



DETERMINACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS MOTOCICLETAS EN EL VALLE DE
ABURRÁ MEDIANTE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE ESCAPE

TRABAJO DE GRADO

Carlos Eduardo Fernandez Guerra

✉ carlos.fernandez208@pascualbravo.edu.co

Jordy Esteban López Ortiz

✉ jordy.lopez336@pascualbravo.edu.co

Director: Ingrid Natalia Gómez Miranda

PhD. en Ingeniería Ambiental, Juan Fernando Serna Cartagena

Ing. Mecánico

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería

Departamento de Mecánica

Ingeniería Mecánica

Medellín

2024

RESUMEN

El creciente uso de motocicletas en Colombia, especialmente en el Valle de Aburrá, plantea desafíos significativos en términos de emisiones contaminantes y calidad del aire. Este estudio tuvo como objetivo principal determinar los factores de emisión de escape de motocicletas que utilizan inyección electrónica de combustible, mediante un análisis basado en datos experimentales recolectados bajo un ciclo de conducción representativo de la región. A partir de métodos estadísticos y técnicas de depuración de datos, se calcularon factores de emisión confiables para contaminantes clave, como CO (3.08 g/km), CO₂ (62.38 g/km), HC (0.80 g/km), NO (0.081 g/km) y PM (0.58 mg/km).

Los resultados muestran que, al año, las emisiones totales en el Valle de Aburrá alcanzan 91,885 toneladas de CO₂, 4,537 toneladas de CO, 119 toneladas de NO, 118 toneladas de hidrocarburos y 0.808 toneladas de material particulado. Estas cifras se encuentran en rangos similares a los reportados en estudios previos realizados en la región, como los de FECOC y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Sin embargo, se evidenció una ligera variación atribuida a la inclusión de pruebas realizadas con motores en frío, lo que representa condiciones más realistas del uso cotidiano de las motocicletas.

Este trabajo resalta la importancia de adaptar los ciclos de conducción y las metodologías experimentales a las características locales, proporcionando datos que pueden ser utilizados para respaldar políticas públicas orientadas a la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire. Los factores de emisión estimados son un aporte clave para entender el impacto ambiental de las motocicletas en zonas urbanas densamente pobladas y para desarrollar estrategias efectivas de control de emisiones en el Valle de Aburrá.

Palabras clave: factores de emisión, motocicletas, inyección electrónica, Valle de Aburrá, calidad del aire, cambio climático.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	2
I INTRODUCCIÓN	4
II IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
III JUSTIFICACION	7
IV OBJETIVOS	8
A Objetivo general.	8
B Objetivos específicos:	8
V METODOLOGÍA	9
A Etapa 1: Ciclo de conducción representativo	9
B Etapa 2: Factores de emisión	11
C Etapa 3	15
VI ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
A Factores de emisión:	23
B CO2 Equivalente:	26
C Análisis Comparativo de Emisiones de CO ₂ en Diferentes Estudios:	27
VII CONCLUSIONES	30
BIBLIOGRAFÍA	31

I. INTRODUCCIÓN

La mala calidad del aire en áreas urbanas densamente pobladas genera problemáticas significativas relacionadas con la salud pública, la movilidad y la demanda de servicios públicos. En términos de salud, estudios han demostrado que un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} incrementa en un 3.7% el riesgo de enfermedades respiratorias en menores de cinco años. Asimismo, un incremento equivalente de $\text{PM}_{2.5}$ eleva este riesgo en un 8.5% para la misma población. Para personas mayores de 65 años, el riesgo de enfermedades respiratorias aumenta en un 7.46% por cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ [1].

En el área metropolitana del Valle de Aburrá, durante el primer trimestre de 2020, se declaró un estado de alerta por la calidad del aire. En este periodo se reportó un incremento significativo en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$, siendo marzo el mes más crítico, con picos que alcanzaron los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [2]. Para mitigar los efectos negativos de estas emisiones en la salud pública, las autoridades ambientales implementaron medidas como la ampliación de las restricciones vehiculares mediante el programa de "pico y placa" y la suspensión de operaciones de empresas e industrias que no cumplieran con los estándares de emisiones de material particulado [3].

El Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), a través de su monitoreo constante de la calidad del aire, ha sido clave en la toma de decisiones respecto a las fuentes de emisión, entre ellas los vehículos automotores y las industrias, identificados como los mayores emisores de gases de efecto invernadero (GEI). Durante el estado de alerta, estas decisiones se enfocaron particularmente en regular dichas fuentes con el objetivo de mejorar la calidad del aire.

Este trabajo de grado se centra en analizar el impacto ambiental de las motocicletas en el Valle de Aburrá, con un énfasis especial en sus emisiones de GEI. El estudio busca apoyar al Área Metropolitana en el diseño de estrategias de control y prevención que mitiguen el riesgo asociado a la calidad del aire.

Para alcanzar este objetivo, es fundamental determinar los ciclos de conducción vehicular, los cuales proporcionan un perfil representativo de velocidad-tiempo que describe el comportamiento de conducción en una región específica [4]. Estos perfiles permiten estimar el consumo de combustible y consecuentemente, las emisiones generadas bajo diferentes condiciones de conducción [5].

En este caso, los ciclos de conducción para motocicletas en el Valle de Aburrá se desarrollaron mediante la recopilación de datos con voluntarios y el uso del software de código abierto GPS Logger, que facilitó la construcción de una base de datos de movilidad [6]. A partir de esta información, se definirán los perfiles de conducción de motocicletas en la región, así como su consumo de combustible y las emisiones de GEI asociadas. Además, se emplearán datos recolectados con un banco de rodillos equipado con simulación de pendiente para reflejar de manera más precisa las condiciones topográficas del área [7].

II. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación ambiental es una preocupación constante a nivel mundial debido a sus repercusiones en la calidad del aire, el cambio climático y la salud humana. Sectores como el industrial, vehicular, minero, energético, agrícola y agropecuario han sido objeto de monitoreo y control debido a las emisiones que generan. En 2022, Colombia emitió 88.47 megatoneladas de CO₂, representando el 0.37% de las emisiones globales y el 3.4% de las emisiones de Latinoamérica [8], [9]. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se clasifican según su origen [10]:

- Fuentes fijas: Industrias, calderas y plantas de energía emiten contaminantes desde ubicaciones específicas e inamovibles.
- Fuentes móviles: Vehículos automotores, embarcaciones y equipos agrícolas emiten GEI durante su desplazamiento.

En Colombia, los vehículos automotores son responsables del 79% de las emisiones de GEI. La mayoría de estos vehículos utilizan motores de combustión interna que queman hidrocarburos como gasolina y diésel, liberando CO₂, CO, NO_x, SO₂ y material particulado fino (PM_{2.5}) [11].

El Valle de Aburrá, caracterizado por su configuración geográfica montañosa y condiciones meteorológicas adversas, enfrenta desafíos significativos en la dispersión de contaminantes. Esta región, con una extensión de aproximadamente 65 km entre Caldas y Barbosa, experimenta acumulación de contaminantes debido a una ventilación estacional limitada [12], [13]. Según el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) [14], el sector transporte contribuye con:

- 95% de las emisiones de monóxido de carbono (CO),
- 85% de los óxidos de nitrógeno (NO_x),
- 60% de los compuestos orgánicos volátiles (VOC), y
- 86% del material particulado fino (PM_{2.5}) .

El 92.5% de los vehículos colombianos utiliza gasolina, mientras que solo el 0.9% opera con gas natural vehicular (GNV), lo que refleja la predominancia de motores de combustión interna [15]. Las motocicletas representan un componente significativo del parque automotor, y su impacto ambiental no debe subestimarse. En 2019, el AMVA en alianza con la Universidad de Antioquia y Ecopetrol, inició la caracterización de ciclos de conducción de motocicletas, automóviles y vehículos diésel para estimar emisiones bajo diferentes estilos de manejo y condiciones topográficas [16], las emisiones de las motocicletas en Colombia se presentan en la tabla I. Estos valores se determinaron a partir de la medición de los factores de emisión de 40 motocicletas a la altitud de la ciudad de Medellín (1500 msnm) mediante la reproducción del ciclo de conducción respectivo en un banco de rodillos usando un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS por sus siglas en inglés) [7].

TABLE I. Valores promedio de los factores de emisión de las motocicletas más representativas en Colombia (Cilindradas entre 100 cc y 200 cc). Tomado de [7].

Parámetro	Unidades	Motocicletas
Rendimiento de Combustible	Km/gal	130
	L/100km	2.4
	kWh/100 km	26.2
CO ₂	g/km	47
CO	g/km	7.6
HC	mg/km	378
NO _x	mg/km	64
NO ₂	mg/km	0.65
PM	mg/km	0.68
PN	X 10E12 #/km	2

Tras la pandemia de COVID-19, las ventas de motocicletas en Colombia han experimentado un crecimiento sostenido. En abril de 2024, estas aumentaron un 33.94% respecto al mismo mes del año anterior, concentrándose principalmente en Antioquia [17]. Sin embargo, el envejecimiento del parque automotor, con un promedio de 11.1 años para motocicletas, evidencia regulaciones ambientales obsoletas. Aunque la ley 1972 de 2019 exige que todas las motocicletas cumplan con la norma Euro 3 desde 2023, aún queda un camino por recorrer para reducir emisiones como NO_x, CO y PM [18].

