales de flujos máxicos y factores de emisión.

Por lo anterior, en los proyectos FECOC+ se realizó un proceso de sincronización manual por eventos, consistente en identificar el primer evento de aceleración en los ciclos de conducción, en el que, al haber un aumento súbito en el consumo de combustible, se espera que se disparen las concentraciones de contaminantes en los gases de escape, siguiendo un comportamiento similar en todas las señales. Identificando el instante exacto en el que las señales presentan un cambio súbito, se desplazan hacia atrás o hacia adelante, según sea el caso, para poner todas las señales en la misma fase.

Se utiliza la velocidad como señal de referencia para la sincronización, debido a que representa el ciclo de conducción y tiene la confiabilidad más alta en la medición, como se

evidenció al comparar el ciclo de referencia con los reproducidos por los conductores del proyecto. En la figura 4 se observa el ciclo de conducción de referencia en color negro y los ciclos reproducidos, identificados como prueba 1 (P1) hasta prueba 4 (P4). Se logra apreciar que, a pesar del ruido en la medición, los ciclos reproducidos se ajustan fielmente al ciclo de referencia, mostrando siempre, para todos los vehículos medidos, un coeficiente de correlación mayor al 99 % [6, pp. 25-27].

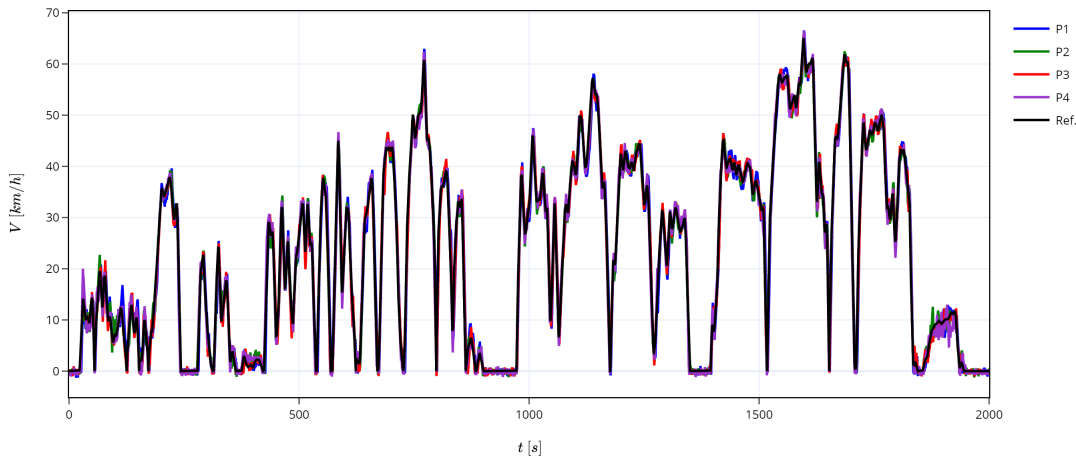


Fig. 4. Verificación de las mediciones de velocidad y seguimiento del ciclo de conducción para un vehículo.

Para preparar las señales para el proceso de sincronización, en primer lugar se realizó una selección de pruebas válidas, que mostraran repetibilidad entre sí. Luego, se realizó un remuestreo de las señales de emisiones contaminantes para pasar de un dato por segundo a diez, de manera que tuvieran la misma frecuencia de muestreo que las señales de velocidad, flujo de aire y relación aire/combustible. Por último, se realizó un filtrado de estas 3 últimas señales, que en todas las mediciones mostraron un nivel de ruido considerable.

Con toda la preparación lista, se utilizó un algoritmo que, con la primera derivada de la señal, buscaba el primer punto de cambio considerable en cada una, de manera que lo identifique como el punto candidato para la sincronización. Se llevó a cabo una verificación visual de cada uno de estos puntos y se corrigieron manualmente con criterio humano. A pesar de que visualmente el resultado de la sincronización fue aceptable, al verificar la correlación de las señales de cada gas contaminante con la señal de flujo de aire, no siempre se obtenía un resultado satisfactorio. Por eso, en este trabajo se propone utilizar las metodologías de

sincronización por desfase estático y desfase dinámico [16], partiendo de los datos que se tienen ya sincronizados manualmente. En la figura 5 se presenta una esquema de la metodología del proceso de sincronización.

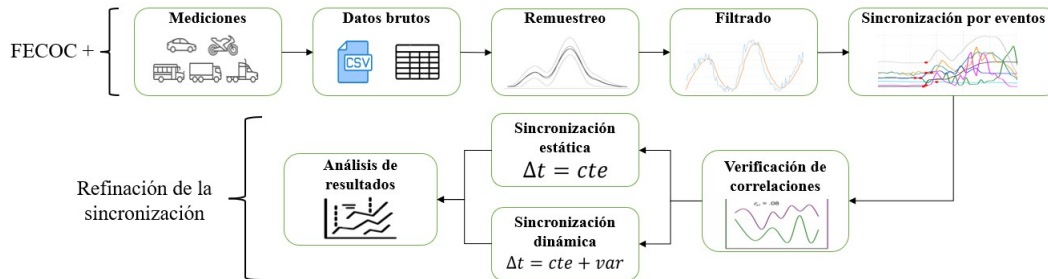


Fig. 5. Metodología para la sincronización.

Para la sincronización estática, se parte de la hipótesis de que el desfase que presentan los sensores debido a su propio funcionamiento y a variables externas es constante durante toda la prueba, por lo que se puede corregir desplazando las señales hacia atrás o hacia adelante en el tiempo, según sea el caso. El objetivo es obtener la mayor correlación posible entre el flujo de aire y las concentraciones de gases contaminantes. Partiendo de esta base, en primer lugar, se itera un parámetro que representa el desfase estático entre los 5 segundos antes y después del punto seleccionado en la sincronización por eventos (intervalo de 100 datos), buscando la máxima correlación entre la señal de flujo de aire y la de velocidad, lo cual garantiza que la primera de estas se corresponda con el ciclo de conducción seguido. Posteriormente, se realiza el mismo proceso con cada contaminante y el flujo de aire. En la figura 6 se ilustra el procedimiento utilizado.

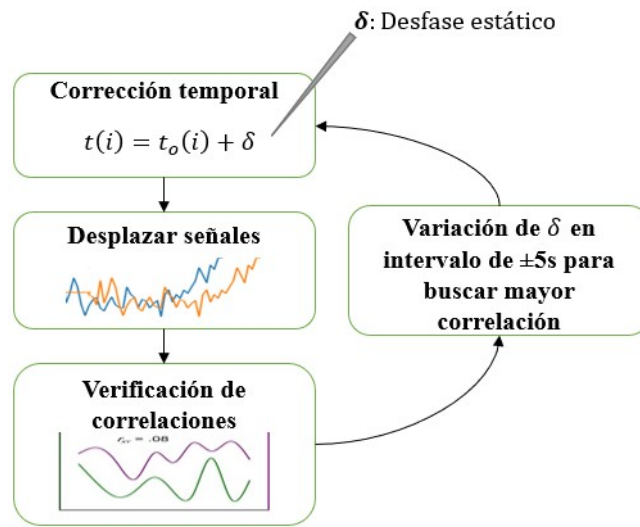


Fig. 6. Algoritmo de sincronización estática.

En cuanto a la sincronización dinámica, se tiene en cuenta el recorrido que hace el aire desde la admisión del motor hasta salir al punto de medición como gases de escape. El flujo másico se toma constante, considerando que el combustible que se añade apenas representa una pequeña fracción de cerca del 7% en condiciones estequiométricas para un motor de encendido provocado, y aún menos para un motor de encendido por compresión; sin embargo, al pasar por la cámara de combustión y luego al escape, el área transversal de flujo es variable, además de la misma velocidad de los gases, que cambia dependiendo del régimen de giro del motor. En las ecuaciones 7, 8 y 9, se muestra el desarrollo para llegar al desfase dinámico.

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a} \quad (7)$$

$$v = \frac{\dot{m}_a}{\rho A} \quad (8)$$

Donde Δt es el desfase dinámico, Δv es el cambio en la velocidad de los gases, a es la aceleración de los gases, \dot{m}_a es el flujo másico de aire, ρ es la densidad de los gases y A es el área transversal de flujo. Remplazando, se tiene que:

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{\left(\frac{\dot{m}_a}{\rho A_2} - \frac{\dot{m}_a}{\rho A_1}\right)}{a} \\ \Delta t &= \frac{\dot{m}_a}{\rho a} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1}\right) \\ \Delta t &= \dot{m}_a x \\ \text{con } x &= \frac{\left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1}\right)}{\rho a}\end{aligned}\tag{9}$$

En el término x , se puede ver que A_1 y A_2 son constantes, pues son propiedades del vehículo. La densidad de los gases ρ se puede considerar constante en la admisión, pero no en el escape, debido a que existen variaciones grandes en la temperatura de salida en diferentes momentos de la conducción según la cantidad de combustible utilizado en dicho instante; sin embargo, al considerar que estos rangos son fijos, se puede hacer la aproximación de utilizar la densidad calculada a la temperatura promedio para simplificar el proceso. Con todo esto, resulta un término x multiplicando al flujo másico de aire \dot{m}_a . Este término dependerá de la aceleración de los gases de escape a , que indica que el desfase Δt no se mantiene constante a lo largo de todo el ciclo, sino que varía dependiendo del régimen de giro del motor, y en consecuencia, del flujo másico de aire. Como resultado, se obtiene un desfase dinámico que varía para cada instante de la prueba.

Este método también considera que existe el desfase estático por las mismas razones que las expuestas en el anterior método de sincronización, por lo que se añade junto con el desfase dinámico. Debido a que el nuevo tiempo no es secuencial, es necesario recalcular las señales de las emisiones contaminantes realizando una interpolación lineal, y, finalmente, ajustar la señal obtenida al tiempo real utilizando el desfase estático. En la figura 7 se ilustra el procedimiento utilizado.

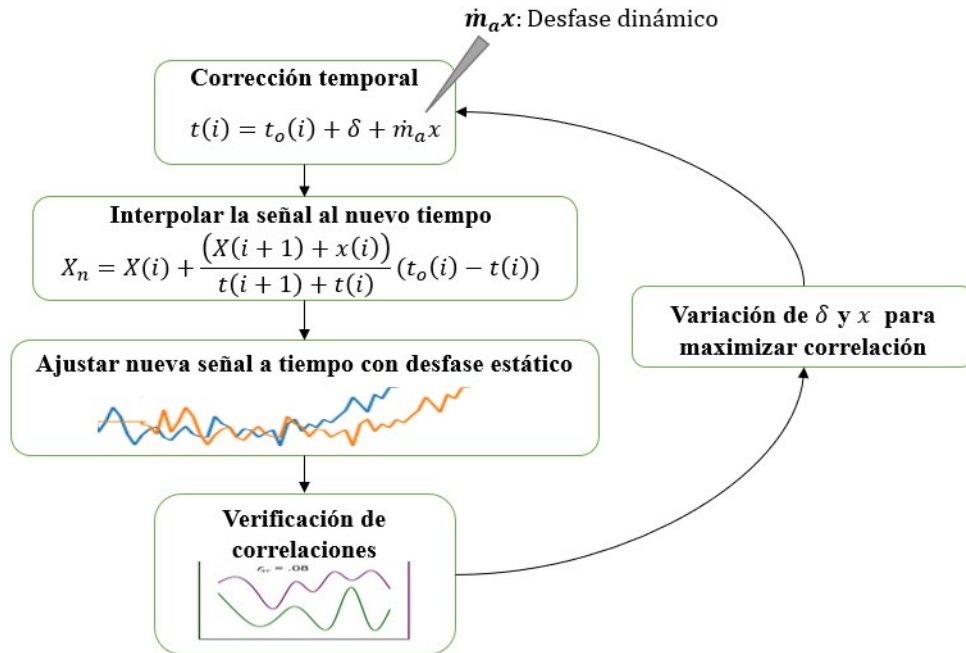


Fig. 7. Algoritmo de sincronización dinámica.

A pesar de la rigurosidad de los métodos expuestos, se debe tener en cuenta que estos no se pueden aplicar a la señal de relación aire/combustible, debido al comportamiento inverso de esta, que no necesariamente busca una correlación alta o baja. Esta señal se trata de manera inversa en la sincronización por eventos, buscando el primer punto de bajada súbita en el ciclo de conducción. Por otro lado, para reducir el error por la aproximación de la densidad, propuesta en la sincronización dinámica, sería ideal trabajar con el flujo de gases de escape en lugar del de aire de admisión, pero como esta señal sale a partir de un cálculo que se realizaría antes de sincronizar, no sería adecuada para obtener resultados confiables.

B. Base de datos

Durante la fase 3 de FECOC+, se guardaron los resultados de los factores de emisión en una base de datos a modo de tabla en Excel, teniendo en cuenta los resultados para cada prueba, las pruebas válidas y algunos detalles importantes en la identificación de cada vehículo. Para esto, se siguió un procedimiento estricto desde la obtención de los datos en las mediciones, pasando por una selección de pruebas válidas, donde se verificaba que las señales mostraran repetibilidad y fueran representativas del ciclo de conducción. Se realizó

una unificación de los datos en una sola estructura ordenada que permitiera acceder a los datos de manera fácil y rápida, separando por categorías de vehículos, marca, referencia y número de prueba, dentro de las cuales se encontraban todos los datos instantáneos de las mediciones. Con los datos organizados, se realizó todo el proceso de sincronización descrito en la sección anterior, para finalmente, calcular los factores de emisión aplicando las ecuaciones de la sección IV.B.

Aparte de los factores de emisión, se guardaron los datos instantáneos de flujos máxicos para cada contaminante, calculados a partir de la señal de concentración volumétrica y el flujo máxico de gases de escape, al utilizar la ecuación 1. El algoritmo de procesamiento y almacenamiento de datos se implementó mediante Python, como se puede ver en la figura 8.

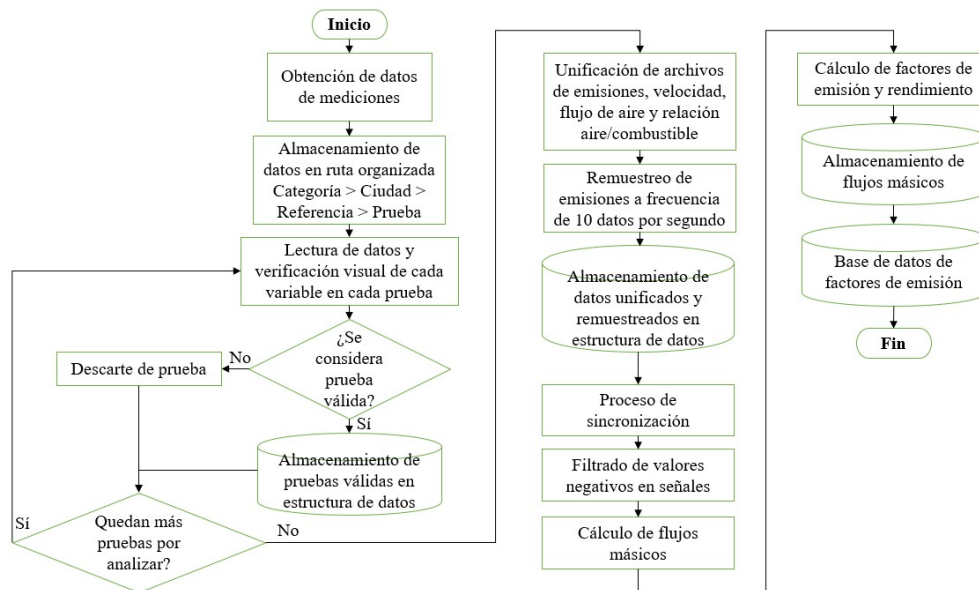


Fig. 8. Algoritmo para procesamiento de datos en FECOC+ fase 3.

Como añadido en este trabajo, se realizará la unificación de los datos de las mediciones de las 3 fases de los proyectos en una misma estructura de datos, aplicando a todos la misma metodología de procesamiento que la aplicada en FECOC+ fase 3, realizando las adaptaciones y acondicionamientos necesarios a los datos, que en algunos casos tienen otros procedimientos de procesamiento.

En FECOC+ fase 2.1, las mediciones de partículas se hicieron con un equipo diferente al de los demás contaminantes; este consistía en una serie de 14 impactadores que medían

diferentes tamaños de partículas, así contando masa y número. Por otro lado, se contó con banco de rodillos para medir la velocidad instantánea de los camiones pequeños y buses, mientras que los camiones grandes y tractocamiones fueron medidos en ruta. En esta etapa del proyecto, no se midió relación aire/combustible, sino que se reportó en algunos casos el consumo total de combustible en todo el ciclo, y para algunos vehículos se midió el flujo másico de combustible utilizando una balanza.

En FECOC+ fase 2.2 todos los vehículos se midieron en ruta, y se contó con los datos de flujo de aire y relación aire/combustible para todas las mediciones. Las partículas se midieron con el mismo equipo que los demás contaminantes.

Aparte a todos los datos resultantes de FECOC+, se cuenta con una serie de datos adicionales de 27 motocicletas medidas con un ciclo de conducción diferente, denominado ciclo AMVA, realizadas a la altitud de la ciudad de Medellín, en donde se utilizaron los mismos equipos y procedimientos de medición de FECOC+ fase 3. Resulta de particular interés para este trabajo el uso de esos datos para la validación de la clasificación de las emisiones por eventos de conducción.

Teniendo en cuenta todos los procedimientos diferentes realizados en cada etapa, con el fin de unificar los datos en una sola estructura con sus clasificaciones organizadas y fácil de acceder para realizar análisis posteriores, resulta necesario implementar un algoritmo de procesamiento específico para cada medición en condiciones diferentes, como se explicó en los párrafos anteriores. Además, se propone una estructura de diccionario de Python, que guarda claves y definiciones. Estas definiciones pueden ser cualquier tipo de variable, incluyendo otro diccionario. De esta forma, se puede lograr una estructura ramificada, incluyendo clasificaciones de manera organizada por categorías vehiculares, ciudad de medición, referencia del vehículo, número de prueba y datos de cada prueba. En la figura 9 se muestra gráficamente la estructura de organización final de los datos.