El incremento en el uso de motocicletas, su impacto ambiental y las condiciones geográficas del Valle de Aburrá generan la necesidad de un análisis detallado de las emisiones de GEI en esta categoría vehicular. Este análisis debe considerar ciclos de conducción adaptados a las particularidades de la región, lo que permitirá:

- 1) Estimar con precisión el consumo de combustible y las emisiones.
- 2) Generar información para el diseño de políticas públicas y estrategias de mitigación.

Por lo expuesto, se hace necesario realizar un análisis del impacto ambiental de las motocicletas en el Valle de Aburrá, utilizando un ciclo de conducción característico que incorpore las condiciones topográficas y los estilos de conducción locales. Esto contribuirá al desarrollo de iniciativas para mejorar la calidad del aire y mitigar los efectos del cambio climático.

III. JUSTIFICACION

Con base en lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de actualizar el estudio realizado por el Área Metropolitana en 2019, debido al aumento significativo del parque automotor de motocicletas en los años posteriores a la pandemia. Este incremento, junto con el envejecimiento progresivo de las motocicletas, ha modificado la composición de los grupos característicos de vehículos que circulan actualmente en el Valle de Aburrá. Además, el cambio legislativo implementado en 2019, que exige que todas las motocicletas nuevas vendidas en el país a partir de 2021 cumplan con estándares más estrictos, ha generado diferencias notables respecto a los datos utilizados en el estudio anterior, que cubría el periodo 2016-2019 [19].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo determinar los factores de emisión producidos por las motocicletas que circulan en el Valle de Aburrá, específicamente en el Área Metropolitana, para el año 2024. Esto incluye la caracterización de los conductores en grupos representativos y el análisis de información relevante para establecer medidas cuantitativas de emisiones a nivel local. Los resultados permitirán comparar la contribución de las motocicletas a la contaminación con otros sectores de la industria emisores de gases contaminantes. Asimismo, se buscará relacionar estos resultados con datos de otras regiones de Colombia y del mundo, con el propósito de contextualizar el impacto ambiental del parque automotor de motocicletas.

Finalmente, este análisis pretende apoyar la toma de decisiones estratégicas orientadas a mitigar los efectos negativos de este sector sobre el medio ambiente, promoviendo el cumplimiento de las políticas y regulaciones ambientales, cada vez más estrictas, y facilitando la implementación de estrategias efectivas para mejorar la calidad del aire en el Valle de Aburrá.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general.

Determinar el impacto ambiental de las motocicletas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá utilizando los factores de emisión de escape, mediante el análisis de información experimental de emisiones y métodos estadísticos multivariados aplicados a un ciclo de conducción representativo.

B. Objetivos específicos:

- Validar la información del ciclo reproducido en laboratorio mediante el uso de métodos estadísticos, con el fin de construir una base de datos de movilidad confiable.
- Determinar los factores de emisión de las motocicletas en el Valle de Aburrá utilizando la información del ciclo reproducido, con el propósito de cuantificar las emisiones de CO₂eq por año.
- Evaluar el impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las motocicletas en el Valle de Aburrá, con el objetivo de respaldar la toma de decisiones en materia de control y estrategias para mitigar el cambio climático.

V. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo el planteamiento y la realización de una metodología dividida en tres etapas, orientadas hacia el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos.

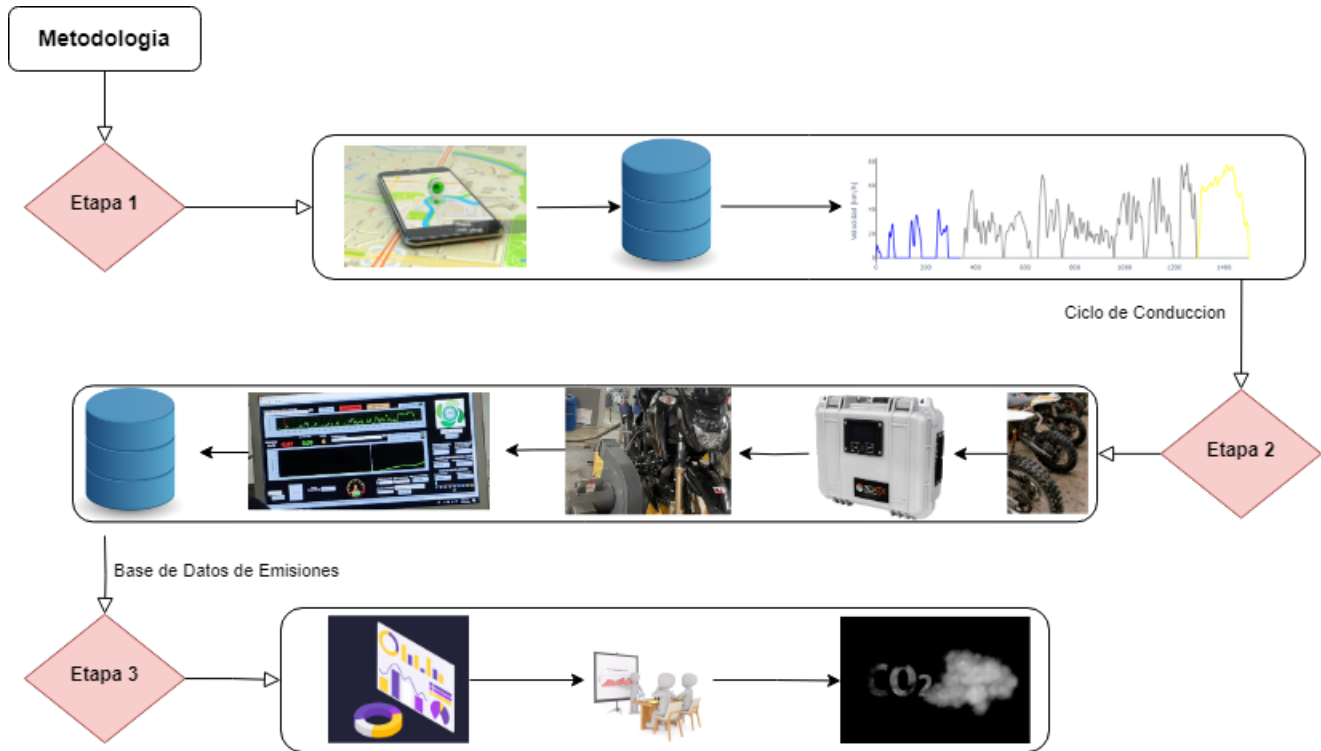


Fig. 1. Diagrama de la metodología.

A. Etapa 1: Ciclo de conducción representativo

Para la síntesis de los ciclos de conducción de vehículos de dos ruedas en el Valle de Aburrá, realizado por Cartagena, J. F. [6], se siguieron los siguientes pasos:

- **Recolección de información:**

Para determinar el tamaño de la muestra, se utilizó la cantidad de viajes en vehículos de dos ruedas reportada en la encuesta de origen-destino del AMVA (2017). A través de redes sociales y el método de boca a boca, se convocaron motociclistas voluntarios. Los datos se recolectaron mediante un software de desarrollo propio para dispositivos móviles Android, que registró la información de posicionamiento global (GPS) durante una semana en el Área Metropolitana de Medellín y sus municipios aledaños. Esto permitió incluir los posibles efectos entre días hábiles y no hábiles, generando una base de datos con variables de desplazamiento como: tiempo, latitud, longitud, altura y velocidad.

- **Limpieza de datos:**

Se evaluaron los datos recolectados para identificar y corregir errores o valores atípicos que pudieran afectar la interpretación y análisis de la base de datos. A partir de esta base, se generó un mapa de calor que permitió identificar las rutas características de la región. Estas rutas se emplearon para segmentar los datos en microciclos, utilizando técnicas de agrupamiento.

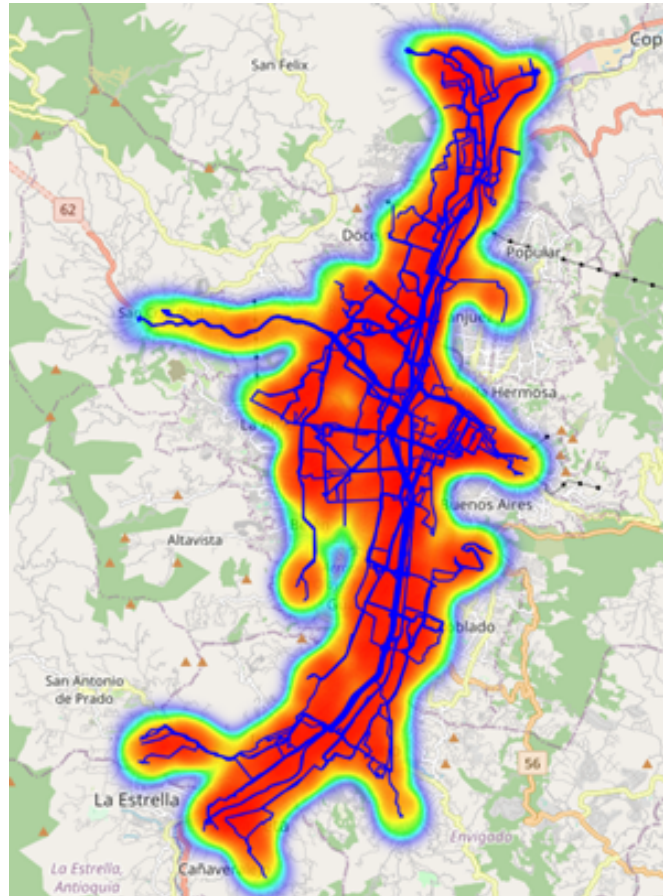


Fig. 2. Mapa de calor de rutas características. Tomado de J. F. [6].

- **Separación en microciclos:**

Se aplicaron métodos estadísticos de agrupamiento y clasificación para analizar los patrones de conducción y las características de los vehículos. Este análisis incluyó variables como velocidad, aceleración (positiva y negativa), tiempos de ralentí y representación de diferentes tipos de tráfico (pesado, medio y fluido).

TABLE II. Variables utilizadas para el análisis de microciclos. Tomado de J. F. [6].

Variable	Unidad	Abreviatura
Velocidad media	Km/h	Speed_mean
Velocidad máxima	Km/h	Speed_max
Aceleración positiva media	m/s ²	acel_pos_mean
Aceleración positiva máxima	m/s ²	acel_pos_max
Aceleración negativa media	m/s ²	acel_neg_mean
Aceleración negativa máxima	m/s ²	acel_neg_max
Duración	Segundos	duracion
Distancia	m	distance
Tiempo de ralentí	%	t_ralenti
Tiempo de movimiento	%	t_mov

• **Establecimiento de los ciclos de conducción:**

A partir del análisis de los microciclos, se establecieron los patrones representativos de conducción que reflejan las condiciones típicas de manejo en el Área Metropolitana. Estos patrones se sintetizaron en un ciclo de conducción representativo, el cual considera diferentes condiciones de tráfico: pesado (zona azul), medio (zona gris) y fluido (zona amarilla).

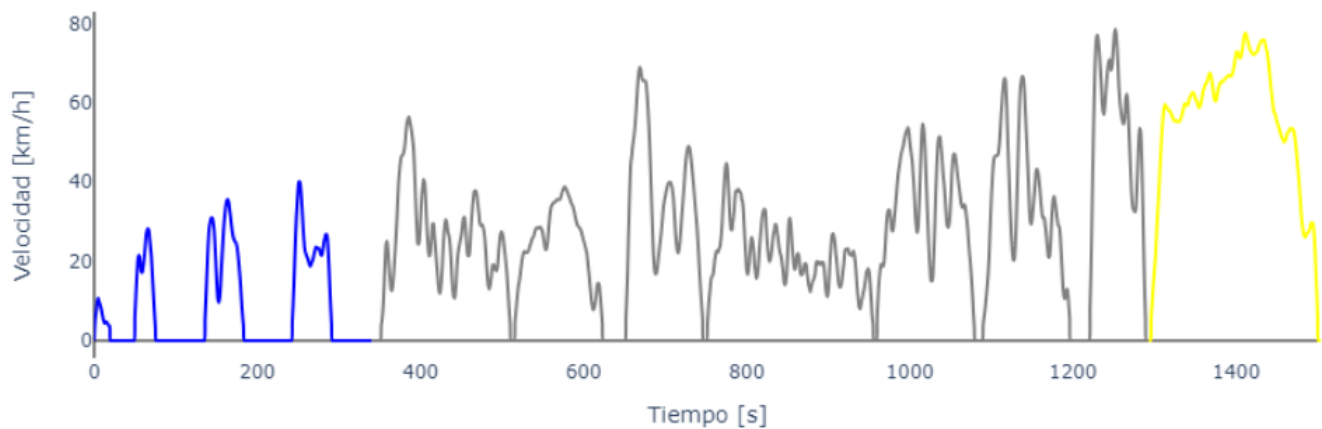


Fig. 3. Ciclo de conducción representativo. Tomado de J. F. [6].

B. Etapa 2: Factores de emisión

En esta etapa, el ciclo de conducción sintetizado se utilizó en la fase experimental para medir las emisiones de escape y desarrollar los factores de emisión (FE) para cada contaminante emitido por las motocicletas. Esta etapa se llevó a cabo mediante el dinamómetro de la Universidad de Antioquia, como parte del proyecto “Determinación de factores de emisión en motocicletas en el Valle de Aburrá”, con código

AP0019. Los pasos son los siguientes:

• **Selección de los vehículos de prueba:**

A partir de la base de datos de los motociclistas voluntarios, que incluye información sobre modelo, kilometraje, marcha y referencia de la motocicleta, junto con los informes de ventas y matrículas de estos vehículos en la región, se establecieron los grupos de motocicletas representativos del parque automotor en el Valle de Aburra. Estas motocicletas fueron seleccionadas para las pruebas de laboratorio.

TABLE III. Vehículos de prueba.

Categoría	Modelo	Cilindrada (Aprox.)
Alto cilindraje EFI	Kawasaki ER6N	650cc
Calle hasta 200cc EFI	Kawasaki Z250	250cc
Calle hasta 200cc EFI	KTM Duke 200	200cc
Calle hasta 200cc EFI	Apache TVS 200 EFI	200cc
Enduro hasta 200cc EFI	Hero Xpulse 200	200cc
Scooter hasta 200cc EFI	Honda PCX150	150cc
Scooter hasta 200cc EFI	AKT SYM Jet14	125cc
Scooter hasta 200cc EFI	Yamaha Nmax 150 EFI	150cc

• **Medición de emisiones:**

Las emisiones gaseosas se midieron utilizando el equipo portátil Parsync, propiedad del grupo GIMEL de la Universidad de Antioquia. Este equipo permite medir gases y material particulado, cuyas especificaciones se presentan en las Tablas IV, V y VI.

TABLE IV. Especificaciones equipo portátil de medición de emisiones Parsync (parte A).

Cartucho de Gas		
3 electrodo Electroquímico	Óxido nítrico (NO_x)	Dióxido de nitrógeno (NO₂)
Tiempo de respuesta T90	< 5 segundos	< 5 segundos
Resolución	1-2 ppm	0.1 ppm
Respetabilidad	2% de la señal	2% de la señal
Temperatura de funcionamiento	-20°C a 50°C	-20°C a 50°C
Rango de Medición Lineal	0-5000 ppm	0-300 ppm
Electrómetro Infrarrojo no	Monóxido de carbono (CO)	Dióxido de carbono (CO₂)
Rango de medición	0-15%	0-15%
Exactitud	± 0.02% absoluto o ± 3% relativo	± 0.02% absoluto o ± 3% relativo
Repetibilidad	± 0.02% absoluto o ± 2% relativo	± 0.02% absoluto o ± 2% relativo

TABLE V. Especificaciones del equipo Parsync (Parte B).

Cartucho de Gas	Óxido nítrico (NO_x)	Dióxido de nitrógeno (NO₂)
Tiempo de respuesta T90	< 5 segundos	< 5 segundos
Resolución	1-2 ppm	0.1 ppm
Rango de medición lineal	0-5000 ppm	0-300 ppm

TABLE VI. Especificaciones del equipo Parsync (Parte C).

Parámetro	Rango
Sensor ultrafino	10 a 10,000 nm
Sensor opacidad	80 a 7,000 nm
Sensor dispersión	250 a 10,000 nm

• **Análisis de arranque en frío:**

El análisis en frío se llevó a cabo debido a que en esta fase, las bajas temperaturas del motor generan una combustión incompleta, aumentando las emisiones de material particulado (PM) y número de partículas (PN). Según estudios previos, estas emisiones pueden ser hasta 18 veces mayores en condiciones de arranque en frío respecto a la operación estabilizada [20], [21], cabe resaltar que este análisis cobra relevancia sobre las temperaturas que presentan los gases de escape, estos se encuentran en un régimen transitorio, evidenciado de mejor manera en la Figura 5 .

• **Calibración previa:**

Antes de realizar las pruebas, se verificó la funcionalidad del equipo Parsync utilizando gases como óxido nítrico (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). Se conectó el equipo a un rotámetro para controlar el flujo volumétrico a 2 L/min, asegurando la precisión en las mediciones, se realizó la calibración de la presión del ambiente para establecer el valor de referencia (0) en el sistema , se incorporó el desarrollo de un acople hacia el mofle al sensor Horiba Mexa 730 Lambda propiedad de la universidad de Antioquia para medir la relación aire combustible. El cual cuenta con las siguientes especificaciones:

■Control unit	
Model name	MEXA-730λ
Display range	A/F : 3.99 to 500.0 λ : 0.275 to 30.00 O ₂ : 0.00 to 99.99 vol%
Accuracy of A/F(Guarantee range is from 9.5 to 200 A/F) (Model gas at room temperature, atmospheric pressure is used): With 3-point calibration at 9.5 A/F, stoichiometric point and 60.0 A/F	
	9.50 A/F to stoichiometric point: within ±0.3 A/F
	at stoichiometric point: within ±0.1 A/F
	stoichiometric point to 20.00 A/F: within ±0.3 A/F
	20.01 to 30.00 A/F: within ±0.7 A/F
	30.01 to 40.00 A/F: within ±1.0 A/F
	40.01 to 50.00 A/F: within ±1.5 A/F
	50.01 to 60.00 A/F: within ±2.0 A/F
	60.01 to 80.00 A/F: within ±6.0 A/F
	80.01 to 100.0 A/F: within ±9.0 A/F
	100.1 to 150.0 A/F: within ±20.0 A/F
	150.1 to 200.0 A/F: within ±38.0 A/F
Response time	Typically 0.08 s (Max. 0.15 s)
Digital input-output	RS-232C (standard)
Analog output	0 to 5 V DC (scaling possible)
H/C setting range	0.00 to 9.99 (key selectable)
O/C setting range	0.000 to 6.811 (key selectable)
Calibration gas	Ambient air or standard gas
Acceptable vibration	0 to 294 m/s ²
Power	10-30 V DC, 50 W
Dimensions	130 (W) × 170 (D) × 75 (H) mm
Mass	Approx. 1.1 kg (Control unit)
■UEGO Sensor (Data sheet supplied with each UEGO sensor)	
Sample gas temperature	-7°C to 900°C
Heater temperature control	PID
Hexagonal nut size	22 mm
Torque	40±4N · m

Fig. 4. Datos técnicos del sensor Horiba Mexa 730 Lambda propiedad de la universidad de Antioquia.