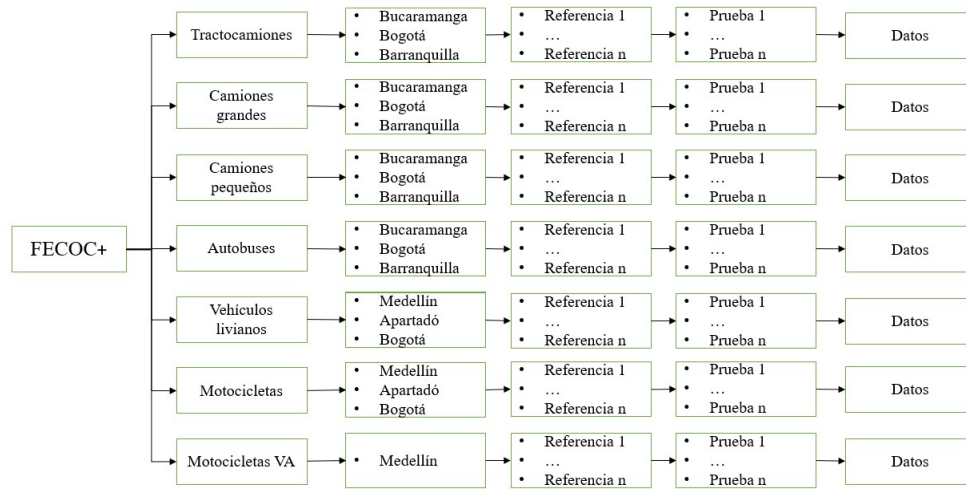


Fig. 9. Estructura de organización de datos.

La misma estructura se utiliza para guardar los datos de flujos másicos obtenidos en la etapa de cálculo de factores de emisión.

C. Eventos de conducción

Como trabajo adicional a la construcción de la base de datos de factores de emisión, se identificaron los eventos de ralentí, aceleración y desaceleración en los ciclos de conducción, con el fin de caracterizar el comportamiento de los flujos másicos de contaminantes durante cada evento.

La metodología empleada consistió buscar los puntos de cambio de signo en la pendiente de la señal de velocidad, donde una pendiente positiva, o dicho de otro modo, un aumento de velocidad en el tiempo representa un evento de aceleración, un periodo de tiempo con velocidad aproximadamente igual a 0 representa un evento de ralentí y una disminución de la velocidad en el tiempo representa un evento de desaceleración. No se consideró el evento de velocidad constante, debido a que por las características de la conducción, es casi imposible mantener exactamente la misma velocidad por un tiempo prolongado. Siempre existirán variaciones pequeñas debido a la necesidad de acelerar para mantener la inercia del vehículo, y de frenar para no exceder la velocidad a la que se pretende conducir. En resumen, este evento contiene fragmentos de aceleración y desaceleración, por lo que, aparte de que es muy

difícil que se dé, se podría estudiar de una mejor manera separándolo en los otros 2 eventos mencionados. En la figura 10 se muestra un ciclo de conducción separado por los 3 eventos mencionados.

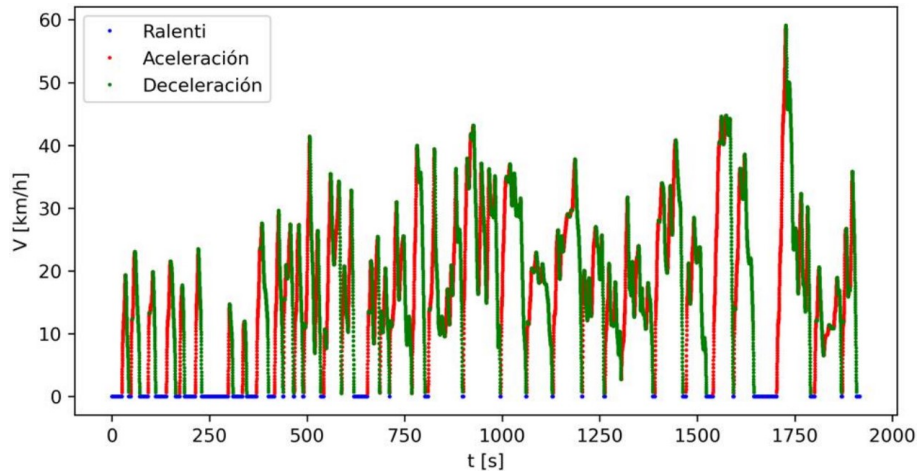


Fig. 10. Ciclo de conducción separado por eventos de ralentí, aceleración y desaceleración.

Por la naturaleza dinámica de las mediciones, las vibraciones presentes y factores eléctricos, es normal que la señal de velocidad presente un ruido considerable, causando que existan fluctuaciones positivas y negativas durante un mismo evento. Por esto, se realizó un proceso de filtrado, para buscar darle continuidad a la señal, y eliminar cambios bruscos en las pendientes, conservando las características del ciclo de conducción. Para esto se utilizó un filtro de Savitzky-Golay, identificando manualmente las mejores ventanas de datos para cada categoría vehicular. Este filtro tiene la característica de conservar los puntos máximos y mínimos de la señal, asegurando que no se pierda información de velocidades máximas y mínimas del ciclo [17].

Se utilizó la primera derivada de la velocidad para buscar los puntos de cambio de pendientes, entre positivas, negativas y cero, y se identificaron dentro del ciclo de conducción, los fragmentos de tiempo correspondientes a cada evento. Sin embargo, a pesar de la efectividad del filtro, algunos de los eventos tenían duraciones muy cortas, por lo que no contenían suficientes datos para estudiar el efecto de los eventos de conducción en las emisiones contaminantes. En consecuencia, solo se seleccionaron los eventos con una duración mayor a 5 segundos, y además, se seleccionaron para ralentí todos los instantes con una velocidad

menor a 0.5 km/h, al considerarse como una velocidad despreciable, posiblemente medida debido a ruido en los instrumentos de medición.

Con la separación del ciclo por eventos lista y los flujos máxicos sincronizados, se identificaron las masas de contaminantes (número para PN) emitidas por cada evento según su duración, y mediante un análisis estadístico de varianza (ANOVA), se buscaron diferencias significativas entre los resultados para cada evento.

En la fase 2.2 de FECOC+, se realizó un estudio de clasificación de factores de emisión de acuerdo a los rangos de aceleración, identificando un umbral de $0.5 m/s^2$ para aceleración alta o baja, además de los eventos de desaceleración. Se realizó el ANOVA para los datos obtenidos, encontrando grandes diferencias entre los eventos de aceleración alta y baja, además de encontrar coincidencias entre aceleración baja y desaceleración [5, pp. 105-110].

En la fase 3 de FECOC+, se realizó un análisis exploratorio que encontró que los datos pueden ser agrupados por intervalos de una variable adimensional, que se definió como índice de aceleración en la conducción (ecuación 10), construida a partir de la velocidad, el tiempo y variables derivadas de éstas.

$$I_{acel} = \frac{a\Delta t}{V} \quad (10)$$

Un mayor valor de este índice implica mayores aceleraciones relativas a la velocidad del vehículo, y por lo tanto más agresividad en la conducción. Se encontró que hay un comportamiento diferenciado de los datos para ciertos rangos de valores de este índice. Esto se usó como criterio para definir tres tipos de eventos de aceleración: bajo, medio y alto. Se calcularon los factores de emisión en cada evento de acuerdo a las clasificaciones, obteniendo los resultados mostrados en la tabla II. Todos los datos mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, mostrando la efectividad de la clasificación [6, pp. 159-166].

En este trabajo se realizará en primer lugar, una exploración de los flujos máxicos dados en cada evento. En segundo lugar, una clasificación utilizando variables dinámicas para obtener un parámetro adimensional, capaz de caracterizar con tendencias claras el comportamiento de los factores de emisión basado en la agresividad de la conducción. Si bien con

TABLA II
FACTORES DE EMISIÓN EN EVENTOS DE ACELERACIÓN CLASIFICADOS POR ÍNDICE EN
FECOC+ FASE 3.

Categoría	Índice de aceleración	Rend. comb. [km/gal]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO [mg/km]	HC [mg/km]	PM [mg/km]	PN [#x10 ¹⁰ /km]
Motocicletas	Alto	361	18.3	1.53	15.6	97.8	0.165	1.16
	Medio	523	13.1	0.895	10.2	58.2	0.112	1.27
	Bajo	663	10.6	0.744	8.38	36.7	0.0886	1.45
Vehículos livianos	Alto	71.9	144.6	0.624	18.9	45.8	0.280	1.92
	Medio	111	93.17	0.377	11.5	29.1	0.183	1.75
	Bajo	177	58.53	0.226	8.27	17.6	0.115	1.73

el índice de aceleración encontrado en FECOC+ fase 3 se muestran tendencias para todas las emisiones, estas solo funcionan para motocicletas y vehículos livianos, y tiene un sentido físico que puede resultar muy abstracto. Además, la selección de los intervalos en los que se considera un índice alto, medio o bajo se realizó de forma manual, resultando en un trabajo tedioso y propenso a sesgos.

Se propone entonces, la metodología mostrada en la figura 11 para realizar la caracterización de las emisiones por un índice que indique físicamente la agresividad en la conducción, utilizando estrategias de clasificación y análisis estadístico para la búsqueda de tendencias.

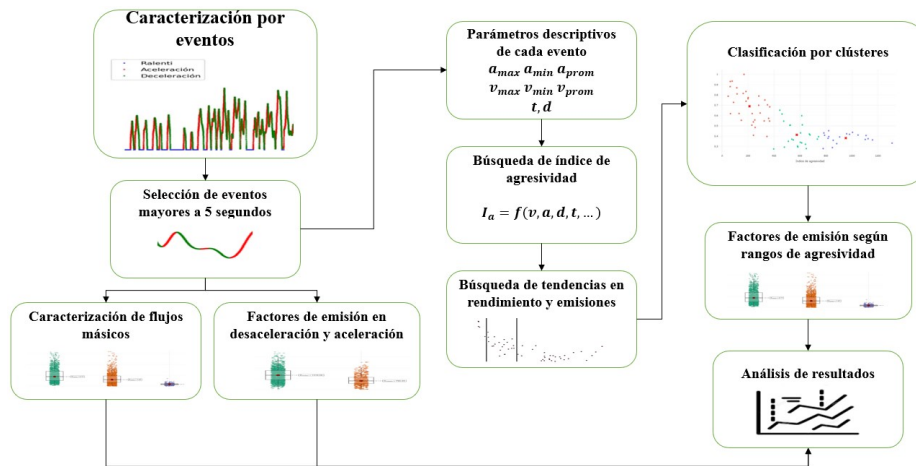


Fig. 11. Metodología para clasificación de emisiones por eventos y rangos de agresividad.

Después de todos los pasos metodológicos presentados para el cumplimiento de cada uno de los objetivos y su respectiva implementación, se procede en la siguiente sección con la presentación, análisis y discusión de los resultados.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Sincronización

Se realizaron pruebas con diferentes vehículos, utilizando los 3 métodos de sincronización propuestos para evaluar las correlaciones de cada emisión con la variable de referencia. Al realizar una comprobación visual de cada método de sincronización, se puede observar que la variación es mínima, casi que invisible a simple vista, como se ve en la figura 12.

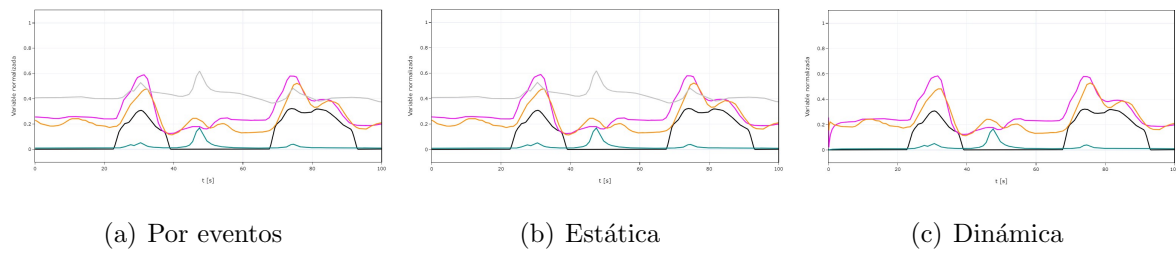


Fig. 12. Comparación visual de los diferentes métodos de sincronización.

Sin embargo, al evaluar las correlaciones obtenidas con cada uno de los métodos, se encuentran diferencias sustanciales. En la figura 13 se muestran los resultados de correlación para cada método de sincronización para el flujo de aire y el CO_2 de una muestra de pruebas.

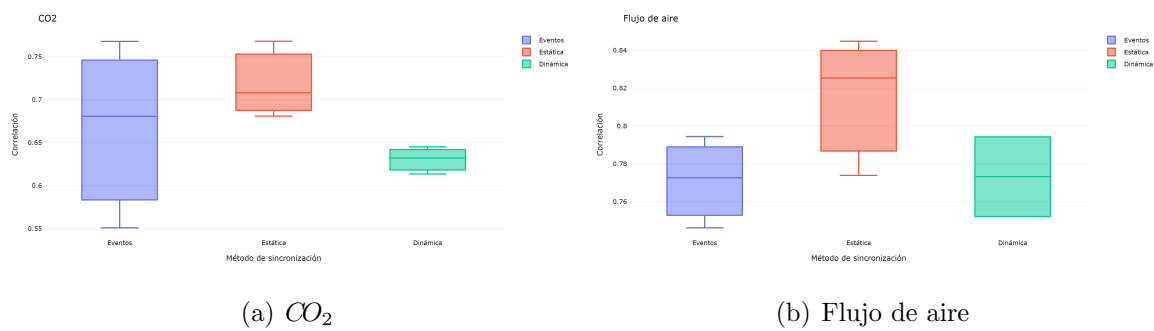


Fig. 13. Correlaciones obtenidas para los diferentes métodos de sincronización.

Se puede observar que los mejores resultados corresponden al método de sincronización estática, mejorando en gran medida la correlación obtenida en la sincronización por eventos,

y disminuyendo su variabilidad. En cuanto a la sincronización dinámica, los resultados estuvieron muy por debajo de lo esperado, posiblemente por las simplificaciones consideradas desde la metodología, además de que al modificar los valores de la señal original, se evidencian anomalías en los extremos, lo cual puede afectar negativamente la correlación de toda la curva.

Debido a los resultados expuestos, se opta por trabajar con la sincronización estática, partiendo previamente de la sincronización por eventos realizada en los proyectos FECOC+ y utilizando el algoritmo descrito en la figura 6, buscando la mejor correlación entre los 5 segundos anteriores y posteriores al punto tomado en el primer procedimiento.

B. Base de datos

Siguiendo la metodología propuesta, se cuenta con la base de datos de factores de emisión de todos los vehículos medidos en las fases 2 y 3 de FECOC+, con valores corregidos después de la refinación de la sincronización. Adicionalmente, se cuenta con todos los datos instantáneos de concentraciones y de flujos máscicos sincronizados para cada variable en cada prueba realizada. En la tabla III se muestra el resumen de los datos medidos.

TABLA III
RESUMEN DE PRUEBAS REALIZADAS.

Categoría	Cantidad de vehículos	Total de pruebas	Total de datos
Tractocamiones	12	54	8919291
Camiones 2 ejes pequeños	12	53	8782726
Camiones 2 ejes grandes	13	54	8835964
Autobuses	14	63	8238105
Motocicletas	53	203	32473467
Motocicletas AMVA	26	107	16747265
Vehículos livianos	38	156	22444407
Total	168	690	106441225

En la figura 14 se muestra de manera comparativa los factores de emisión obtenidos en

todas las pruebas para todos los vehículos medidos, además del rendimiento de combustible.

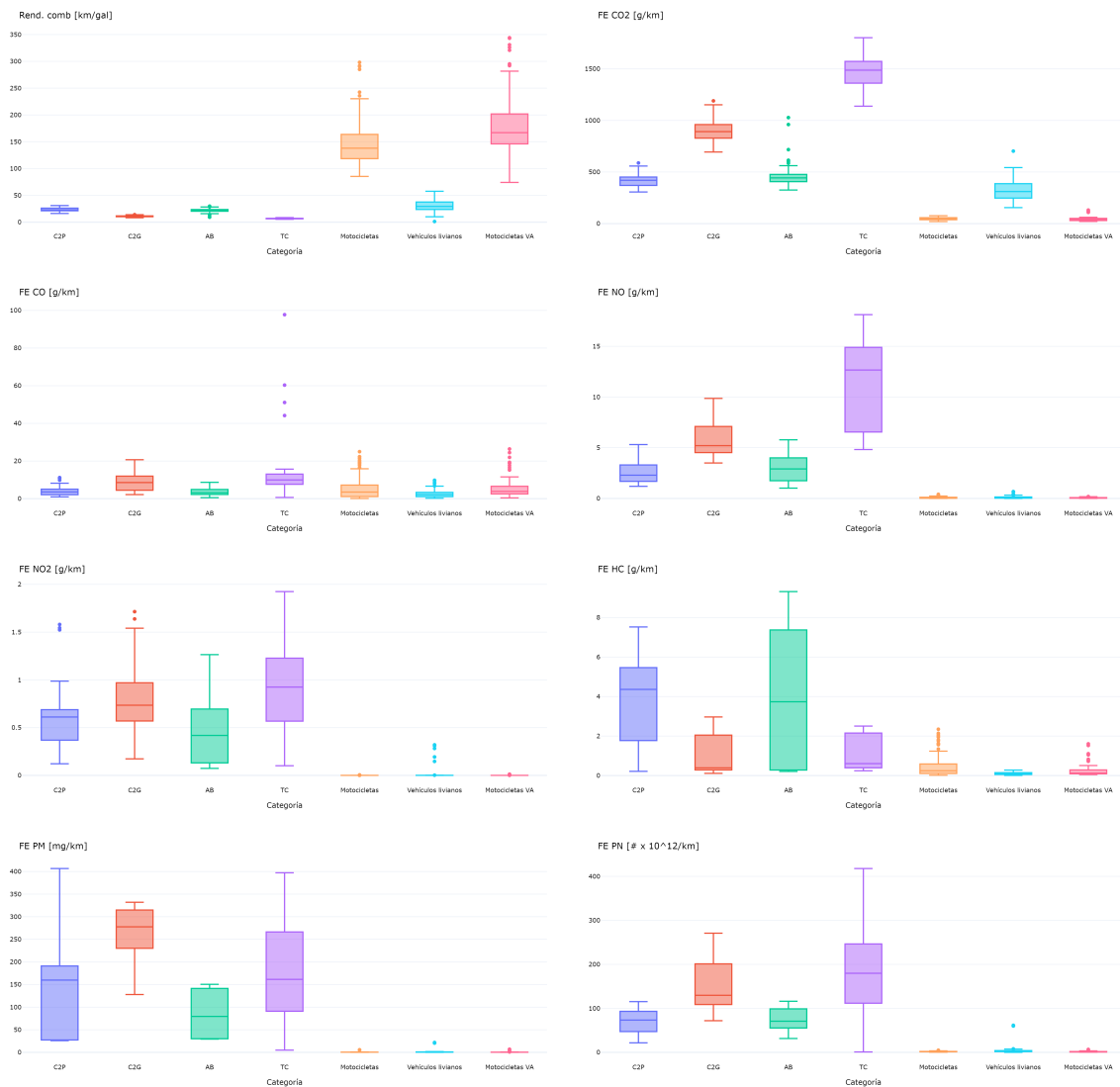


Fig. 14. Factores de emisión obtenidos para todos los vehículos medidos.

C. Eventos de conducción

Partiendo de la señal de velocidad, se realizó la separación de cada prueba por eventos de aceleración, desaceleración y ralenti, conservando sólo los eventos con una duración mayor o igual a 5 segundos, al considerar que una duración menor no aporta suficiente información para realizar cálculos y análisis.

En primer lugar, se realiza un análisis de los flujos máxicos instantáneos de combustible y de cada contaminante para cada categoría vehicular, buscando identificar tendencias y comportamientos en cada uno de estos. La comparación se realiza mediante análisis de varianza, para determinar si los valores representativos de cada tipo de evento son diferentes entre sí con significancia estadística del 95%. Para esto, se verifica la distribución de los residuales de cada variable en cada categoría vehicular para verificar la existencia de una distribución normal en los datos mediante la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* [18], además de la verificación visual mediante diagramas de cuartiles, como se muestra en la figura 15.

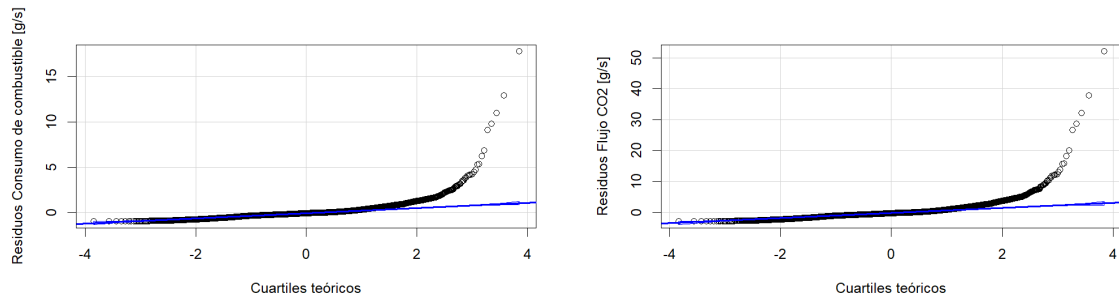


Fig. 15. Diagramas de cuartiles para consumo de combustible y Flujo de CO_2 instantáneos.

Los diagramas de cuartiles muestran desviaciones significativas de la diagonal, lo cual indica un incumplimiento de la normalidad teórica para el caso de las 2 variables mostradas. En ninguno de los casos evaluados, es decir, en ninguna de las variables dentro de ninguna de las categorías vehiculares se obtuvo un resultado de normalidad teórica, tanto al evaluar los diagramas de cuartiles como al evaluar la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*. Debido que no se cumple normalidad en la distribución, se empleó una prueba no paramétrica (*Kruskal-Wallis*) para determinar si hay diferencia significativa entre al menos dos de las medianas que representan cada evento de conducción. En todos los casos se obtuvo un valor p por debajo de 0.05, lo cual significa que al menos dos de las medianas fueron diferentes con una confianza del 95% [19].

El siguiente paso consistió en realizar un análisis *post-hoc*, mediante otra prueba no paramétrica (prueba de *Dunn*), para diferencias significativas entre eventos de ralentí y ace-

leración, ralenti y desaceleración, y aceleración y desaceleración. 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. La figura 16 muestra a manera de ejemplo los resultados para algunas variables en diferentes categorías vehiculares. Todas las pruebas estadísticas se realizaron mediante el lenguaje de programación **R**.

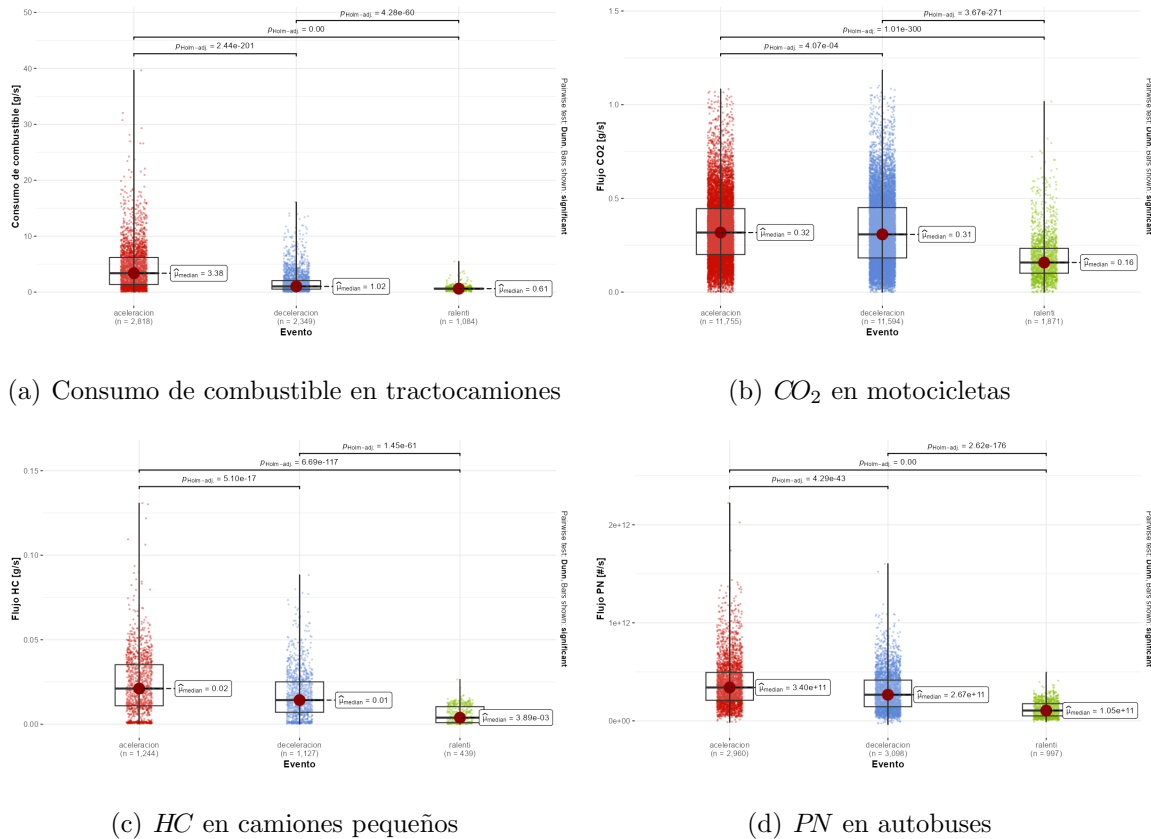


Fig. 16. Comparación entre eventos de conducción para algunas variables.

Al igual que en los resultados mostrados, todas las variables mostraron una diferencia significativa entre estos tres eventos (valor $p < 0,05$), dándose siempre los mayores flujos máxicos de contaminantes en eventos de aceleración, seguido de desaceleración y por último ralenti. En comparación con los resultados obtenidos en las fases 2 y 3 de FECOC+, se llega a conclusiones similares, mostrando las mismas tendencias esperadas, con pequeñas variaciones en los valores reportados, debido a la diferencia en el proceso de sincronización de las señales. En el anexo A se muestran las medianas de cada variable para cada categoría vehicular.

El análisis anterior se basa en concentración de emisiones contaminantes y consumo de combustible en función del tiempo de duración de cada evento. También resulta de interés realizar un análisis basado en la distancia recorrida durante cada evento, de manera similar a la forma en la que se reportan los factores de emisión. Como en los eventos de ralentí la velocidad es 0, no es posible obtener datos en términos de la distancia recorrida, por lo que se descarta para el análisis de la influencia de los eventos de conducción en los factores de emisión.

Con el fin de realizar un análisis más detallado que simplemente establecer rangos de aceleración, se identificaron en cada evento los parámetros de conducción medidos que lo describen, entre los cuales se encuentran el tiempo de duración del evento, la distancia recorrida durante éste, y las velocidades y aceleraciones máximas, mínimas y promedio del evento. Se encontró que los eventos se pueden agrupar por rangos de una variable adimensional, calculada a partir de combinaciones de estos datos, como se propone en la ecuación 11.

$$I_a = \frac{\Delta V^2}{a_{max}d} \quad (11)$$

Esta variable se define como índice de agresividad en la conducción, y se calcula como el cuadrado del cambio de velocidad en el evento de conducción respectivo, dividido por la aceleración máxima registrada en éste y la distancia total recorrida. El cuadrado de la velocidad se puede asociar con la energía cinética específica del vehículo, debida a su movimiento $[\frac{kJ}{kg}]$. Esto indica que cambios más pronunciados de la energía cinética en menores distancias corresponden a una conducción más agresiva, la cual, según los resultados encontrados, influye directamente en las emisiones contaminantes y en el rendimiento de combustible. En la figura 17 se muestran tendencias encontradas en varios vehículos para diferentes variables, al clasificar los eventos de aceleración y desaceleración de acuerdo a los valores calculados del índice de agresividad para cada evento.

Al identificar que existen tendencias marcadas en la gran mayoría de las pruebas evaluadas, se procede a realizar una separación por *clusters*, utilizando el algoritmo de *KMeans*

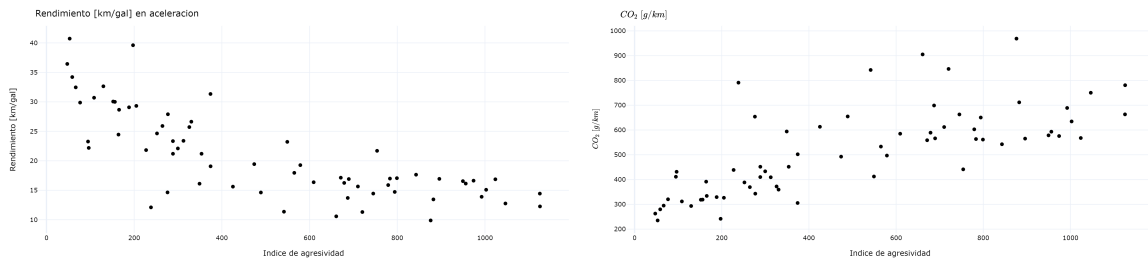


Fig. 17. Tendencias encontradas en factores de emisión y rendimiento de combustible con el índice de agresividad.

implementado con Python [20]. Para la selección del número de *clusters*, se identificó mediante la curva del codo (figura 18), que 3 *clusters* describen los grupos con suficiente detalle, y que no tiene beneficio adicional utilizar más [21].

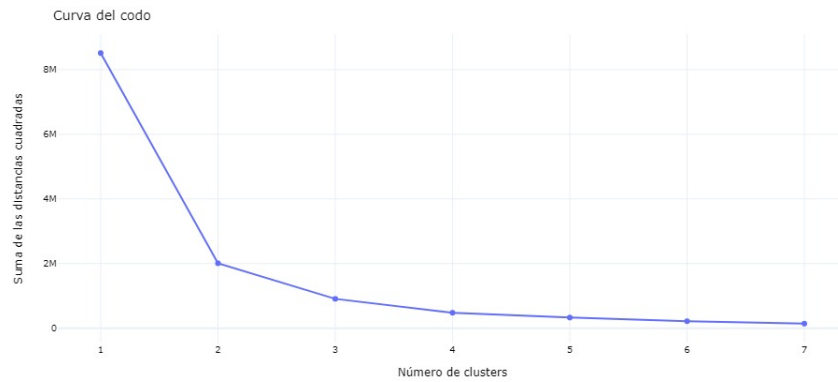


Fig. 18. Curva del codo para selección del número de *clusters*

De esta manera, el algoritmo identifica de manera automática 3 rangos para el índice, que corresponden a agresividad baja, media o alta. En la figura 19 se observa el resultado del algoritmo de clasificación para algunas de las variables en pruebas específicas. Para que la clasificación no se viera afectada por los valores de cada variable fue necesario normalizarlas, de modo que todo el peso del algoritmo recayera sobre el índice de agresividad.

A pesar de demostrar ser una estrategia efectiva, los rangos del índice de agresividad mostraron variaciones marcadas entre cada prueba, por lo que las fronteras entre agresividad baja y media y entre media y alta resultaban distintas incluso entre vehículos de la misma categoría. Para solucionar esto se realizó un análisis estadístico mediante la prueba de

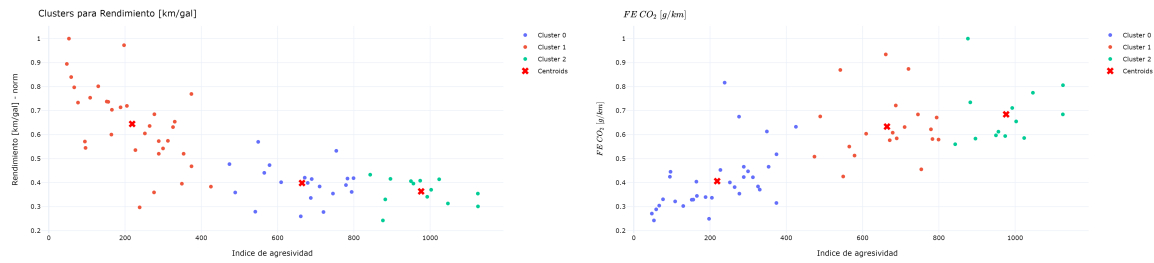


Fig. 19. Separación por clústers por rangos del índice de agresividad.

Kolmogorov-Smirnov aplicada a la distribución de los datos de las fronteras, que corresponden al punto medio entre centroides de dos clústers consecutivos. En este análisis se llegó a la conclusión de que los datos siguen una distribución normal, por lo que la mediana y el promedio son aproximadamente iguales, y pueden representar con una confianza estadística del 95 % a los datos.

De esta manera, se escogieron los intervalos que definen los rangos de agresividad baja, media y alta para cada categoría vehicular (tabla IV) y se realizaron los mismos análisis estadísticos de varianza utilizados para los flujos máscicos para verificar la significancia estadística de los datos. Fue necesario utilizar pruebas no paramétricas, debido a que se llegó a la conclusión de que los residuales no se distribuyen normalmente. En el anexo B se muestran en detalle los resultados correspondientes a todas las variables en todas las categorías vehiculares.

TABLA IV
FRONTERAS ENTRE RANGOS DE AGRESIVIDAD PARA CADA CATEGORÍA VEHICULAR

Frontera	Tractocamiones	Camiones pequeños	Camiones grandes	Autobuses	Vehículos livianos	Motocicletas
Baja - Media	155.34	237.15	252.01	293.84	377.93	321.96
Media - Alta	343.12	474.27	489.83	517.66	795.92	711.97

Los resultados al evaluar el índice de agresividad en eventos de aceleración muestran tendencias muy coherentes en rendimiento de combustible y factor de emisión de CO_2 en todas las categorías vehiculares, obteniendo un rendimiento mayor en agresividad baja, que decrece a medida que aumenta la agresividad, y de manera inversa para el CO_2 , siempre con una diferencia estadísticamente significativa entre los rangos.

En cuanto al CO , se obtuvo la tendencia esperada en todas las categorías vehiculares, a excepción de tractocamiones y motocicletas, las cuales tienen su máximo en agresividad media, y luego muestran una disminución en agresividad alta, aunque sigue siendo mayor que agresividad baja con una diferencia estadísticamente significativa. Observando esto, sabiendo que se midieron vehículos con características diferentes, se propone observar la tendencia al normalizar el valor de las emisiones de cada prueba y realizar el análisis estadístico. En tractocamiones (figura 20 se observa que la tendencia se arregla, aunque no existe diferencia significativa entre agresividad media y alta, mientras que en motos (figura 21 se obtienen resultados similares para ambos, también sin diferencia significativa. Esto indica la incidencia de las características específicas de cada vehículo en este análisis.