• **Reproducción del ciclo en dinamómetro:**

Para simular las condiciones de carga, se utilizó un dinamómetro de chasis Mustang Dynamometer MD-150. Este equipo permite caracterizar el desempeño mecánico de motocicletas y vehículos. Las especificaciones técnicas del dinamómetro se presentan en la Tabla VII.

TABLE VII. Especificaciones del dinamómetro Mustang MD-150.

Parámetro	Valor
Potencia máxima	1200 hp
Potencia máxima de oposición	625 hp
Dispositivo de carga	Amortiguador de corriente de Foucault
Velocidad máxima	264 km/h
Inercia	630 lbs. Base de inercia mecánica
Peso máximo soportado	2700 kg

Cada ciclo de conducción fue reproducido tres veces para garantizar la consistencia de los resultados, con un tiempo de espera de cinco horas entre pruebas para simular condiciones de arranque en frío. Durante las pruebas, se midieron variables como velocidad, tiempo, torque, potencia, consumo de combustible y emisiones contaminantes.

C. Etapa 3

Impacto ambiental de las motocicletas: Finalmente, con los FE de cada contaminante se usaron para determinar el impacto ambiental de las motocicletas del valle de Aburrá en términos de emisiones usando las métricas del International Panel Climate Change 2022 [22]

Para esto se prosiguió con lo siguientes pasos:

- **Limpieza de datos:** Para realizar hacer una correcta manipulación de los datos se inicio con la eliminación de algunos datos atípicos, tales como valores negativos, estos valores dieron debido a la escala de medición del PEMS, el cual al detectar partículas menores y no ser capaz de medirlas reporta un valor negativo, se transformaron a 0, tambien se realizo la supresión de las filas correspondientes al encendido de la moto retomando a partir del arranque inicial, al igual que la supresión de las ultimas filas correspondientes a la culminación de la reproducción del ciclo.

Para cada prueba en cada variable utilizada para el calculo de emisiones se le realizo un filtrado de datos atípicos, Se usa un filtro Savitzky–Golay con una ventana de 51 datos y un polinomio de tercer orden. [23], [24]

- **Estadística descriptiva:** Se realizo con el fin de entender la base de datos sobre los ensayos que se le realizaron a las motocicletas y una correcta validación de la información a través de las medidas de tendencia central a cada moto realizado de las emisiones de Co2

A. **Media:** Promedio simple de los datos.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

B. **Mediana:** Es el valor que al ordenar los datos de manera ascendente se ubica exactamente en la posición central

$$\begin{cases} X_{\left(\frac{N+1}{2}\right)} & \text{si } N \text{ es impar} \\ \frac{X_{\left(\frac{N}{2}\right)} + X_{\left(\frac{N}{2}+1\right)}}{2} & \text{si } N \text{ es par} \end{cases}$$

- C. **Rango:** Medida de dispersión que indica la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo. Se utiliza para comprender la extensión total o el intervalo en el que se encuentran los datos

$$\text{Rango} = X_{\max} - X_{\min}$$

- D. **Varianza:** Mide el promedio de las diferencias al cuadrado entre cada valor y la media del conjunto de datos. Es una medida de la "variabilidad" de los datos

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

- E. **Desviación Estándar:** Es la raíz cuadrada de la varianza, indica cuánto se dispersan los datos en torno a la media

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$$

- F. **Coefficiente de Variación:** Es una medida de dispersión relativa, que muestra la variabilidad en relación con la media del conjunto de datos

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100$$

- G. **Asimetría (Skewness):** La simetría o el sesgo es la distribución de los datos en torno a su media. Determina si los datos están distribuidos de manera uniforme o si tienen una inclinación hacia un lado. Donde:

Si la asimetría es 0, la distribución es simétrica.

Si la asimetría es positiva, hay un sesgo a la derecha (cola larga en el lado derecho).

Si la asimetría es negativa, hay un sesgo a la izquierda (cola larga en el lado izquierdo).

$$\text{Asimetría} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right)^3$$

H. **Curtosis:** Es una medida de la forma de una distribución en comparación con la distribución normal, también conocida como campana de Gauss. Donde:

Curtosis = 0 (mesocúrtica): La distribución tiene una forma similar a la distribución normal.

Curtosis > 0 (leptocúrtica): Hay más valores en las colas (pico más alto y colas más gruesas).

Curtosis < 0 (platicúrtica): La distribución es más plana (pico más bajo y colas menos extremas).

$$\text{Curtosis} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right)^4 - 3$$

I. **Cuartiles:** Los cuartiles dividen un conjunto de datos ordenado en cuatro partes iguales para poder entender la dispersión y distribución de los datos en intervalos específicos

$$Q_k = X_{\left(\frac{k(N+1)}{4}\right)}$$

Se abarcara un análisis mas detallado de cada motocicleta, reportando observaciones a cerca de las pruebas realizadas, así como también la aceptación o el rechazo de una prueba y o contaminante medido. Para todas las motocicletas se comenzó comparando visualmente la relación que había entres las pruebas y sus respectivas variables de Velocidad, relación aire combustible, aire de admisión del MAF, CO₂, CO, HC, NO y PM, la corroboración de esta relación se hizo por medio de la matriz de correlaciones para la aceptación de relación entre ellas al igual que una validación al obtener el resultado final de factores de emision:

Se estimo la incertidumbre para Medir la fiabilidad de las emisiones y asegurar la calidad de los datos y los resultados siguiendo la metodología reportada por la ASME (American Society of Mechanical Engineers)[25]. Calculada como:

$$U(X) = 2\sqrt{\sigma(X)^2 + b(X)^2}$$

Donde:

- U : Incertidumbre total
- X : Valor de la medición realizada.
- σ : Incertidumbre asociada a efectos aleatorios
- b : Incertidumbre asociada a efectos sistemáticos.

A su vez, las incertidumbres aleatorias y sistemáticas se definen respectivamente como:

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \sum_{j=1}^{N_p} (X_j - \bar{X})^2}$$

$$b(X) = \sqrt{\sum_{k=1}^K b(X_k)^2}$$

Donde, para σ :

- N_p : Total de veces que se repitió la medición X .
- \bar{X} : Valor promedio de la población de medidas realizadas.

Y, para b :

- K : Total de veces que un error sistemático es conocido en la medida.
- $b(X_k)$: Desviaciones estándar asociadas a cada error sistemático.

- **Emisiones:** El protocolo de Gases de Efecto Invernadero, Protocolo de GEI o GHGP es una iniciativa conjunta del Instituto de Recursos Mundiales y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD), proporciona principios, orientación, herramientas y metodologías para crear inventarios de GEI y comunicar los datos pertinentes[26]. El estándar del Protocolo de GEI se ajusta en gran medida a lo que se establecía en la norma ISO 14064:2019 que determina el calculo de la de la Huella de Carbono periodo de un año con un resultado expresado en toneladas de CO2 equivalente [27]. Para llevar a cabo la conversión de unidades se siguió la metodología de Londoño [24].

La masa total de cada contaminante para una prueba se obtuvo integrando matemáticamente los respectivos flujos máxicos en el tiempo de la prueba.

$$m_c[gr] = \int_0^{t_f} \dot{m}_c[gr/seg] dt$$

Mientras que el calculo del flujo másico del contaminante fue calculado a partir del caudal de los gases de escape.

$$\dot{m}_c[gr/seg] = \dot{v}_c[cm^3/seg] * \rho_c[gr/cm^3]$$

El volumen del contaminante esta determinado como:

$$\dot{v}_c[cm^3/seg] = \dot{v}_g[m^3/seg] * Concentración[cm^3/m^3]$$

Esto teniendo en cuenta que las emisiones de CO₂ y CO fueron medidas en %, el NO, y HC en ppm y el PM en ug/m³.

Relación entre % y ppm: 1% equivale a 10 000 ppm, por lo que $1/100 * 10^6 = 10\ 000$ ppm, a su vez $1\text{ppm} = 1\text{ cm}^3/\text{m}^3$, $1\text{ ug}/\text{m}^3 = 0,001\text{ mg}/\text{m}^3$. Como conversiones para la concentración dada por el PEMS.