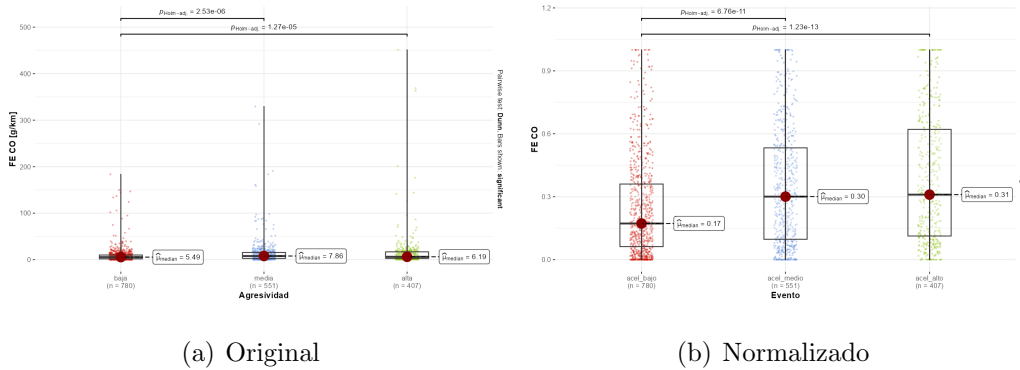


Fig. 20. CO real y normalizado para tractocamiones.

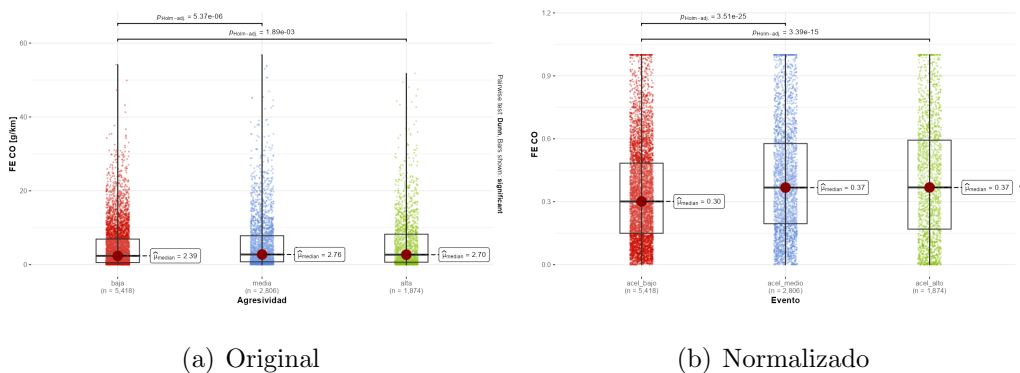


Fig. 21. CO Original y normalizado para motocicletas.

Para los HC , se presenta una tendencia coherente en todas las categorías vehiculares,

a excepción de motocicletas medidas con ciclo AMVA, donde los resultados son altamente similares en agresividades media y alta; sin embargo, al evaluar las emisiones normalizadas, se ve una corrección en la tendencia con una diferencia estadísticamente significativa. Por otro lado, a pesar de las tendencias correctas, se obtuvieron resultados alarmantemente altos de emisión de HC en camiones pequeños y autobuses, especialmente en agresividad alta, llegando hasta valores de 7.19 y 8.38 gramos por kilómetro, respectivamente. Estas dos categorías se midieron usando los mismos vehículos, variando el ciclo que se aplicó a cada uno. Si se observan bien las gráficas (figura 22) se pueden identificar muchos puntos que van a la parte más baja, pudiendo indicar que el alto valor del factor de emisión final es debido a algunos vehículos específicos.

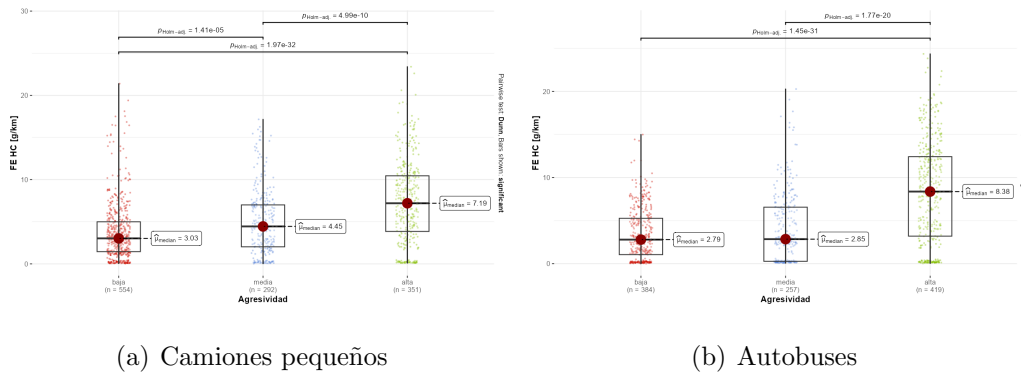


Fig. 22. HC en camiones pequeños y autobuses.

Al analizar las emisiones de NO y NO_2 , se evidencia la tendencia esperada en todas las categorías de vehículos pesados, mostrando aumentos considerables con una mayor agresividad en la conducción, lo que se asocia con el aumento de temperatura al enriquecer la mezcla aire/combustible con aceleraciones más bruscas. En vehículos livianos y motocicletas medidas con el ciclo AMVA, no existe una diferencia significativa entre agresividad media y alta en NO_2 , pero los valores de todas las motocicletas, así como los vehículos livianos en óxidos de nitrógeno son tan pequeños, que pueden llegar incluso a considerarse ruido en las lecturas del sensor, debido a que en las lecturas al realizar el procesamiento de datos siempre oscilaron alrededor de 0 ppm en concentración volumétrica. La gran diferencia de magnitudes en los NO_x al comparar vehículos pesados con vehículos livianos y motos, evidencia la

predominancia de esta emisión en motores Diesel.

Las emisiones de PM en tractocamiones muestra un comportamiento coherente en las medianas, pero tras el análisis estadístico, no se puede asegurar que exista una diferencia significativa entre los rangos de agresividad; sin embargo, al evaluar los resultados normalizados, todos los eventos muestran diferencias significativas entre sí, como se puede ver en la figura 23. En buses y camiones pequeños, se tienen tendencias acertadas para PM en los diferentes rangos de agresividad, mientras que para camiones grandes existe un aumento significativo en agresividad media, pero una caída en agresividad alta, lo que no deja una tendencia clara del comportamiento de esta emisión en esta categoría (figura 24). En todas las motocicletas se presentan valores que, a pesar de ser muy bajos, se ajustan a la tendencia esperada en emisiones de PM , al igual que en vehículos livianos. En estos últimos, se puede observar que existen grupos de datos muy por encima de los demás, que corresponden a vehículos Diesel.

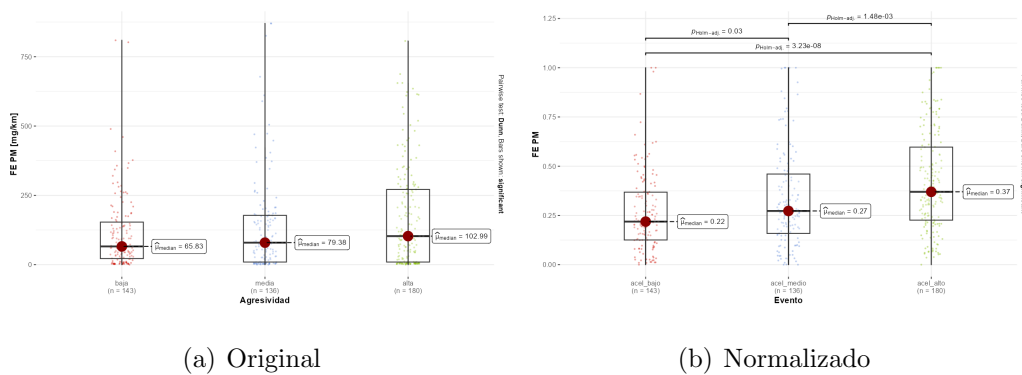


Fig. 23. PM Original y normalizado en tractocamiones.

Finalmente, en las emisiones de PN en eventos de aceleración para vehículos pesados se observa una dispersión de los resultados que no da indicios de ningún ajuste ni ninguna tendencia en ninguno de los rangos de agresividad, y tampoco existe diferencia significativa entre éstos. En vehículos livianos los datos se ajustan satisfactoriamente a la tendencia esperada, y también se evidencian grupos de datos por encima de los demás, correspondientes a vehículos Diesel. En las motocicletas resultan contradictorias las tendencias de las medidas en FECOC+ fase 3 con las medidas con el ciclo AMVA, pues mientras las primeras muestran una disminución al aumentar la agresividad, las otras siguen la tendencia contraria (figura

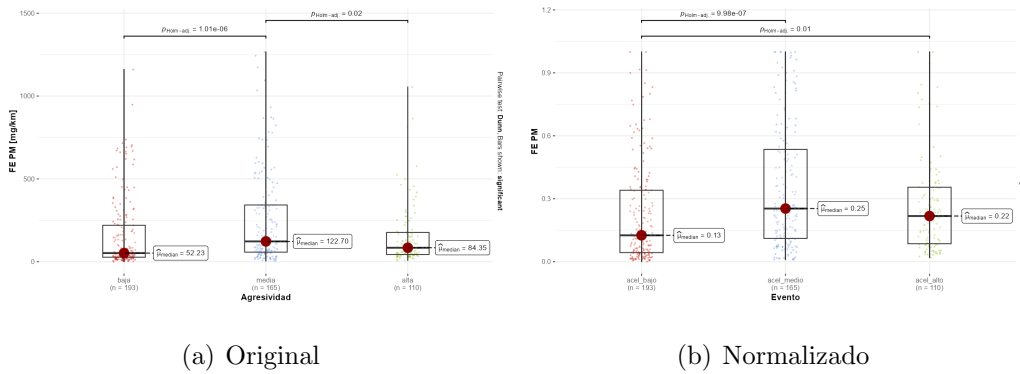


Fig. 24. *PM* real y normalizado en camiones grandes.

25). Sin embargo, a pesar de que las tendencias en las medianas se ven marcadas, no existe evidencia de diferencia significativa después del análisis estadístico en ninguno de los grupos de datos, ni siquiera después de normalizar.

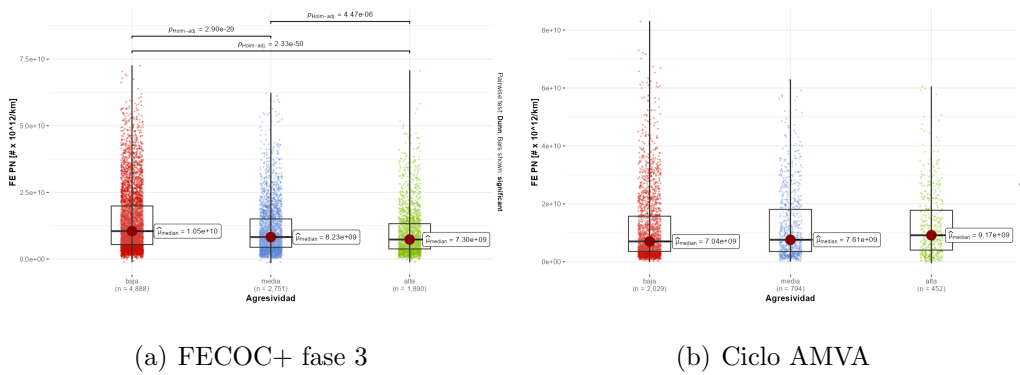


Fig. 25. *PN* en las 2 categorías de motocicletas.

En cuanto a los eventos de desaceleración, no se lograron identificar tendencias claras como las de la figura 17 con ninguno de los índices de agresividad probados. Solo un limitado número de pruebas pareció mostrar una correlación con el índice de agresividad seleccionado (ec. 11). Solo se lograron identificar resultados con diferencia apreciable visualmente cuando se trabajó con 2 rangos de agresividad, desaceleración alta y baja, respectivamente. Sin embargo, en los análisis estadísticos no se obtuvo ningún resultado concluyente, pero es posible sacar algunas conclusiones a partir de las gráficas y los resultados obtenidos.

En todos los vehículos pesados se observa una tendencia de que una mayor agresividad

en la desaceleración conlleva un menor consumo de combustible y por ende menores emisiones de CO_2 , mientras que para motocicletas y vehículos livianos pasa lo contrario, llegando a disminuir el rendimiento hasta en un 40 % para el caso de las motocicletas medidas en FECOC+ fase 3, lo cual llega a causar en ese caso particular las emisiones de CO_2 más altas entre todos los rangos del índice de agresividad, incluyendo aceleración y desaceleración. En la figura 26 se muestran los rendimientos de los vehículos pesados, y en la figura 27 se muestra el cambio en el rendimiento y en las emisiones de CO_2 en motos con el índice de agresividad.

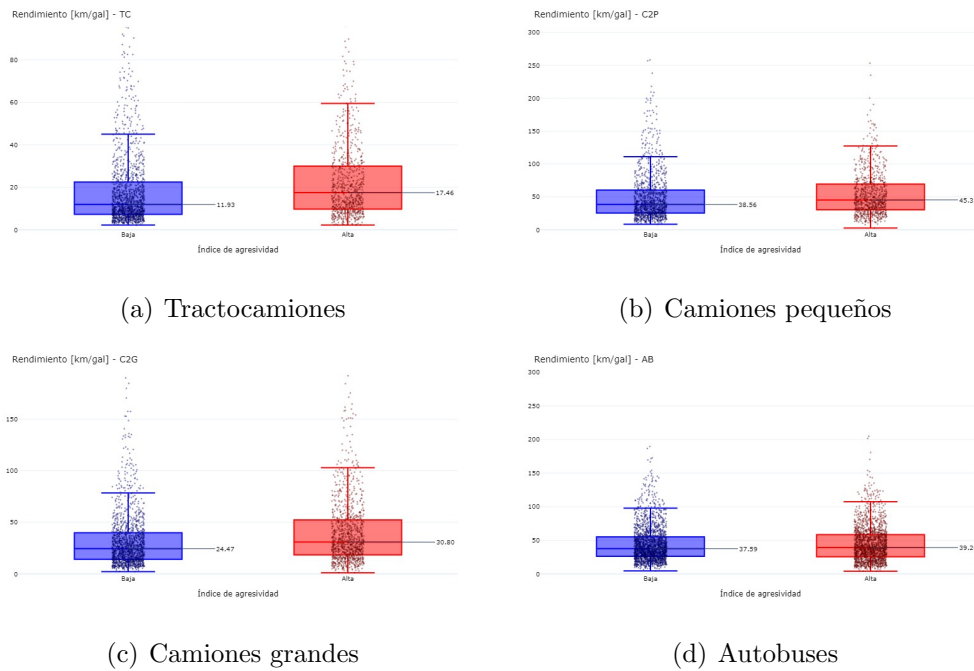


Fig. 26. Rendimiento de vehículos pesados en desaceleración.

Las emisiones de HC muestran un aumento con mayor agresividad para todas las categorías vehiculares. Los NO_x muestran comportamientos muy parecidos en ambos rangos de agresividad, en algunos casos son ligeramente menores y en otros mayores en agresividad baja, pero no parecen seguir una tendencia marcada. En cuanto a las emisiones de CO , se nota un aumento de estas en agresividad baja para tractocamiones y camiones grandes y pequeños, mientras que para las demás categorías se comportan al contrario; en motocicletas y vehículos livianos se observa una dispersión muy alta y no parece haber diferencia significativa entre ambos rangos.

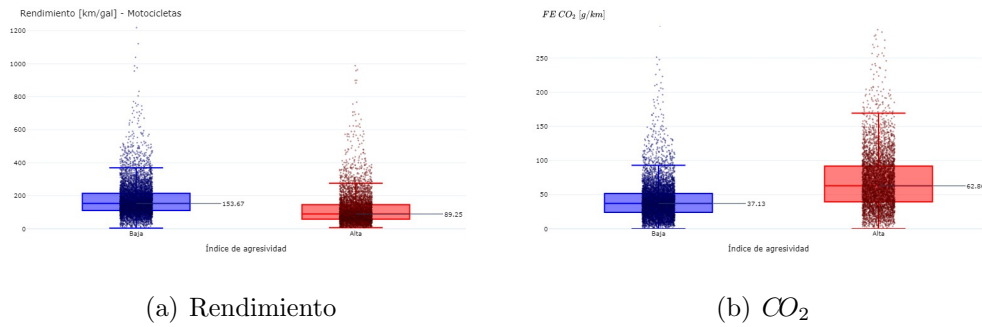


Fig. 27. Efecto de la agresividad en desaceleración en el rendimiento en motocicletas.

Las emisiones de *PM*, tienden a aumentar con la agresividad en la desaceleración en todas las categorías, a excepción de los camiones grandes, donde existe una dispersión muy alta de los datos en agresividad baja, y en autobuses, donde los resultados para ambos rangos de agresividad son muy similares entre sí (figura 28). Finalmente, el número de partículas en todas las categorías vehiculares muestra una disminución marcada con el aumento de la agresividad en la desaceleración, y también muy notablemente con respecto a los eventos de aceleración.

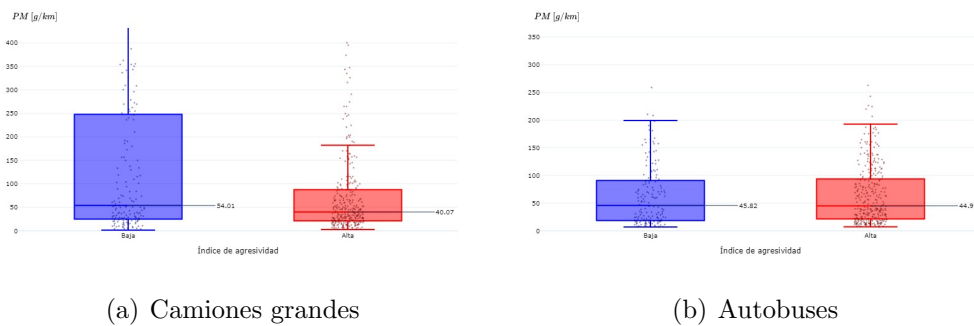


Fig. 28. *PM* en desaceleración en camiones grandes y autobuses.

Para concluir, al comparar los resultados de cada evento con los factores de emisión y el rendimiento calculados para todo el ciclo de conducción, se puede evidenciar que los rendimientos y las emisiones de *CO₂* finales siempre están más cercanas a los resultados de la agresividad baja en la aceleración, mientras que las demás emisiones casi siempre están muy por encima del factor de emisión final en agresividades media y alta, contribuyendo altamente a que su resultado aumente, demostrando la importancia de una conducción poco agresiva,

no solo en la economía de combustible, sino también en el cuidado del medio ambiente y en la disminución de la contaminación del aire por parte del transporte terrestre.

A manera de ejemplo, es la figura 29 se presentan los resultados de consumo de combustible para los tractocamiones, donde se tienen un total de 1117 eventos de agresividad baja, 799 de agresividad media y 600 de agresividad alta, lo que suma un tiempo total de 16 horas, 14.5 horas y 14 horas, respectivamente. Un 24% de los eventos de aceleración en los tractocamiones son eventos de agresividad alta, o, visto de otra forma, un 33% del tiempo que los vehículos aceleran. Si se pudiera disminuir a la mitad este total, transformando estos eventos de agresividad alta en agresividad baja, con cambios más controlados y eficientes en la velocidad, es posible llegar a un aumento del 6% en el rendimiento, así como una disminución del 7% en las emisiones de CO_2 y NOx .

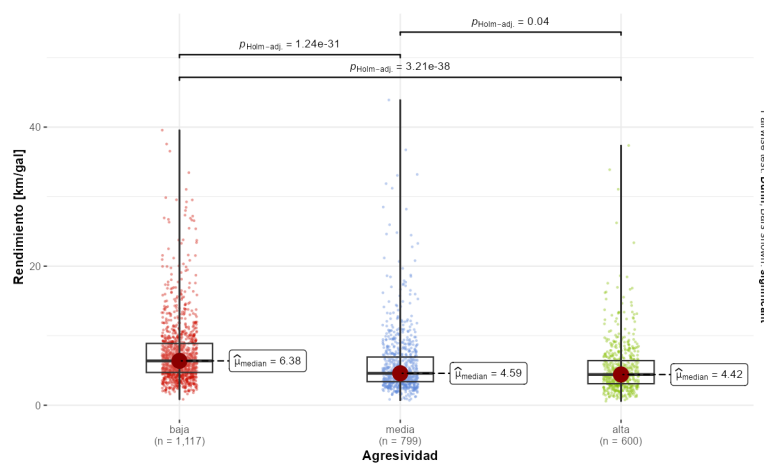


Fig. 29. Cantidad de eventos de aceleración en tractocamiones

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se partió de los datos obtenidos en los proyectos FECOC+ para estudiar el efecto de los eventos dinámicos de conducción característicos de las diferentes categorías vehiculares en Colombia en las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Para esto fue necesario realizar un procesamiento de los datos, que a partir de un proceso riguroso de sincronización, unificación y organización, logró reunir todas las diferentes mediciones realizadas y obtener a partir de éstas, datos precisos y confiables para cumplir con el objetivo del trabajo.

En primer lugar, se realizó una refinación al proceso de sincronización utilizado en las fases 2 y 3 de FECOC+. Con las observaciones, problemas de implementación y resultados obtenidos se puede concluir que:

- A pesar de que no existan diferencias visuales muy marcadas entre los métodos de sincronización implementados, al evaluar la correlación de éstos con la señal de referencia, y luego observar el cambio en los resultados finales, resulta evidente la necesidad de un proceso riguroso de sincronización de los datos de las mediciones.
- El método de sincronización dinámico propone la metodología más rigurosa para explicar y tratar la forma en la que se generan los desfases en la medición. Sin embargo, al ser tan estricto, presentar simplificaciones que no se adapten totalmente a las condiciones reales causa que sus resultados finales tengan una correlación baja con la señal de referencia, por lo que su confiabilidad final en este trabajo es muy baja.
- La sincronización por desfase estático partiendo de la sincronización por eventos es un método muy simple, pero que llega a mostrar una mejora significativa en la correlación de las señales con la señal de referencia, obteniendo resultados más confiables en cálculos posteriores.

En segundo lugar, con el algoritmo de sincronización listo para ser implementado en todas las pruebas, se procedió a realizar la unificación de todos los datos de todas las categorías vehiculares medidas en los diferentes proyectos en una sola base de datos.

- Sin importar las diferencias en la forma en la que se realizaron las distintas mediciones y la utilización de diferentes equipos de medición, se logró unificar las variables medidas en las mismas unidades y las mismas frecuencias de medición.
- La disposición de todos los datos en una estructura organizada facilita en gran medida su acceso, su legibilidad y garantiza el orden y la uniformidad de los resultados

Por último, se realizó la separación de los datos instantáneos por eventos de conducción, permitiendo observar los comportamientos de los flujos de combustible y de contaminantes durante cada uno de éstos, así como estudiar más a fondo, con la ayuda de variables dinámicas otras subclasificaciones basadas en la agresividad de cada evento, permitiendo llegar a las siguientes conclusiones:

- La exploración de los flujos máxicos llegó a los resultados esperados, mostrando un mayor consumo de combustible y mayores masas de contaminantes en eventos de aceleración, seguidos de desaceleración y por último ralentí. Con respecto a los resultados de los proyectos FECOC+, solo hay diferencias pequeñas en las magnitudes debidas a la refinación de la sincronización.
- El índice de agresividad encontrado demuestra que las emisiones contaminantes y el rendimiento se pueden caracterizar en función de las variables dinámicas de operación que se dan en la conducción, mostrando tendencias muy acertadas en la mayoría de casos.
- Se obtienen resultados contundentes en cuando al aumento del consumo de combustible y las emisiones de CO_2 , así como de otros gases contaminantes al aumentar la agresividad en la conducción. Por otro lado, no se obtienen tendencias claras en cuanto a emisiones de material particulado, ni en masa ni en número.
- Se identifica el potencial de la reducción de emisiones contaminantes al practicar una conducción menos agresiva, exigiendo menos energía al motor, que a su vez la obtiene de la combustión del combustible, y que se puede llegar a desperdiciar muy fácilmente si se disipa mediante frenadas súbitas, sin aprovechar otras variables en la conducción, como las pendientes, la fricción o la aerodinámica.
- Comparando sólo los factores de emisión totales de todo el ciclo, las motocicletas medidas con ciclo AMVA muestran un mejor comportamiento siempre en cuanto a rendimiento y

emisiones que las que se midieron en la fase 3 de FECOC+. Sin embargo, al analizar por eventos de conducción, los resultados obtenidos son muy similares, y se destaca especialmente que en el ciclo AMVA hay mayor presencia de eventos de agresividad baja, lo cual comprueba la validez del análisis de agresividad realizado.

VIII. RECOMENDACIONES

Debido a los resultados inesperados o poco concluyentes presentados en algunas secciones específicas de este trabajo, se proponen las siguiente líneas de investigación para futuros trabajos:

- Mejora del algoritmo de sincronización dinámica basada en variables medidas de cada vehículo.
- Estudio del efecto de la agresividad en la conducción en las emisiones de material particulado.
- Inclusión de otras variables dinámicas de operación, como por ejemplo las revoluciones del motor en la cuantificación de la agresividad.
- Análisis detallado de la formación de contaminantes en la combustión debido a variables dinámicas de operación del motor.

REFERENCIAS

- [1] “CALIDAD DEL AIRE - IDEAM.” [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
- [2] “IPCC Updated Methodology for Greenhouse Gas Inventories.” [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/>
- [3] UdeA and 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.
- [4] UdeA and 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.
- [5] UdeA and UPME, “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.
- [6] UdeA and UPME, “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] IPCC, “AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change,” Intergovernmental Panel on Climate Change, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [8] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Overview of Greenhouse Gases,” 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>

-
- [9] M. Kanoğlu and Y. A. Çengel, “Energy and the Environment,” in *Energy Efficiency and Management for Engineers*, 1st ed. McGraw-Hill Education, 2020.
- [10] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen - Health Criteria,” 2015. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-oxides-nitrogen-health-criteria>
- [11] Empresa Colombiana de Petroleos (ECOPETROL), “Calidad de combustibles,” 2022. [Online]. Available: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/aire-limpio/calidad-combustibles>
- [12] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Setting and Reviewing Standards to Control SO₂ Pollution,” 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/so2-pollution/setting-and-reviewing-standards-control-so2-pollution>
- [13] J. B. Heywood, “HYDROCARBON EMISSIONS,” in *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [14] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Particulate Matter (PM) Pollution,” Mar. 2016. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution>
- [15] H. Joshi, “Standby Diesel Generators,” in *Residential, Commercial and Industrial Electrical Systems: Equipment and Selection*, volume 1 edition ed. New York: McGraw-Hill Education, 2008. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070620964/chapter/chapter20>
- [16] J. Restrepo, “*Efectos de la sincronización de señales en la determinación del desempeño ambiental de vehículos mediante pruebas en carretera*,” Master’s thesis, Universidad EA-FIT, 2023.
- [17] 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>

-
- [18] D. D. Dylis, “OVERVIEW OF ELECTRONIC COMPONENT RELIABILITY,” in *Electronic Failure Analysis Handbook: Techniques and Applications for Electronic and Electrical Packages, Components, and Assemblies*, 1st ed., P. L. Martin, Ed. New York: McGraw-Hill Education, 1999.
- [19] B. M. Bidanda, “APPLIED HYPOTHESIS TESTS,” in *Maynard’s Industrial and Systems Engineering Handbook*, 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2023. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260461565/toc-chapter/chapter34/section/section15>
- [20] Scikit-Learn, “KMeans.” [Online]. Available: <https://scikit-learn/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>
- [21] D. J. Ketchen Jr and C. L. Shook, “The application of cluster analysis in marketing: A review,” *Journal of Marketing*, vol. 21, no. 2, pp. 233–244, 1996.

ANEXOS

Anexo A. Resultados de flujos máxicos

En las tablas V, VI y VII se presentan las medianas de los flujos máxicos de todas las categorías en ralenti, aceleración y desaceleración, respectivamente.

TABLA V
FLUJOS MÁXICOS EN RALENTÍ

Categoría	Consumo [g/s]	CO ₂ [g/s]	CO [g/s]	NO [g/s]	NO ₂ [g/s]	HC [g/s]	PM [g/s]	PN [#s]
Tractocamiones	0.6099	1.8014	0.0057	0.0178	0.0025	0.0020	0.1199	2.89e+11
Camiones pequeños	0.2081	0.5507	0.0053	0.0029	0.0011	0.0039	0.0472	1.28e+11
Camiones grandes	0.3447	1.0429	0.0080	0.0078	0.0019	0.0008	0.1184	1.80e+11
Autobuses	0.2083	0.6092	0.0044	0.0037	0.00083	0.0013	0.0479	1.05e+11
Vehículos livianos	0.2610	0.8465	0.0031	6.84e-5	1.92e-6	0.0003	0.0016	7.30e+9
Motocicletas	0.0598	0.1579	0.0045	6.44e-5	9.73e-7	0.0007	0.0008	3.41e+9
Motocicletas AMVA	0.0357	0.0779	0.0028	1.76e-5	9.49e-7	0.0003	0.0004	1.79e+9

TABLA VI
FLUJOS MÁXICOS EN ACELERACIÓN

Categoría	Consumo [g/s]	CO ₂ [g/s]	CO [g/s]	NO [g/s]	NO ₂ [g/s]	HC [g/s]	PM [g/s]	PN [#s]
Tractocamiones	3.3784	9.8354	0.0394	0.0572	0.0047	0.0040	0.3585	1.07e+12
Camiones pequeños	0.8734	2.6829	0.0152	0.0137	0.0030	0.0211	0.3615	3.70e+11
Camiones grandes	2.0783	6.0089	0.0350	0.0368	0.0040	0.0026	0.4890	8.92e+11
Autobuses	0.8537	2.5197	0.0133	0.0133	0.0019	0.0169	0.2789	3.40e+11
Vehículos livianos	0.6176	2.0072	0.0085	0.0003	4.75e-6	0.0006	0.0038	1.68e+10
Motocicletas	0.1382	0.3177	0.0172	0.0003	1.71e-6	0.0018	0.0022	8.83e+9
Motocicletas AMVA	0.1407	0.3004	0.0271	0.0003	3.08e-6	0.0010	0.0020	7.75e+9

TABLA VII
FLUJOS MÁSICOS EN DESACELERACIÓN

Categoría	Consumo [g/s]	CO ₂ [g/s]	CO [g/s]	NO [g/s]	NO ₂ [g/s]	HC [g/s]	PM [g/s]	PN [# /s]
Tractocamiones	1.0208	2.9992	0.0164	0.0291	0.0028	0.0027	0.2302	6.02e+11
Camiones pequeños	0.3833	1.1616	0.0102	0.0062	0.0021	0.0143	0.1784	2.55e+11
Camiones grandes	0.5928	1.6830	0.0236	0.0129	0.0022	0.0018	0.1594	4.99e+11
Autobuses	0.3702	1.0866	0.0097	0.0073	0.0018	0.0123	0.2062	2.66e+11
Vehículos livianos	0.3751	1.2323	0.0052	0.0002	2.85e-6	0.0004	0.0023	1.05e+10
Motocicletas	0.1234	0.3080	0.0161	0.0003	1.67e-6	0.0017	0.0021	8.52e+9
Motocicletas AMVA	0.0994	0.2170	0.0138	9.88e-5	2.19e-6	0.0006	0.0012	4.29e+9

Anexo B. Resultados de índice de agresividad

Se presentan todos los resultados obtenidos al clasificar los eventos de conducción según rangos del índice de agresividad propuesto (ec. 11), además de los resultados del análisis estadístico.

En las figuras 30 y 37 y en la tabla VIII se muestran los resultados para los tractocamiones. En las figuras 31 y 38 y en la tabla IX se muestran los resultados para los camiones pequeños. En las figuras 32 y 39 y en la tabla X se muestran los resultados para los camiones grandes. En las figuras 33 y 40 y en la tabla XI se muestran los resultados para los autobuses. En las figuras 34 y 41 y en la tabla XII se muestran los resultados para los vehículos livianos. En las figuras 35 y 42 y en la tabla XIII se muestran los resultados para motocicletas. En las figuras 36 y 43 y en la tabla XIV se muestran los resultados para motocicletas medidas con ciclo AMVA.

TABLA VIII
RESULTADOS PARA TRACTOCAMIONES POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹² /km]
Baja - Aceleración	6.38	1461.64	5.49	11.49	0.53	0.40	65.83	1.17
Media - Aceleración	4.59	1998.02	7.86	13.78	0.82	0.91	79.38	1.27
Alta - Aceleración	4.42	1999.47	6.19	14.51	1.10	1.37	102.99	0.68
Baja - Desaceleración	11.93	702.38	3.03	7.02	0.38	0.47	41.50	0.79
Alta - Desaceleración	17.46	471.83	2.49	4.5	0.41	0.75	56.33	0.30
Total del ciclo	6.52	1486.84	5.93	12.66	0.93	0.61	81.48	1.14

TABLA IX
RESULTADOS PARA CAMIONES PEQUEÑOS POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹² /km]
Baja - Aceleración	22.26	425.69	2.24	2.31	0.50	3.03	46.78	0.39
Media - Aceleración	19.18	522.09	3.09	2.79	0.51	4.45	70.50	0.35
Alta - Aceleración	18.40	598.62	4.62	3.16	0.71	7.19	157.32	0.36
Baja - Desaceleración	38.56	245.06	1.98	1.32	0.36	2.27	29.17	0.28
Alta - Desaceleración	45.33	201.78	1.75	1.17	0.37	2.95	33.97	0.21
Total del ciclo	22.84	419.97	3.55	2.29	0.61	4.36	159.85	0.73

TABLA X
RESULTADOS PARA CAMIONES GRANDES POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹⁰ /km]
Baja - Aceleración	10.15	923.97	5.39	5.61	0.64	0.35	52.23	0.92
Media - Aceleración	7.40	1266.08	6.42	7.25	0.75	0.52	122.70	0.71
Alta - Aceleración	6.48	1316.77	6.98	7.45	0.81	0.60	84.35	0.80
Baja - Desaceleración	24.47	341.66	4.47	2.38	0.44	0.3	54.01	0.58
Alta - Desaceleración	30.8	264.39	3.34	2.08	0.36	0.45	40.07	0.37
Total del ciclo	10.90	891.22	8.56	5.21	0.73	0.39	277.75	1.30

TABLA XI
RESULTADOS PARA AUTOBUSES POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹⁰ /km]
Baja - Aceleración	21.14	444.16	2.04	2.41	0.37	2.79	45.23	0.35
Media - Aceleración	16.43	560.69	2.70	2.90	0.29	2.85	45.32	0.34
Alta - Aceleración	14.48	643.37	3.70	3.04	0.51	8.38	101.46	0.34
Baja - Desaceleración	37.59	230.64	1.85	1.49	0.28	1.91	45.82	0.26
Alta - Desaceleración	39.2	228.76	2.04	1.46	0.41	3.22	44.99	0.26
Total del ciclo	21.60	443.62	3.15	2.91	0.42	3.73	79.47	0.71

TABLA XII
RESULTADOS PARA VEHÍCULOS LIVIANOS POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹⁰ /km]
Baja - Aceleración	30.39	280.40	1.10	0.04	0.0006	0.08	0.51	1.64
Media - Aceleración	20.02	418.85	1.65	0.05	0.0009	0.11	0.77	1.69
Alta - Aceleración	15.44	546.04	1.80	0.05	0.001	0.17	1.08	1.87
Baja - Desaceleración	39.0	208.67	0.81	0.03	0.00	0.06	0.39	1.16
Alta - Desaceleración	35.23	224.25	0.87	0.02	0.00	0.07	0.44	0.90
Total del ciclo	29.29	310.90	2.16	0.08	0.0007	0.11	0.63	1.71

TABLA XIII
RESULTADOS PARA MOTOCICLETAS POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹⁰ /km]
Baja - Aceleración	161.50	36.47	2.39	0.04	0.0002	0.19	0.29	1.05
Media - Aceleración	110.48	49.89	2.76	0.04	0.0003	0.30	0.33	0.82
Alta - Aceleración	94.38	57.05	2.70	0.05	0.0003	0.34	0.34	0.73
Baja - Desaceleración	153.67	37.13	2.29	0.03	0.00	0.19	0.27	0.90
Alta - Desaceleración	89.25	62.86	3.07	0.05	0.00	0.39	0.42	0.71
Total del ciclo	138.00	46.31	3.51	0.04	0.0003	0.24	0.41	0.90

TABLA XIV
RESULTADOS PARA MOTOCICLETAS CON CICLO AMVA POR RANGOS DE AGRESIVIDAD.