El flujo volumétrico de los gases de escape se define como cociente del flujo másico y la densidad de los gases de escape.

$$\dot{v}_g[m^3/seg] = \frac{\dot{m}_g[gr/seg]}{\rho_g[kg/m^3] * [1000gr/1kg]}$$

El flujo másico de los gases de escape se calcula por medio del balance de masa:

$$\dot{m}_g[gr/seg] = \dot{m}_a[gr/seg] + \dot{m}_c[gr/seg]$$

El flujo másico de aire de admisión (\dot{m}_a) se midió con el sensor MAF. El flujo másico de combustible ($\dot{m}_{combustible}$) fue determinado por medio de la relación aire combustible medida por el sensor Horiba Mexa 730 Lambda.

$$R_{AC} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{combustible}} \text{ Despejando queda como: } \dot{m}_{combustible} = \frac{\dot{m}_a}{R_{AC}}$$

La densidad de los gases de escape en cada instante de tiempo (ρ_g) se calculo a partir de la ecuación de estado de gases ideales:

$$\rho_g = \frac{P}{R_g \cdot T_g}$$

Donde:

- ρ_g : Densidad de los gases de escape (kg/m^3).
- P_g : Presión de los gases (Kpa).
- R_g : Constante de gases ideales ($R_g = 0,293 \text{ KJ/kgK}$) [28]
- T_g : Temperatura de los gases de escape (K).

Y las densidad de los contaminantes también fueron calculadas a partir de la ley de gases ideales.

$$\rho_c[\text{gr/l}] = \frac{P_g[\text{atm}] * M_c[\text{gr/Mol}]}{R_g[\text{L} * \text{atm/Mol} * \text{K}] \cdot T_g[\text{K}]}$$

Donde:

- ρ_c : Densidad del contaminante.
- P_g : Presión de los gases. Donde $1\text{KPa} = 0.00986923\text{atm}$.
- M_c : Es la masa molar del contaminante.
- R_g : Constante de gases ideales, tomada como $0,0821 \text{ (L*atm / Mol*k)}$
- T_g : Temperatura de los gases de escape.

La presión de los P_g fue determinada a partir de la presión ambiente medida por el banco de rodillos Mustang Dynamometer MD-150 y una sobre presión estimada. Esta sobre presión ha de ser ligeramente superior a la presión atmosférica para que puedan salir los productos de la combustión por el tubo de escape con estimación de 2,5 kPa. [24]

$$P_g[kPa] = P_{ATM}[KPa] + P_s[kPa]$$

La temperatura de los gases de escape se tomo de Londoño [24] el cual midió de forma experimental la temperatura de los productos de combustión vs metros recorridos y Se tomo una temperatura fija promedio de 200 °c.

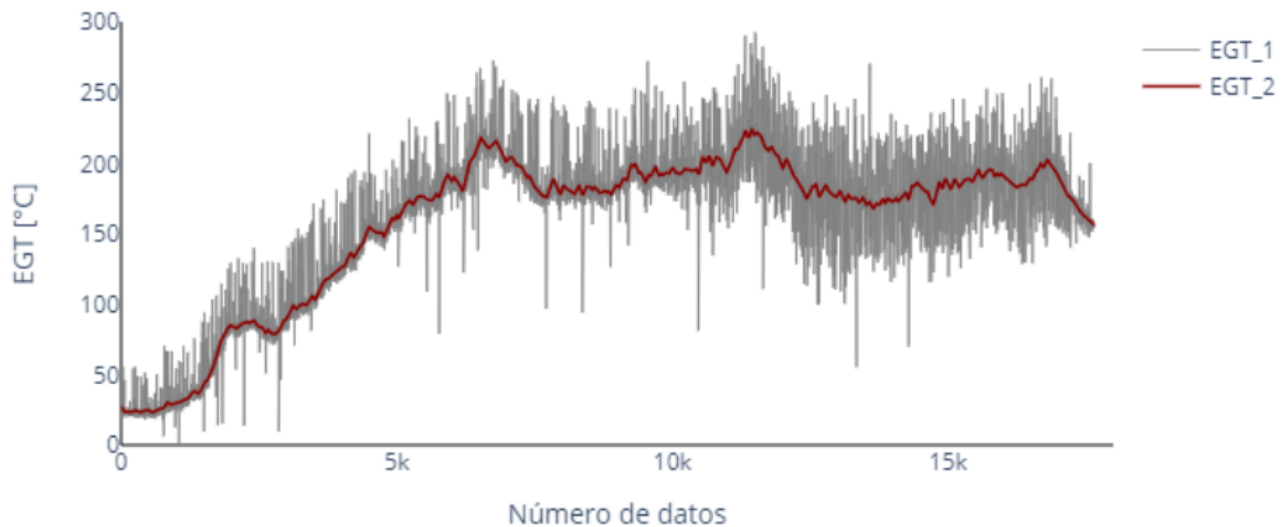


Fig. 5. Temperatura de los productos de combustión vs Metros recorridos [24]

El calculo de las masas molares de los contaminantes fue realizada de la siguiente manera:

- CO₂ = 12.01 gr/mol de carbono + 2 × 16.00 rg/mol de oxígeno = 44.01 gr/mol
- CO = 12.01 gr/mol de carbono + 16.00 gr/mol de oxígeno = 28.01 gr/mol
- NO = 14.01 gr/mol de nitrógeno + 16.00 gr/mol de oxígeno = 30.01 gr/mol
- Hc = 12.01 gr/mol de carbono + 4 × 1.01 gr/mol de hidrógeno = 16.04 gr/mol. Para las emisiones de metano CH₄.

- **Factores de Emisión:** Con la masa de cada contaminante determinada se divide por el total de la distancia recorrida a lo largo de ciclo de conducción realizado.

La distancia recorrida durante las pruebas se calculo integrando la velocidad medida por en kilómetros por hora respecto al tiempo que duro la prueba.

$$DistanciaRecorrida[Km] = \int_0^{t_f} Vel [km / h] dt$$

$$FE[gr/km] = \frac{m_c[gr]}{DistanciaRecorrida[km]}$$

- **Estimación del tiempo promedio y los km promedio recorridos en el valle de Aburra:** De acuerdo a la encuesta de origen destino realizada por el AMVA en el Valle de Aburra se registraron aproximadamente 620802 viajes en motocicleta diarios con un tiempo promedio de 34 minutos y una distancia aproximada de 6,5 km [29],[30].
- **Conversión de las emisiones a CO2eq:** La conversión se realizo a partir del indice de potencial de calentamiento global (GWP) de cada contaminante, el cual es una medida de la capacidad que tienen diferentes GEI en la retención del calor en la atmósfera [31].

La información se tomo del reporte del IPCC AR6 de agosto del 2024, recopilada en la tabla VIII.

TABLE VIII. Valores de GWP del IPCC[32].

Designación industrial	GWP 20	GWP 50	GWP 100
CO2	1	1	1
CO	1	1	1
HC	81,2	10,3	27,9
NO	273	273	273

El monóxido de carbono no posee Potencial de calentamiento global debido a que estese oxida en la atmósfera para fomentar la cantidad de CO2.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Factores de emisión:

En la tabla IX se presenta un resumen de la información general de las motocicletas consideradas en este estudio, detallando características como la norma, el cilindraje, la categoría y el modelo por año correspondiente.

TABLE IX. Información general de las motocicletas.

Motocicleta	Norma	Cilindraje	Categoría	Modelo
AKTSYM	Euro 3	149	Scoote	2024
HERO XPULSE	Euro 4	199	Enduro	2023
HONDA PCX150	Euro 4	149	Scooter	2019
HONDA XR190L	Euro 4	184	Enduro	2023
KAWASAKI ERN6	Euro 3	650	Alto Cilindraje	2019
KAWASAKI Z250	Euro 3	250	De calle 200cc	2019
KTM DUKE 200	Euro 3	200	De Calle 200c	2019
TVS APACHE	Euro 5	199	De Calle 200cc	2025
YAMAHA NMAX155	Euro 4	155	Scooter	2023

En las tablas X, XI y XII se presentara la información de los factores de emisión calculados para cada prueba realizada en términos de CO₂, CO, HC, NO y PM, también en estas tabla se reportan medidas de variación y medidas de incertidumbre.

TABLE X. Factores de Emisión A.

#	Moto	Prueba	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]
1	AKTSYM	P1	79.62219333	3.615305446	0.12598441	0.091583128	1.061128133
		P2	76.38296518	3.511810138	0.127729798	0.07963191	0.987395531
		P3	72.88636745	2.935916511	0.115127139	0.072340048	0.76642774
		Promedio	76.29717532	3.354344032	0.122947116	0.081185029	0.938317135
		Desv. Estándar	3.368732325	0.366045096	0.006828295	0.0097151	0.153357742
		Coef. Variación	4.4%	10.9%	5.6%	12.0%	16.3%
		u_A	1.944938514	0.211336235	0.003942318	0.005609015	0.088541134
		u_C	1.944938514	0.211336235	0.003942318	0.005609015	0.088541134
		Incirt. Total (u)	2.750558425	0.298874569	0.00557528	0.007932346	0.125216072
2	HERO XPULSE	P1	95.74801974	3.675373959	0.159288321	0.103413437	-
		P2	88.60944946	3.639716698	0.129241167	0.099644472	0.496545594
		P3	87.11833567	3.382477423	0.13504832	0.097071246	-
		Promedio	90.49193495	3.565856026	0.141192603	0.100043052	0.496545594
		Desv. Estándar	4.612556289	0.159808148	0.015938069	0.003189827	0.286680732
		Coef. Variación	5.1%	4.5%	11.3%	3.2%	57.7%
		u_A	2.663060615	0.092265277	0.009201848	0.001841647	0.286680732
		u_C	2.663060615	0.092265277	0.009201848	0.001841647	0.286680732
		Incirt. Total (u)	3.766136439	0.130482807	0.013013379	0.002604483	0.40542778

TABLE XI. Factores de Emisión B.