Agresividad	Rendimiento [km/gal]	FE CO ₂ [g/km]	FE CO [g/km]	FE NO [g/km]	FE NO ₂ [g/km]	FE HC [g/km]	FE PM [mg/km]	FE PN [# x 10 ¹⁰ /km]
Baja - Aceleración	137.15	40.84	3.53	0.03	0.0004	0.12	0.25	0.70
Media - Aceleración	101.98	51.27	5.68	0.05	0.0006	0.21	0.37	0.76
Alta - Aceleración	89.43	56.63	6.73	0.04	0.0005	0.21	0.38	0.92
Baja - Desaceleración	164.03	34.02	2.26	0.02	0.00	0.08	0.17	0.44
Alta - Desaceleración	120.08	37.04	2.30	0.01	0.00	0.12	0.19	0.30
Total del ciclo	166.96	39.78	3.87	0.04	0.0004	0.13	0.15	0.78

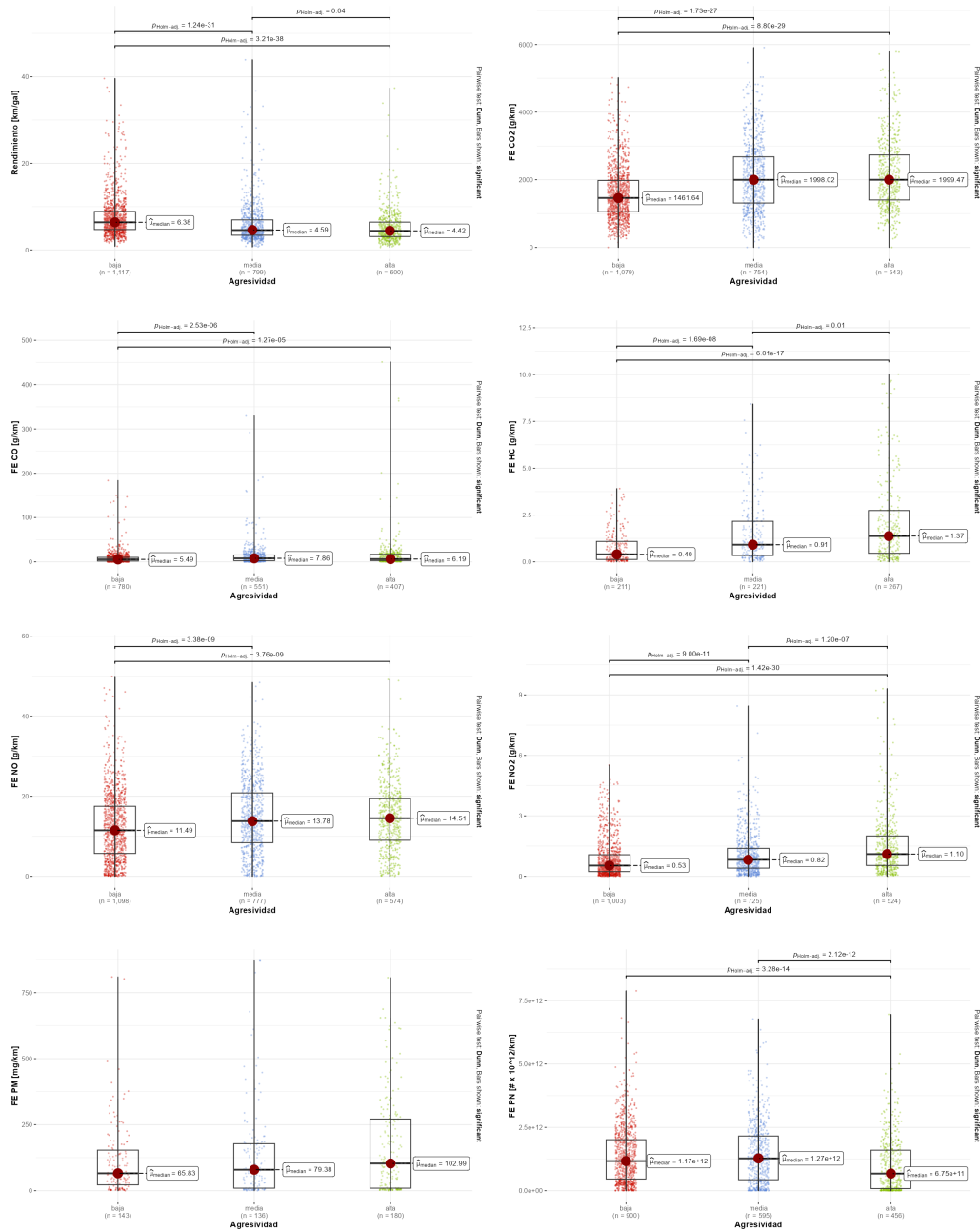


Fig. 30. Resultados para tractocamiones en aceleración.

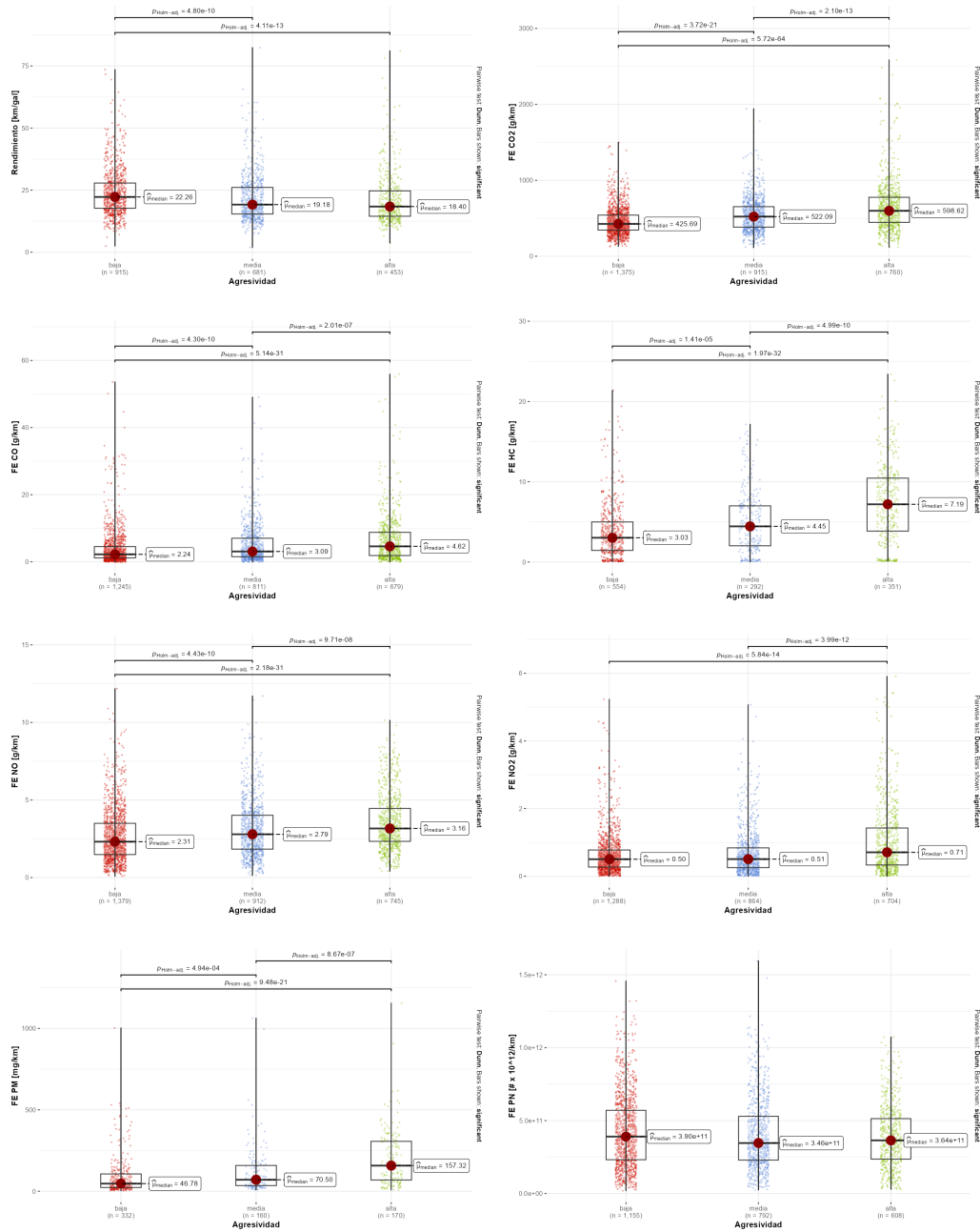


Fig. 31. Resultados para camiones pequeños en aceleración.

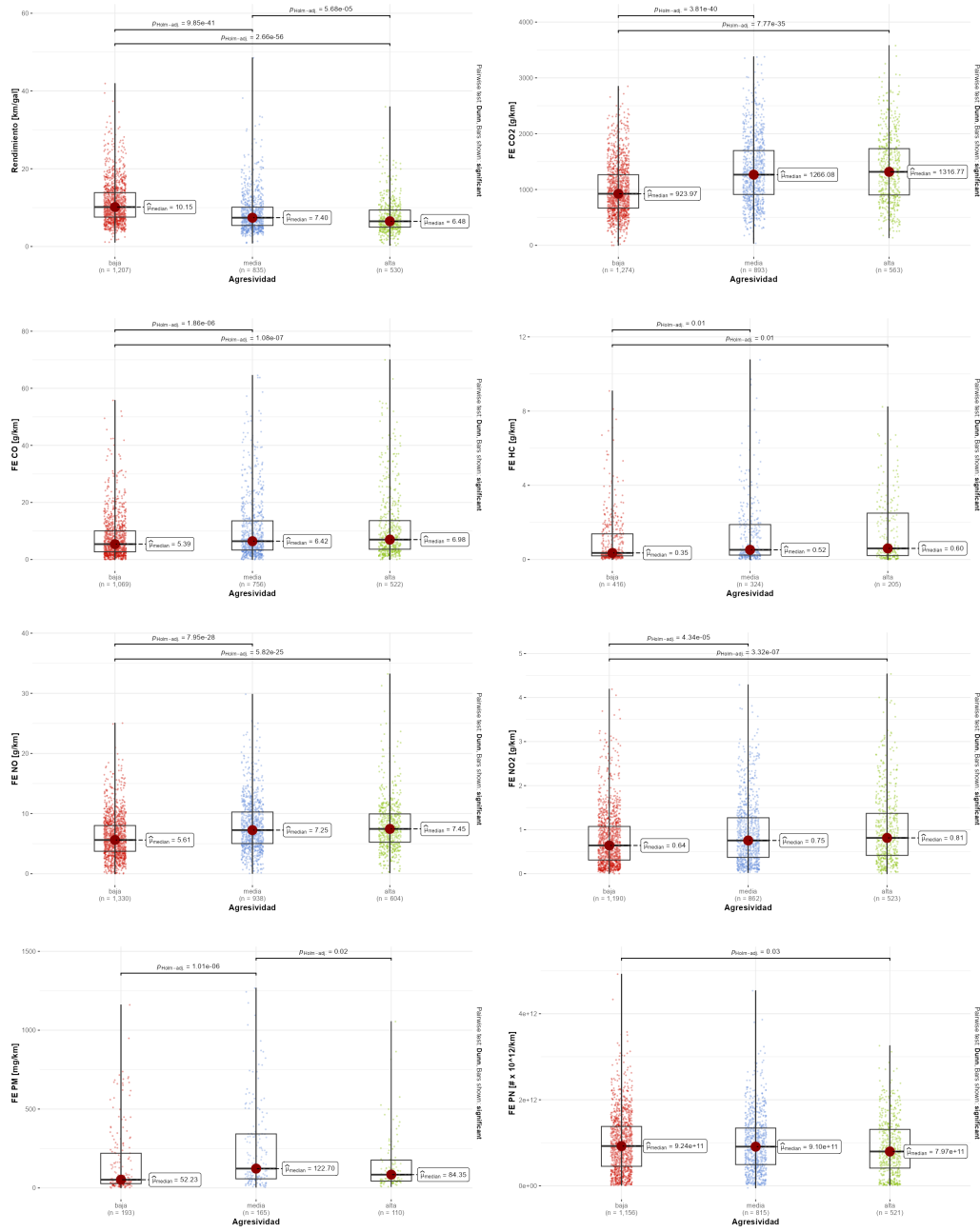


Fig. 32. Resultados para camiones grandes en aceleración.

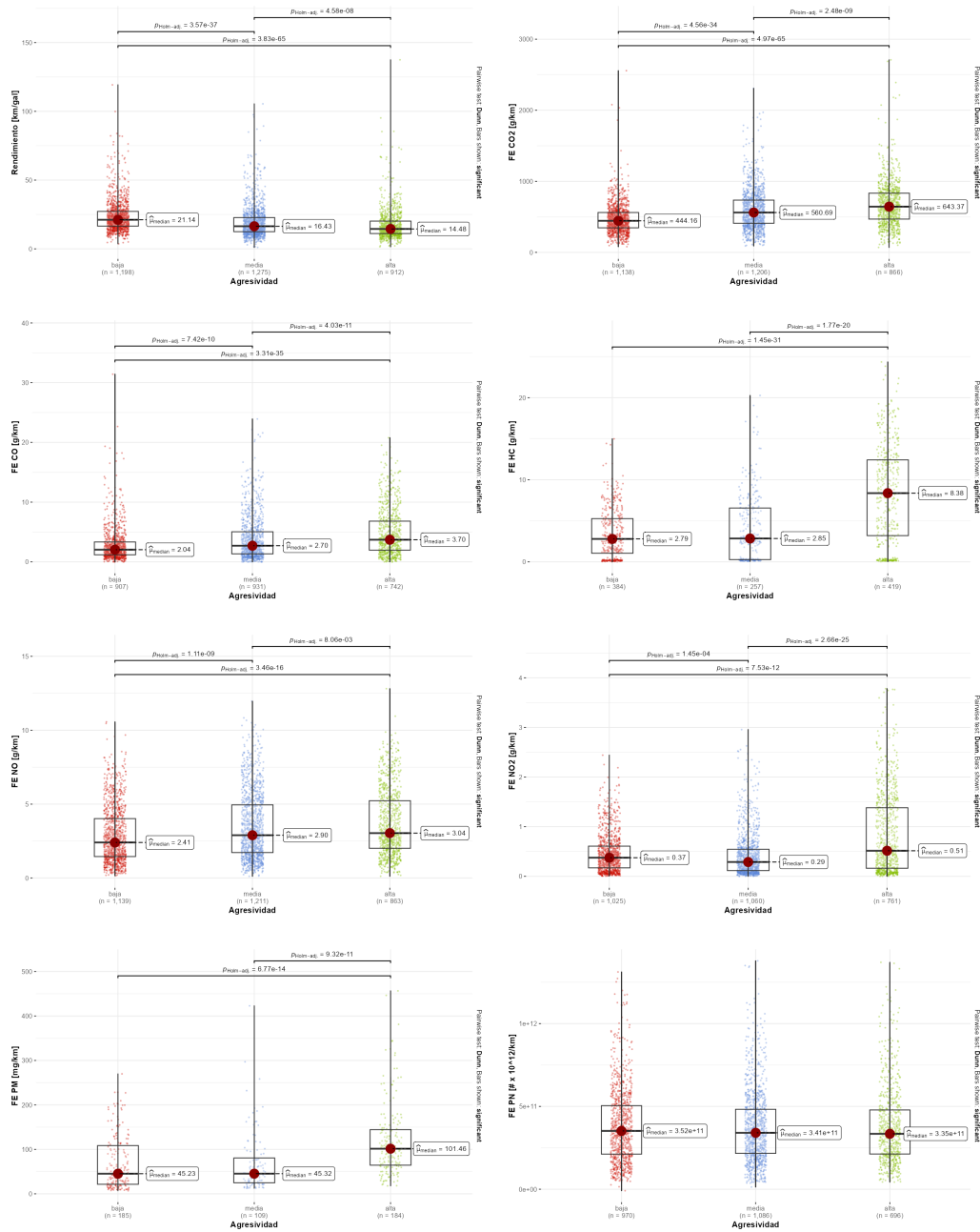


Fig. 33. Resultados para autobuses en aceleración.

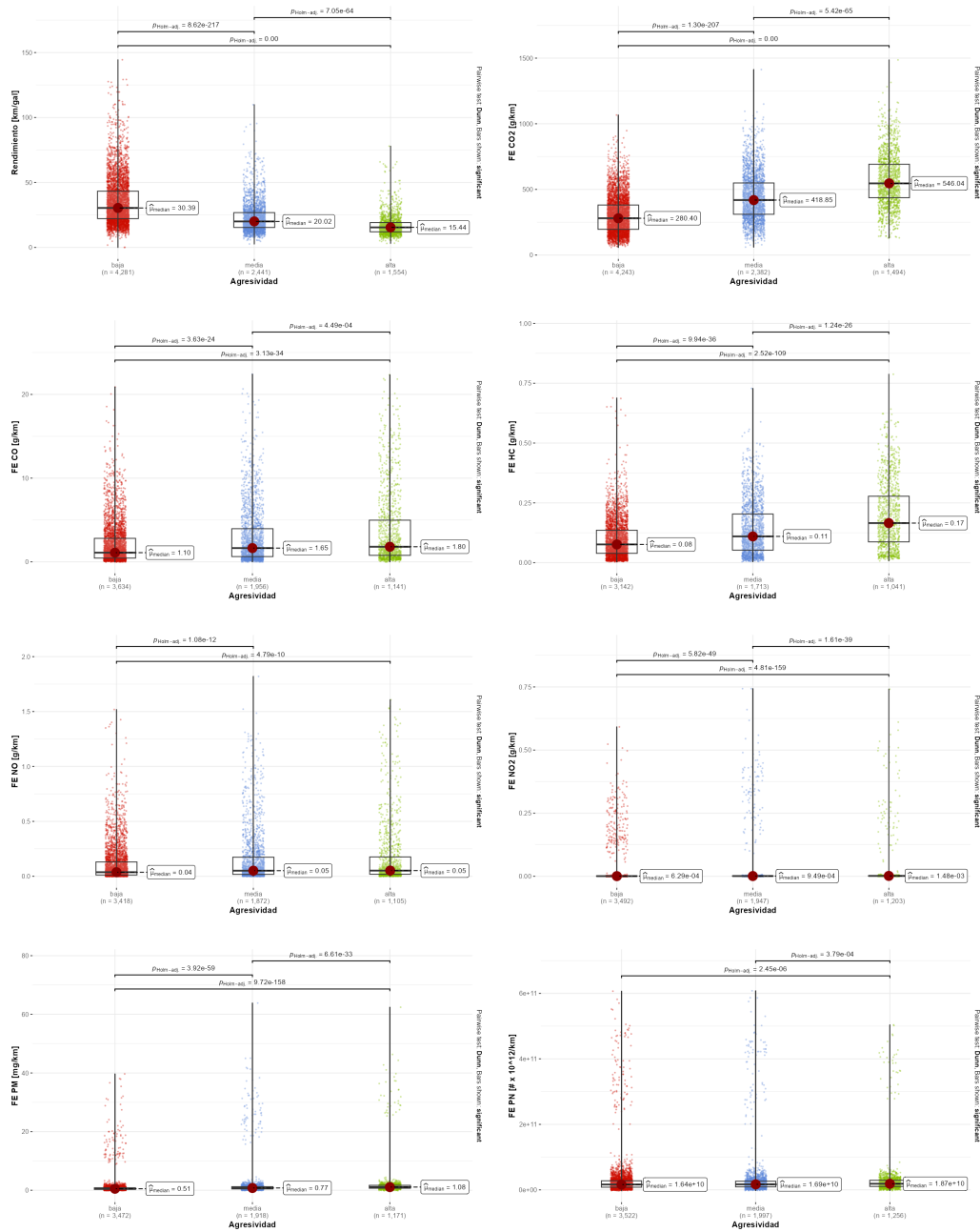


Fig. 34. Resultados para vehículos livianos en aceleración.

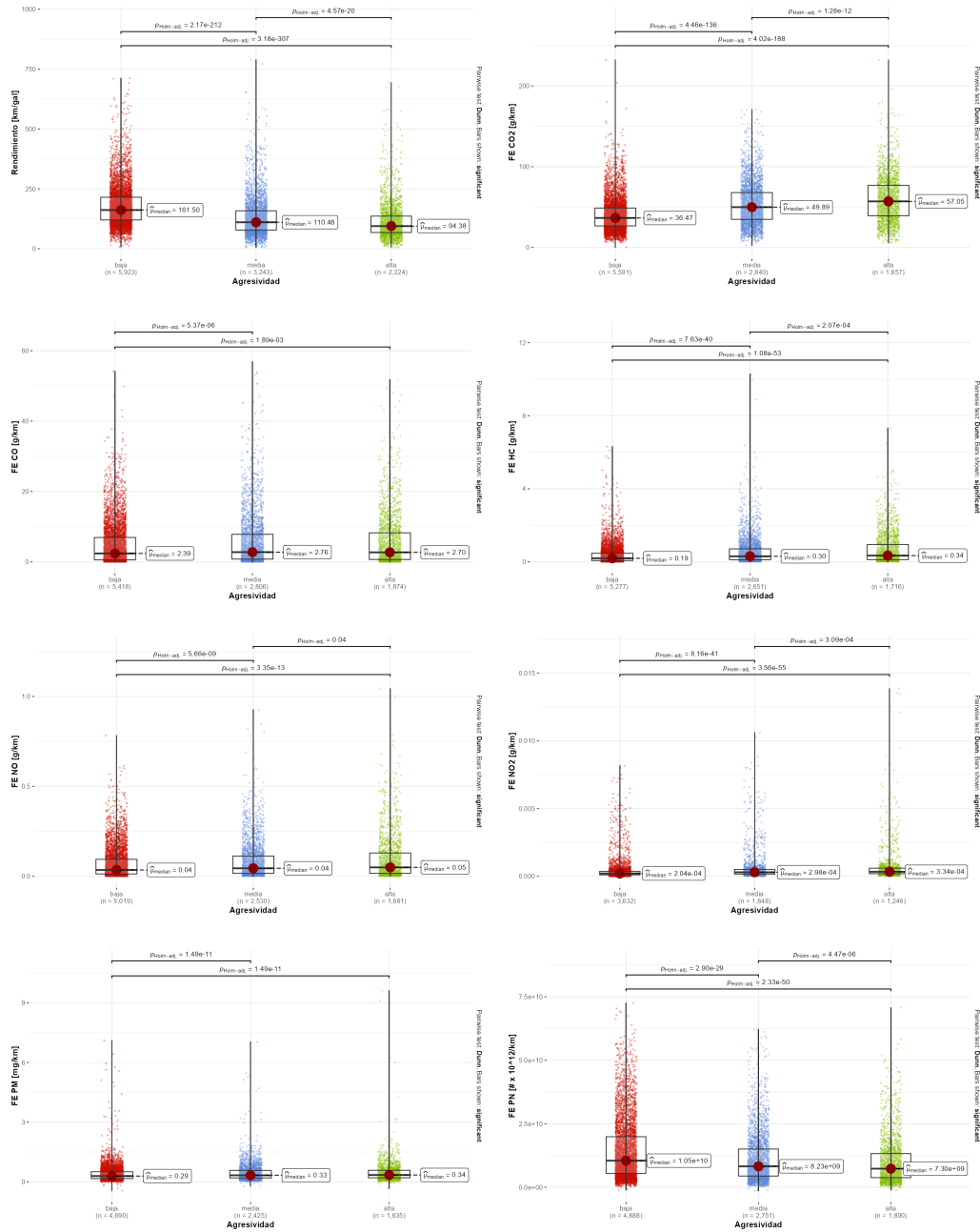


Fig. 35. Resultados para motocicletas en aceleración.