#	Moto	Prueba	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]
3	Honda PCX 150	P1	52.16814322	1.727455554	0.091964404	0.036747879	–
		P2	54.22193443	1.626684055	0.090688204	0.039205405	0.394882521
		P3	54.41624547	1.481689556	0.101373966	0.036034605	0.323453023
		Promedio	53.6021077	1.611943055	0.09467552	0.037329296	0.359167772
		Desv. Estándar	1.245644334	0.123544341	0.00583601	0.001663438	0.210418724
		Coef. Variación	2.3%	7.7%	6.2%	4.5%	58.6%
		u_A	0.719173091	0.071328359	0.003369422	0.000960387	0.148788507
		u_C	0.719173091	0.071328359	0.003369422	0.000960387	0.148788507
		Incert. Total (u)	1.017064339	0.100873532	0.004765082	0.001358192	0.210418724
4	Honda XR 190L	P1	63.13780128	3.67808659	0.087515267	0.092801936	0.987525471
		P2	59.23058822	3.907324105	0.100721108	0.080389667	1.198632411
		P3	54.95381941	3.480851272	0.089431553	0.075225529	1.059538958
		Promedio	59.10740297	3.688753989	0.092555976	0.08280571	1.081898947
		Desv. Estándar	4.093381339	0.213436441	0.00713583	0.009033851	0.107315012
		Coef. Variación	6.9%	5.8%	7.7%	10.9%	9.9%
		u_A	2.363314818	0.123227586	0.004119874	0.005215697	0.061958351
		u_C	2.363314818	0.123227586	0.004119874	0.005215697	0.061958351
		Incert. Total (u)	3.342231867	0.174270124	0.005826381	0.007376109	0.087622341
5	KTM Duke 200	P1	52.8807544	1.23065961	0.095104857	0.066740903	0.38338702
		P2	48.7066758	1.045669992	0.077580746	0.055387504	0.393810872
		P3	47.33798428	1.167210337	0.092995867	0.052044021	0.363270797
		P4	49.45988818	0.997844554	0.090669637	0.046829494	–
		Promedio	49.59632566	1.110346123	0.089087777	0.055250481	0.378540835
		Desv. Estándar	1.07572623	0.087315612	0.008310198	0.004312959	0.219083459
		Coef. Variación	2.2%	7.9%	9.3%	7.8%	57.9%
		u_A	0.537863115	0.043657806	0.004155099	0.002156479	0.154915399
		u_C	0.537863115	0.043657806	0.004155099	0.002156479	0.154915399
Incert. Total (u)	0.760653312	0.061741461	0.005876198	0.003049723	0.219083459		
6	KAWASAKI ER6-N	P1	28.6932381	4.03492721	0.0402665	0.08024971	–
		P3	29.0846007	3.2065049	0.01937494	0.05748364	0.2673988
		P4	18.1720787	2.49414345	0.02584664	0.04780719	0.17348054
		Promedio	25.3166058	3.24519188	0.02728323	0.06186785	0.22061967
		Desv. Estándar	6.19043399	0.77112007	0.0115767	0.01662902	0.13596138
		Coef. Variación	24.5%	23.8%	41.6%	26.9%	61.5%
		u_A	3.57044873	0.44520638	0.00688131	0.00960077	0.09559455
		u_C	3.57044873	0.44520638	0.00688131	0.00960077	0.09559455
		Incert. Total (u)	5.01546819	0.6296169	0.00945324	0.01377574	0.13596138
7	KAWASAKI Z250	P1	–	9.594618234	0.042828812	0.256309228	–
		P2	76.33962366	9.40417025	–	0.260634445	0.802820768
		P3	76.80423688	8.167554237	0.039520881	0.220204901	0.73784304
		P4	88.33862965	7.990468834	0.056617039	0.255352472	–
		Promedio	80.49416339	8.789202889	0.046322244	0.248125261	0.770331904
		Desv. Estándar	6.797477803	0.770187217	0.029039248	0.021976499	0.445936401
		Coef. Variación	8.4%	8.8%	62.7%	8.9%	57.9%
		u_A	3.924525639	0.385093609	0.016765818	0.010988249	0.315324653
		u_C	3.924525639	0.385093609	0.016765818	0.010988249	0.315324653
Incert. Total (u)	5.550117385	0.544604604	0.023710447	0.015539731	0.445936401		

TABLE XII. Factores de Emisión C.

#	Moto	Prueba	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	HC [g/km]	PM [mg/km]
8	TVS Apache 200	P1	69.1334808	–	0.01183656	–	–
		P2	66.2664753	0.28186238	0.01387826	0.00801752	0.01991894
		P3	65.3119492	0.28018919	0.01251663	0.00600038	–
		Promedio	66.9039684	0.28102578	0.01274382	0.00700895	0.01991894
		Desv. Estándar	1.9889253	0.16225247	0.00103964	0.00417041	0.01150021
		Coef. Variación	3.0%	57.7%	8.2%	59.5%	57.7%
		u_A	1.14830657	0.11472982	0.00060023	0.00294893	0.01150021
		u_C	1.14830657	0.11472982	0.00060023	0.00294893	0.01150021
		Incert. Total (u)	1.62395072	0.16225247	0.00084886	0.00417041	0.01626375
9	Yamaha Nmax 155	P1	62.1138846	2.28895043	0.10764824	–	0.86884004
		P2	58.3567181	2.19855775	0.10045493	0.05334505	–
		P3	58.5201492	1.74596860	0.09962689	0.05231407	0.47939403
		Promedio	59.6635840	2.07782560	0.10257669	0.05282956	0.67411703
		Desv. Estándar	2.12359540	0.29092870	0.00441157	0.03050551	0.43519533
		Coef. Variación	3.6%	14.0%	4.3%	57.7%	64.6%
		u_A	1.22605838	0.16796776	0.00254702	0.02157066	0.30772957
		u_C	1.22605838	0.16796776	0.00254702	0.02157066	0.30772957
		Incert. Total (u)	1.73390839	0.23754229	0.00360203	0.03050551	0.43519533

En la tabla XIII, XIV y XV Presentan el promedio, el limite inferior y el limite superior para el contaminante así mismo como su relación en kilometraje, modelo, cilindraje, tipo de transmisión, norma y el valor mínimo, promedio y máximo asociado.

TABLE XIII. Tabla Resumen Parte A.

CO [g/km]				CO ₂ [g/km]			
Nivel o Categoría	Valor Promedio	Límite Inferior	Límite Superior	Nivel o Categoría	Valor Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
Total	3.08049882	0.28102578	8.789202889	Total	62.3859186	25.3166058	90.4919349
Kilometraje				Kilometraje			
<10,000 km	2.73609466	1.61194035	3.68875398	<10,000 km	65.7162574	53.6021077	90.4919349
>10,000 km	3.35602241	0.28102578	8.789202889	>10,000 km	59.7216477	25.3166058	80.4919349
Modelo				Modelo			
<2020	2.59356108	0.28102578	3.68875398	<2020	70.4928131	59.1074029	90.4919349
>2020	3.68917098	1.110346123	8.789202889	>2020	52,2523006	25.3166058	80.49416339
Cilindrada				Cilindrada			
<150	2.90253700	1.110346123	3.68875398	<150	61.6532464	25.31660583	90.4919349
>150	2.48314354	1.61194035	3.35443403	>150	64.9496415	53.6021077	76.2971753
Transmisión				Transmisión			
Automática	2.34803756	1.61194035	3.35443403	Automática	63.1872633	53.6021077	76.2971753
Mecánica	3.44672944	0.28102578	8.789202889	Mecánica	61.9850868	25.3166058	90.49193495
Norma				Norma			
Euro3	4.03756778	1.110346123	8.789202889	Euro3	58.16233463	25.3166058	80.4919349
Euro4	2.41845155	1.61194035	3.56568502	Euro4	67.91920887	53.60210771	90.49193495
Euro5	0.28102578	0.28102578	0.281025784	Euro5	66.9039684	66.9039684	66.9039684

TABLE XIV. Tabla Resumen Parte B.