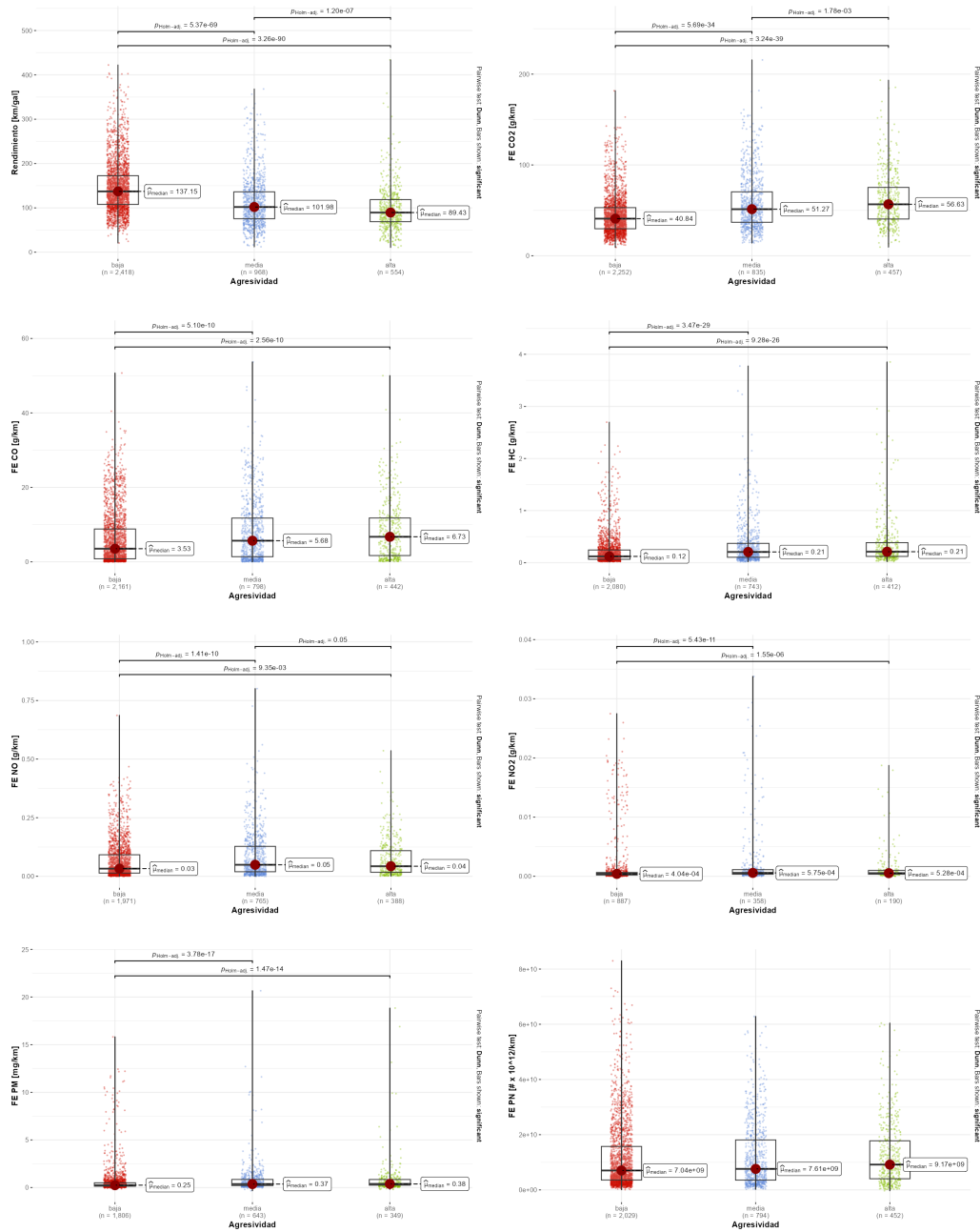


Fig. 36. Resultados para motocicletas con ciclo AMVA. en aceleración

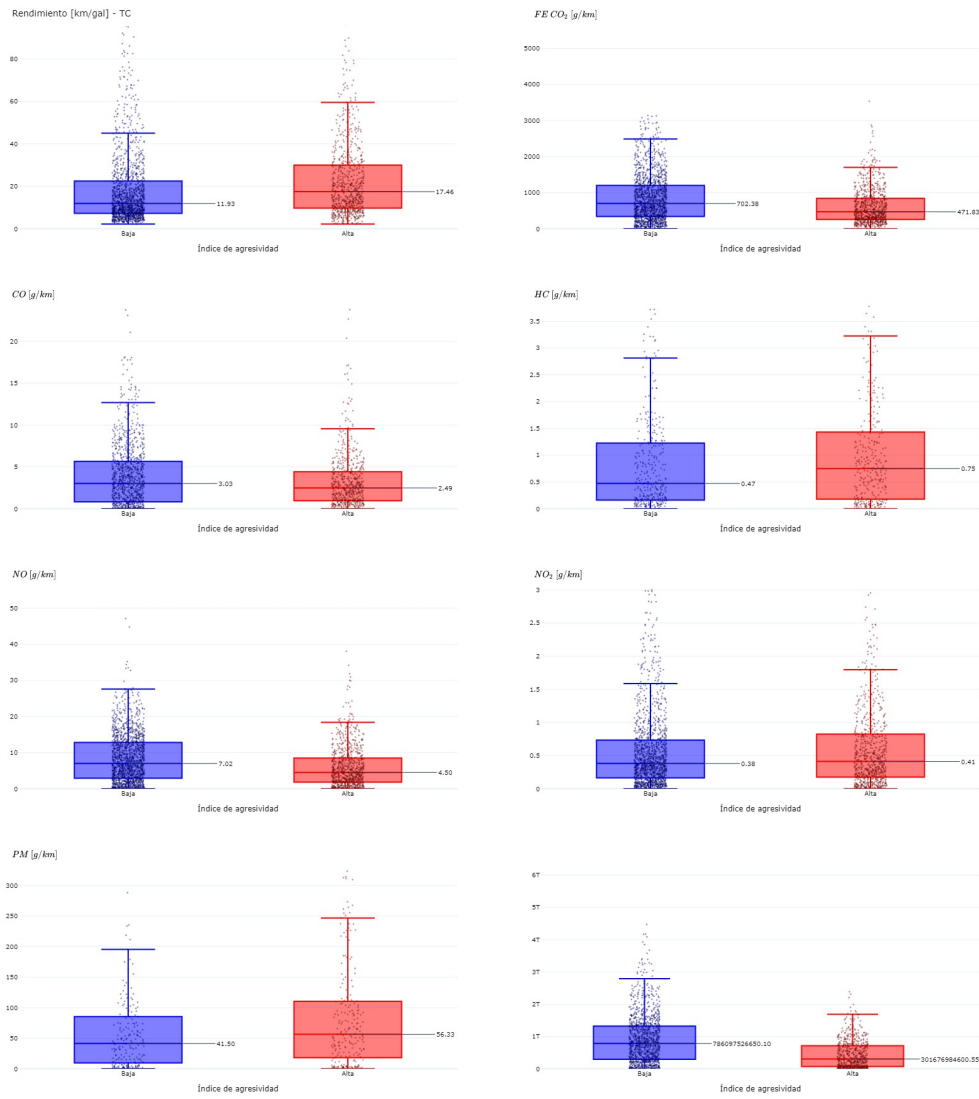


Fig. 37. Resultados para tractocamiones en desaceleración

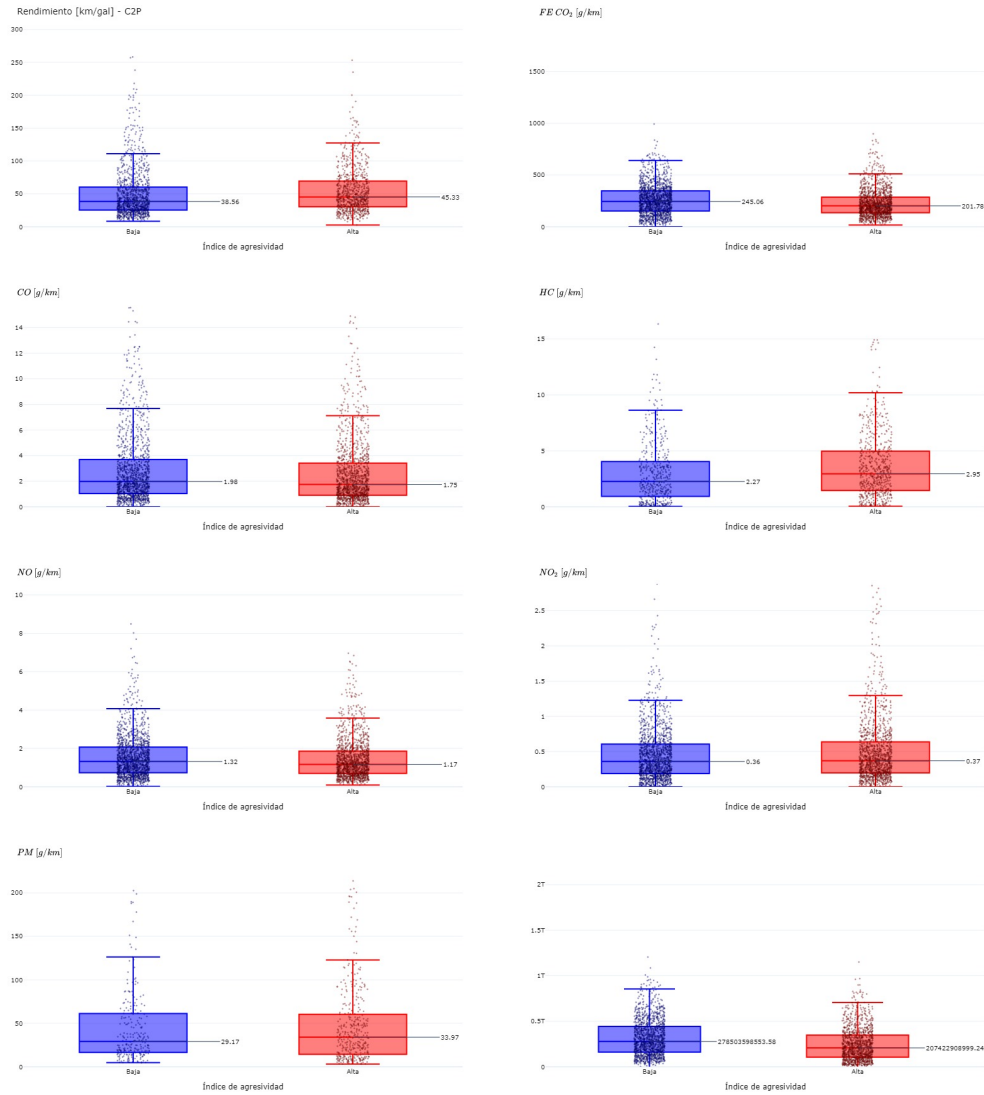


Fig. 38. Resultados para camiones pequeños en desaceleración

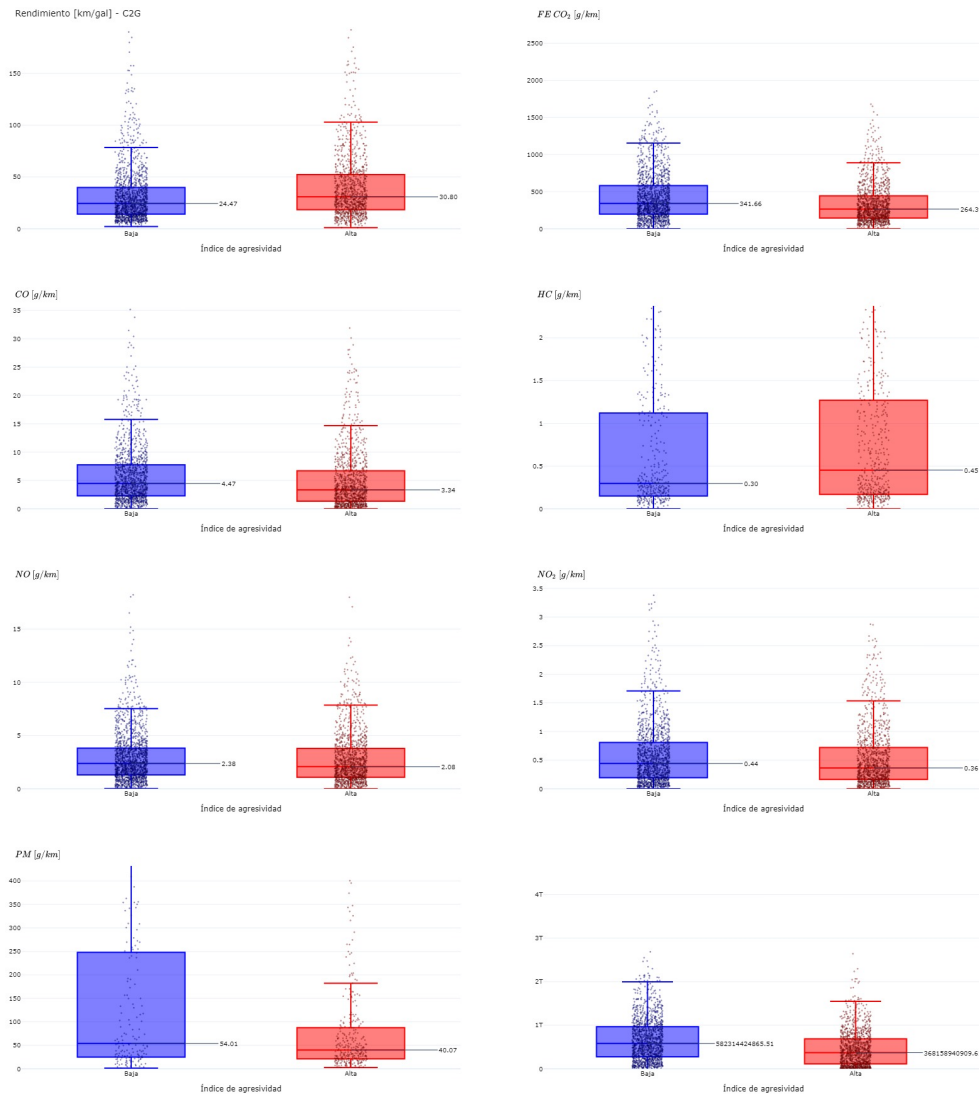


Fig. 39. Resultados para camiones grandes en desaceleración

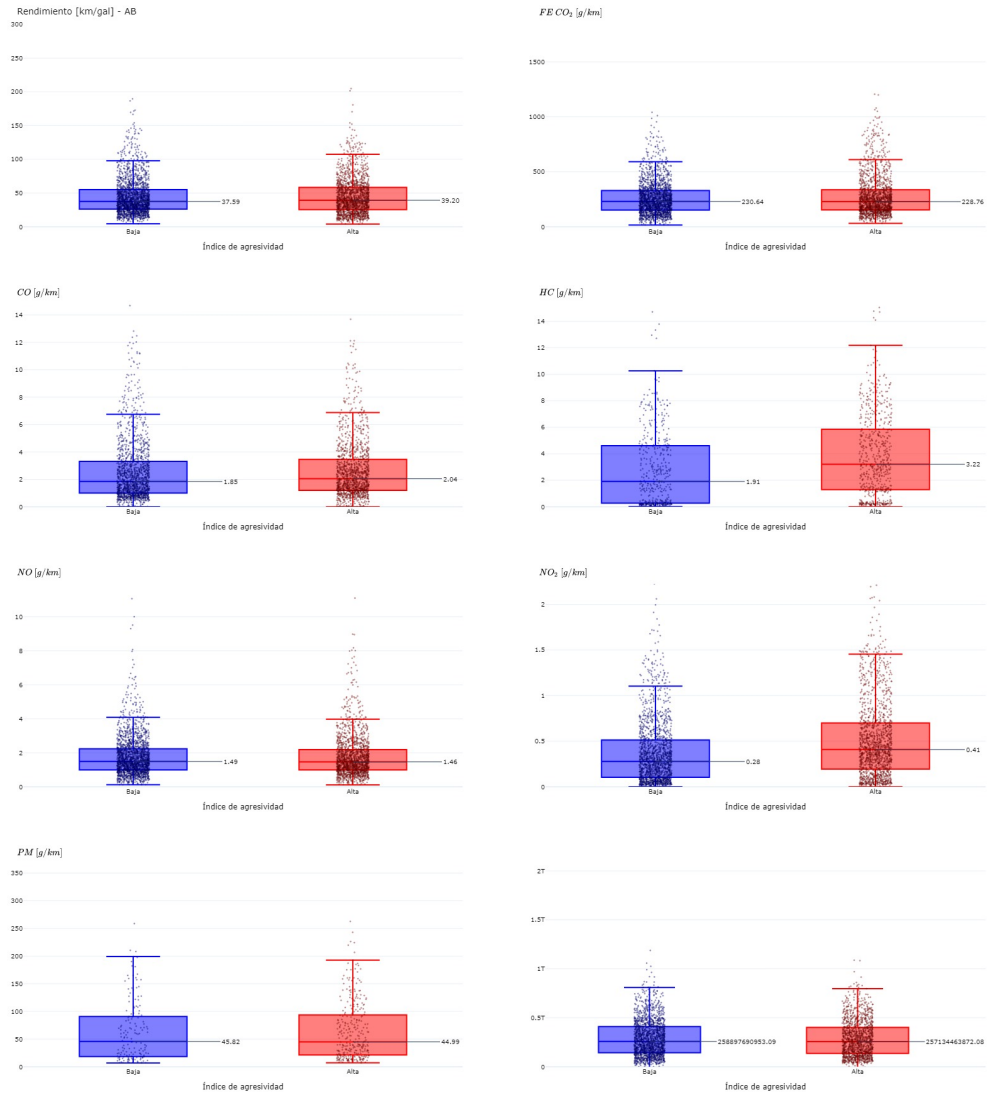


Fig. 40. Resultados para autobuses en desaceleración

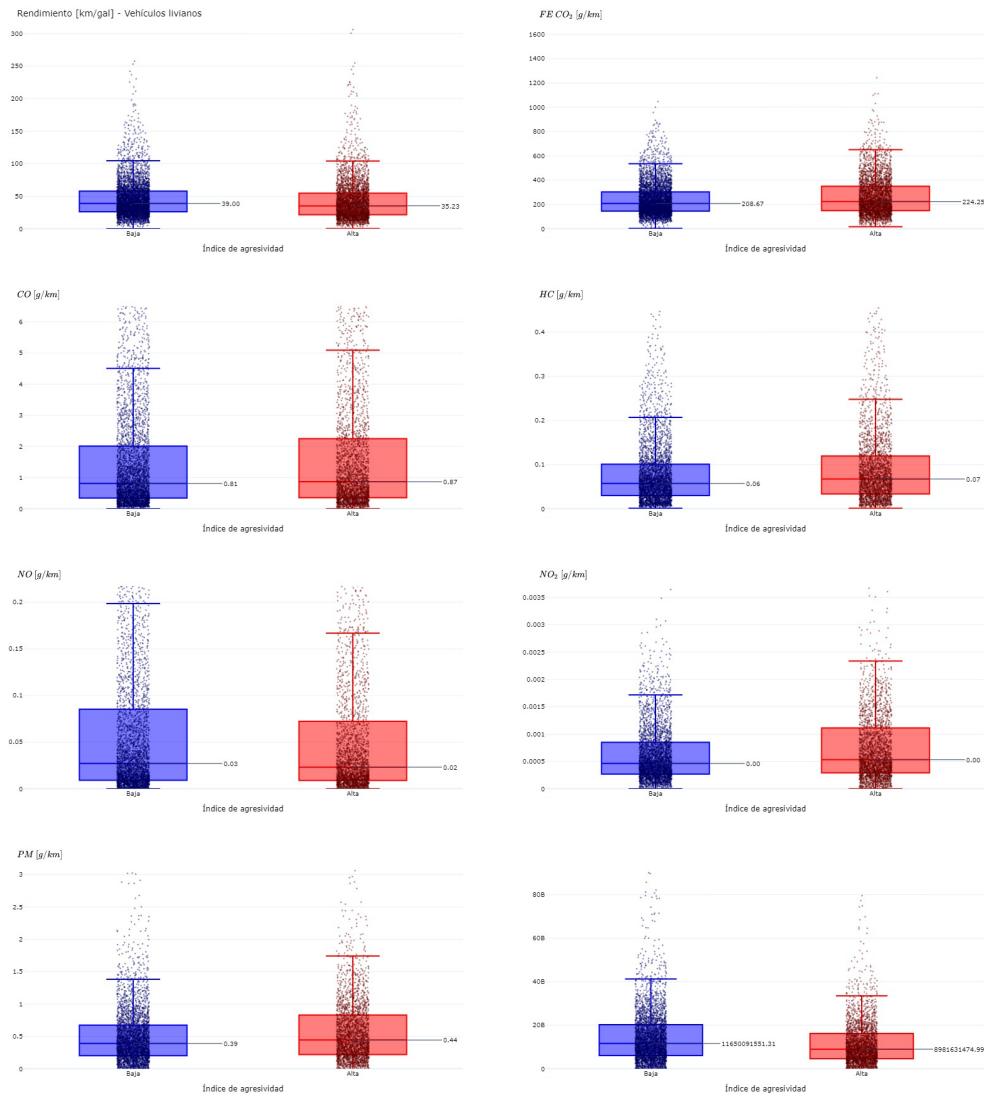


Fig. 41. Resultados para vehículos livianos en desaceleración

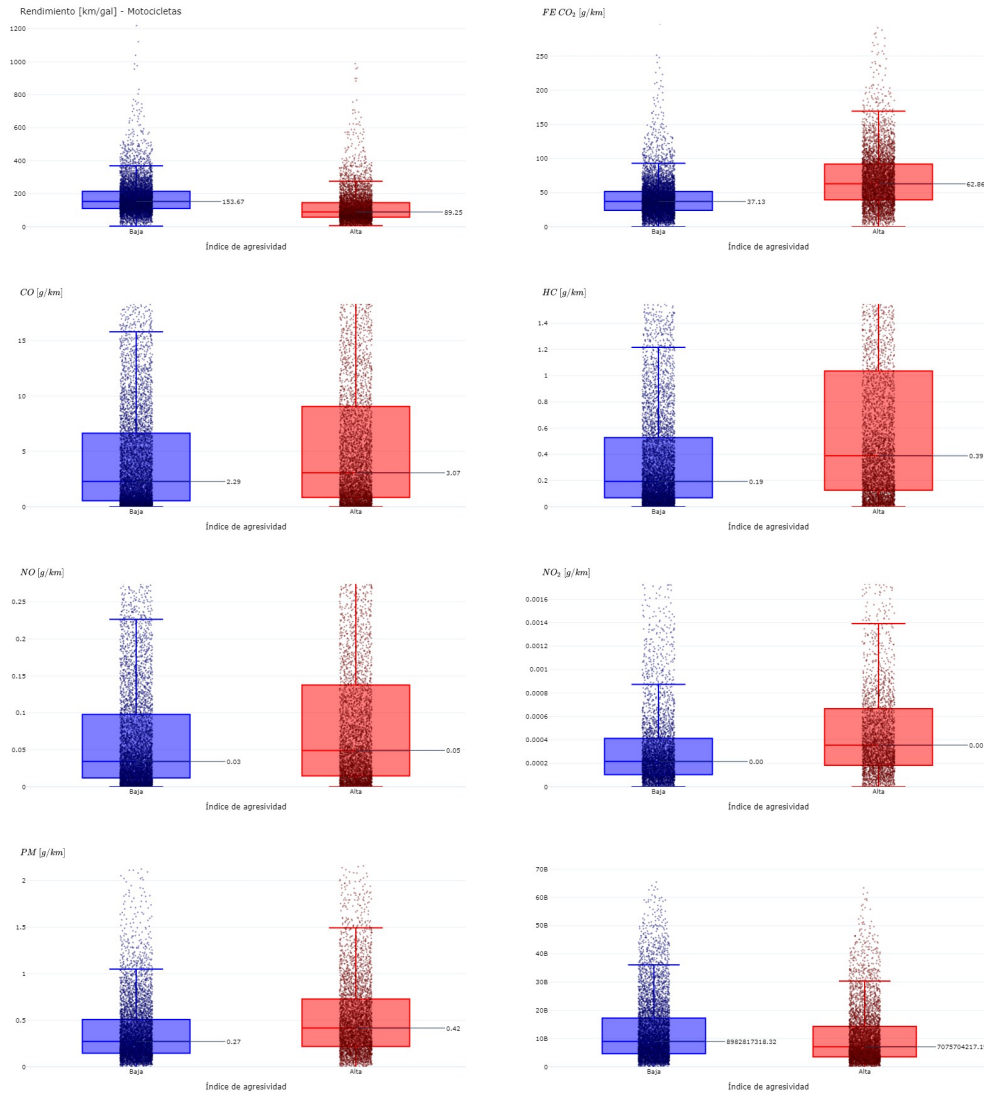


Fig. 42. Resultados para motocicletas en desaceleración

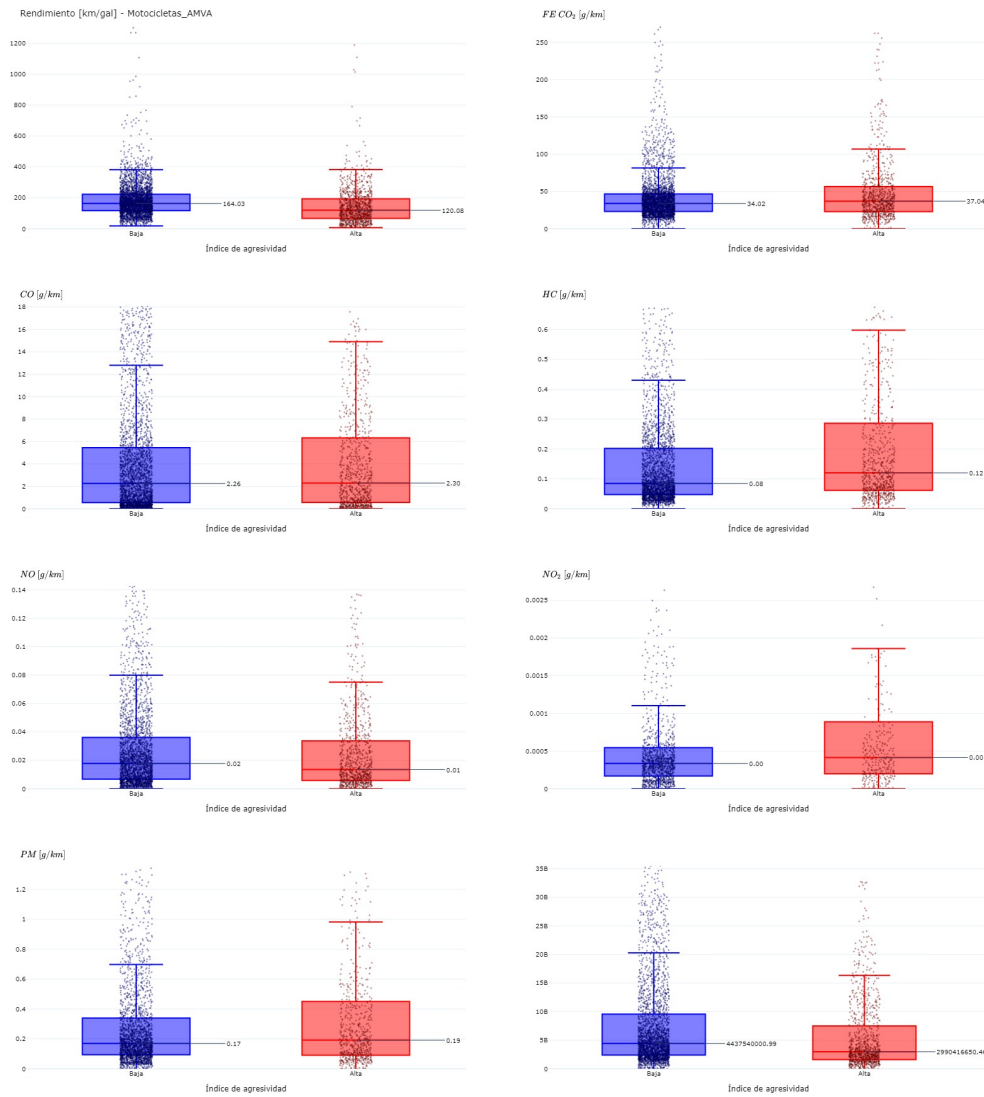


Fig. 43. Resultados para motocicletas con ciclo AMVA en desaceleración