HC [g/km]				NO [g/km]			
Nivel o Categoría	Valor Promedio	Límite Inferior	Límite Superior	Nivel o Categoría	Valor Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
Total	0.08071613	0.00700894	0.24812526	Total	0.081103818	0.01274381	0.14119260
Kilometraje				Kilometraje			
≤10,000 km	0.06825190	0.03732929	0.10004305	≤10,000 km	0.10775019	0.09255597	0.14119260
>10,000 km	0.09068751	0.00700894	0.24812526	>10,000 km	0.05978671	0.01274381	0.12294711
Modelo				Modelo			
≤2020	0.06477445	0.00700894	0.10004305	≤2020	0.09440323	0.01274381	0.14119260
>2020	0.10064322	0.03732929	0.24812526	>2020	0.06447954	0.02738262	0.09467552
Cilindrada				Cilindrada			
≤150	0.07499717	0.05520458	0.10004305	≤150	0.08767224	0.09467552	0.12294711
>150	0.05925716	0.03732929	0.08118502	>150	0.10881132	0.09467552	0.12294711
Transmisión				Transmisión			
Automática	0.05711462	0.03732929	0.08118502	Automática	0.10673310	0.09467552	0.12294711
Mecánica	0.09251688	0.00700894	0.24812526	Mecánica	0.06829881	0.01274381	0.14119260
Norma				Norma			
Euro3	0.10584686	0.05520458	0.24812526	Euro3	0.07574914	0.02738262	0.12294711
Euro4	0.06340036	0.09467552	0.100043052	Euro4	0.11281493	0.09467552	0.14119260
Euro5	0.00700894	0.00700894	0.00700894	Euro5	0.012743815	0.012743815	0.012743815

TABLE XV. Tabla Resumen Parte C.

Pm [mg/km]			
Nivel o Categoría	Valor Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
Total	0.54882864	0.01991894	1.08189894
Kilometraje			
≤10,000 km	0.65293233	0.35916777	1.08189894
>10,000 km	0.46554569	0.01991894	0.93831713
Modelo			
≤2020	0.642159525	0.01991894	1.08189894
>2020	0.432165045	0.22061967	0.77033193
Cilindrada			
≤150	0.54404126	0.22061967	1.08189894
>150	0.64874245	0.35916777	0.93831713
Transmisión			
Automática	0.65720064	0.35916777	0.93831713
Mecánica	0.49464264	0.01991894	1.08189894
Norma			
Euro3	0.67794169	0.22061967	1.08189894
Euro4	0.50993464	0.35916777	0.67794169
Euro5	0.01991894	0.01991894	0.01991894

B. CO2 Equivalente:

Con la información tomada del AMVA[30] se realizaron las conversiones pertinentes para la conversión de los diversos contaminantes a CO2 Equivalente para 20, 50 y 100 años, como se muestra en la Tabla ??.

TABLE XVI. Resumen de emisiones de CO2 equivalente (CO2eq) basadas en el GWP.

GWP	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	HC [g/km]	Total [CO2eq (ton/año)]
[g/km]	62.38591869	3.08049882	0.08110381867	0.08071613129	-
[ton/km]	0.00006238591869	0.0000308049882	0.0000008110381867	0.0000008071613129	-
[ton/año]	91885.2716	4537.121143	119.453982	118.8829755	-
GWP20 [CO2eq (ton/año)]	91885.2716	4537.121143	32610.93707	9653.297614	138686.6274
GWP50 [CO2eq (ton/año)]	91885.2716	4537.121143	32610.93707	99428.96543	228462.2952
GWP100 [CO2eq (ton/año)]	91885.2716	4537.121143	32610.93707	3316.835018	132350.1648

C. *Análisis Comparativo de Emisiones de CO₂ en Diferentes Estudios:*

Diversos estudios han abordado el análisis de emisiones de motocicletas y vehículos en diferentes contextos, contribuyendo al conocimiento de los factores de emisión y su impacto ambiental. A continuación, se presentan algunos de los más relevantes.

El estudio titulado *Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia* [7] realizó una caracterización de ciclos de conducción para vehículos livianos, de carga pesada y motocicletas. Mediante el uso de bancos de rodillos y sensores especializados, se midieron parámetros como la relación aire-combustible (A/C) y el flujo másico de admisión. Además, se evaluaron las variaciones de emisiones en diferentes ciudades con distintas elevaciones sobre el nivel del mar y se estimaron emisiones totales basadas en los factores de emisión medidos.

Por su parte, el estudio *Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá* [16] definió ciclos representativos de conducción tomando en cuenta la topografía local, el comportamiento del tráfico y los patrones de conducción. Se emplearon equipos como el Horiba OBS ONE-GS para medir gases y el ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) para partículas PM_{2.5}. Este trabajo también caracterizó el parque automotor en función del tipo de combustible y utilizó el modelo LEAP (Low Emissions Analysis Platform) para calcular las emisiones generadas por fuentes móviles. En particular, se tomaron valores de factores de emisión para motocicletas de inyección electrónica de 125 cc y 150 cc.

Otro estudio, *Determinación del Desempeño Energético y Ambiental de una Motocicleta Dos Tiempos Convertida a Eléctrica* [33], [34], se enfocó en la caracterización de factores de emisión mediante un balance espirométrico del flujo másico de gases contaminantes, comparándolos con normativas colombianas e internacionales. Como parte de sus propuestas, este trabajo planteó e implementó la conversión de una motocicleta de combustión a un motor eléctrico.

En Cartagena Colombia, el estudio *Estimation of the Vehicle Emission Factor in Different Areas of Cartagena de Indias* [35] identificó los sectores con mayor flujo vehicular y realizó mediciones de emisiones utilizando un equipo modelo B40-5030-10 de la marca BEAR. Las pruebas se realizaron con motocicletas en estado de reposo y funcionando a ralentí.

El artículo *Air Pollutant Emission Factors from New and In-Use Motorcycles* [36], publicado en China-Taiwán, adoptó el ciclo de conducción ECE propuesto por el Foro Mundial para la Armonización de Reglamentaciones sobre Vehículos. En este estudio, se evaluaron 19 motocicletas (de 2 y 4 tiempos) utilizando el equipo Horiba MEXA-8320 para medir emisiones de CO, NO_x y THC.

En Teherán, Irán, el trabajo *An Assessment of Gasoline Motorcycle Emissions Performance in Tehran* [37] seleccionó 64 motocicletas representativas para evaluar emisiones en un ambiente controlado. Se emplearon dispositivos PEMS (Portable Emissions Measurement Systems), como el Horiba ONE para

gases, y un impactador eléctrico (Dekati) para partículas. Los resultados fueron comparados con los límites establecidos por la norma EURO-3 para evaluar el desempeño ambiental.

Finalmente, el estudio *Emission Characterisation of Motorcycles in Hanoi, Vietnam* [38] sintetizó rutas mediante seguimiento GPS en 12 distritos urbanos de Hanoi. Utilizando datos experimentales de emisiones contaminantes (CO, HC, NO_x, entre otros) procesados con el modelo IVE (International Vehicle Emissions), calcularon factores de emisión y analizaron el impacto ambiental de las motocicletas en el tráfico urbano.

TABLE XVII. Comparativa de Factores de Emisión en Diversos Estudios

Zona o Estudio	CO [g/km]	CO ₂ [g/km]	HC [g/km]	NO [g/km]	PM [mg/km]
Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para Colombia [7]	7.6	47	0.378	0.064	0.68
Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá [16]	0.99 ±0.05	73.4	0.029 ±0.001	-	0.07 ±0.02
	2.99 ±0.31	67.6	0.074 ±0.022	-	0.10 ±0.07
Determinación del Desempeño Energético y Ambiental de una Motocicleta Convertida a Eléctrica [34]	9.89	14.73	4.32	-	-
Estimation of the Vehicle Emission Factor in Cartagena [35]	9.89	14.73	4.32	-	-
Air Pollutant Emission Factors from Motorcycles [36]	36.10 ±13.58	-	3.20 ±0.56	0.25 ±0.13	-
An Assessment of Motorcycle Emissions in Tehran [37]	15.63	-	-	0.070 ±0.010	-
Emission Characterisation in Hanoi, Vietnam [38]	4.797 ±1.83	72.55 ±6.4	0.239 ±0.037	-	0.053 ±0.006

A partir del análisis de los factores de emisión obtenidos en este estudio, es evidente que las motocicletas en el Valle de Aburrá presentan patrones de emisión que, en algunos casos, son comparables con los reportados en estudios previos de la literatura. Por ejemplo, el factor promedio de emisión de CO₂ encontrado en este trabajo (62.39 g/km) es similar al reportado por [16] para motocicletas en Medellín (67.6 g/km). Esto

destaca la consistencia en las emisiones de CO₂ para motocicletas de inyección electrónica, confirmando que la topografía local y los patrones de conducción tienen un impacto significativo en las emisiones, como también lo mencionan estudios realizados en otras regiones con características similares.

Sin embargo, al comparar los valores de CO, NO y HC, se observan discrepancias importantes. Por ejemplo, el valor promedio de CO encontrado en este estudio (3.08 g/km) es menor que los 7.6 g/km reportados por [7] para Colombia, pero mayor que el rango de 0.99 a 2.99 g/km identificado en Medellín por [16]. Estas diferencias pueden deberse a variaciones en la tecnología de los vehículos (como el uso de inyección electrónica frente a carburadores) o a las normativas ambientales vigentes en cada región, como las adoptadas en Medellín basadas en la norma Euro-3. Además, el estudio realizado en Hanoi, Vietnam, reporta emisiones de HC (0.239 g/km) y NO (0.070 g/km) similares a las encontradas en este trabajo (0.081 g/km para NO y 0.0807 g/km para HC), lo que refuerza la idea de que el comportamiento de emisiones de motocicletas en áreas urbanas densamente pobladas sigue patrones comunes, independientemente del contexto geográfico.

Estas comparaciones destacan tanto las similitudes como las particularidades de las emisiones de motocicletas, subrayando la necesidad de estudios locales detallados para comprender y mitigar el impacto ambiental de este sector.

VII. CONCLUSIONES

El sector automotriz en Colombia ha mostrado una tendencia creciente, particularmente en el segmento de motocicletas. Esto se debe, en gran medida, al auge de la digitalización y el comercio electrónico, que ha incrementado la demanda de servicios de entrega a domicilio. Un ejemplo destacado es Rappi, que facilita la incorporación de pequeños restaurantes al comercio digital [39]. Las motocicletas, consideradas como el medio de transporte personal motorizado más asequible y versátil [40], han desempeñado un papel clave en esta transformación. Sin embargo, en el Valle de Aburrá, la combinación de una demanda creciente de motocicletas [41], condiciones geográficas particulares y un crecimiento industrial significativo (19% en 2023) [42], ha contribuido a un aumento notable en la contaminación del aire. Entre 2020 y 2023, las concentraciones de PM_{2.5} en la región superaron los 35 µg/m³, destacando la urgencia de abordar esta problemática [43], [44].

En esta investigación, se emplearon métodos estadísticos como la estadística descriptiva, matrices de correlación y visualización gráfica para analizar y depurar los datos. Esto permitió identificar y descartar pruebas con datos atípicos y distribuciones anómalas que afectaban indicadores clave como la media y la mediana. Gracias a este enfoque, se generaron factores de emisión confiables y consistentes, con niveles adecuados de desviación estándar y coeficiente de variación. Los resultados obtenidos muestran una alta concordancia con investigaciones previas realizadas por otras entidades, fortaleciendo la validez de los datos.

Los factores de emisión calculados para motocicletas con inyección electrónica de combustible en el Valle de Aburrá fueron los siguientes: 3.08 g/km de CO, 62.38 g/km de CO₂, 0.80 g/km de HC, 0.081 g/km de NO y 0.58 mg/km de PM. Estas cifras se traducen, anualmente, en emisiones de 91,885 toneladas de CO₂, 4,537 toneladas de CO, 119 toneladas de NO, 118 toneladas de hidrocarburos y 0.808 toneladas de material particulado. Estos resultados se alinean con los rangos reportados en investigaciones previas para la región, como las estimaciones de CO₂ equivalente (CO₂eq) calculadas con un GWP de 50, que alcanzan un total de 228,462 toneladas al año.

Se observa una ligera variación en los factores de emisión al comparar este trabajo con estudios previos, como el de FECOC [7]. Una posible causa de esta discrepancia es la metodología utilizada. Mientras que FECOC analizó las emisiones con motocicletas operando a diferentes niveles sobre el nivel del mar y bajo condiciones de "motor caliente", este estudio evaluó las emisiones desde un estado inicial en "motor frío". Esto introduce un componente adicional de realismo, ya que, en el mundo real, la mayoría de los conductores comienza su recorrido con motores a temperatura ambiente. En promedio, el catalizador y los filtros de las motocicletas tardan aproximadamente seis minutos en alcanzar su temperatura óptima de funcionamiento, lo que podría explicar las diferencias observadas. Este enfoque permite una caracterización más precisa y representativa de las emisiones generadas en las condiciones típicas del Valle de Aburrá.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Á. M. V. de Aburrá., “Contaminación atmosférica y efectos en la salud,” *ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN DE CORTO Y LARGO PLAZO*, vol. 7, 2019.
- [2] U. E. Carlos Mario Castaño, “Episodio de calidad del aire en marzo de 2020,” 2021.
- [3] Á. M. V. de Aburrá. “Se declara estado de alerta por calidad del aire en el valle de aburrá.” (2020), [Online]. Available: <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/se-declara-estado-de-alerta-por-calidad-del-aire-en-el-valle-de-aburra.aspx> (visited on 02/27/2020).
- [4] H. T. W.T. Hung, *Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong*. 2007, pp. 115–128.
- [5] W. T. H. Y. Tong, “A framework for developing driving cycles with on-road driving data,” *Transport Review*, vol. 30, pp. 589–615, 2010.
- [6] J. F. Cartagena, “Desarrollo de un ciclo de conducción característico de las motocicletas del valle de aburrá. institución universitaria pascual bravo,” 2023.
- [7] C. C. U. Agudelo Santamaría J.R., “Fase 3: Determinación de los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas para colombia.,” *Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+*, 2023.
- [8] DatosMacro-Expansion, “Colombia - emisiones de co2,” *Expansión*, 2022.
- [9] J. M. Rocío Román, “Analysis of the main drivers of co2 emissions changes in colombia (1990–2012) and its political implications,” *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 420–411, 2017.
- [10] Ideam. “Emisiones de aire.” (2018), [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/emisionesaire> (visited on 2018).
- [11] U. de Planeación Minero Energética - Subdirección de demanda, “Informe 2022,” *Proyección de Demanda de Energéticos*, 2022.
- [12] M. Hermelin, “Valle de aburrá: ¿quo vadis?” *Gestión y Ambiente*, vol. 10(2), pp. 07–16, 2007.
- [13] Á. M. V. de Aburrá. “Condiciones especiales del valle de aburrá.” (2019), [Online]. Available: <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales#:~:text=TOPOGRAF%C3%8DA&text=La%20configuraci%C3%B3n%20del%20valle%20ubicado,contaminantes%20y%20dificulta%20su%20remoci%C3%B3n>.
- [14] A. UPB., “Actualización inventario de emisiones atmosféricas del valle de aburrá - año 2018,” 2019.
- [15] U. de Planeación Minero Energética - UPME., “Realizar un estudio que permita identificar las clases de vehículos y modalidades de transporte susceptibles de realizar el ascenso tecnológico hacia tecnologías de cero y bajas emisiones a nivel nacional.,” 2020.
- [16] F. d. I. d. I. U. d. A. Área Metropolitana Valle de Aburrá, “Factores de emisión de fuentes móviles en el valle de aburrá,” 2019.
- [17] M. O. Alguero. “Sabaneta es el municipio que más vendió motos en colombia para abril de 2024, ¿cuántas matriculó?” (2024), [Online]. Available: <https://www.elcolombiano.com/negocios/ventas-de-motos-en-colombia-se-disparan-33-en-abril-yamaha-akt-y-bajaj-lideran-OM24398897>.

- [18] Publimotos. “Con 21 años de retraso, Colombia implementará la normativa euro 3 para motocicletas.” (2019), [Online]. Available: <https://publimotos.com/normatividad/colombia-implementara-la-normativa-euro-3-para-motocicletas/>.
- [19] F. Antioquia. “Aumentaron las matrículas de vehículos en Medellín y el Valle de Aburrá.” (2022), [Online]. Available: <https://www.fenalcoantioquia.com/blogs/post/aumentaron-las-matriculas-de-vehiculos-en-medellin-y-el-valle-de-aburra>.
- [20] J. D. L. Echeverri, A. F. A. Santamaría, and J. R. A. Santamaría, “Estudio de las emisiones de material particulado (masa y número) de motocicletas en el Valle de Aburrá,” Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/curso_emisiones/Sesion-9-MP-en-Motos-Discusion.pdf.
- [21] K. Ropkins, “Real-world motorcycle emissions,” in *9th UCR International PEMS Conference*, University of Leeds, 2019. [Online]. Available: https://www.cert.ucr.edu/sites/default/files/2019-05/18_kropkins_pems2019_slides_20190307_final.pdf.
- [22] H.-O. Pörtner, “Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,” *Cambridge University Press*, 2022.
- [23] A. Savitzky and M. J. E. Golay, “Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures,” *Analytical Chemistry*, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639, 1964. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac60214a047>.
- [24] Londoño, Javier, “Estudio de emisiones en motocicletas en el Valle de Aburrá,” 2021. [Online]. Available: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/22024/1/LondonoJavier_2021_EstudioEmisionesMotocicletas.pdf (visited on 11/15/2024).
- [25] The American Society of Mechanical Engineers, *Test Uncertainty, Performance Test Codes* (ASME PTC 19.1). New York: ASME, 2013.
- [26] IBM México. “¿qué es el reporte de gases de efecto invernadero (ghg)?” (2024), [Online]. Available: <https://www.ibm.com/mx-es/topics/ghg-reporting>.
- [27] Eurofins Environment España. “Ghg protocol - eurofins environment españa.” (2024), [Online]. Available: <https://www.eurofins-environment.es/es/ghg-protocol/>.
- [28] A. F. Agudelo, J. R. Agudelo, and P. N. Benjumea, *Diagnóstico de la Combustión de Biocombustibles en Motores*. Imprenta Universidad de Antioquia, 2007.
- [29] Medellín Cómo Vamos, *Informe de calidad de vida 2020-2023*, 2023. [Online]. Available: <https://www.eafit.edu.co/noticias/agenciadenoticias/2024/La-confianza-y-la-calidad-de-vida-se-deterioraron-en-el-ultimo-cuatrenio-en-Medellin>.
- [30] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, *Resultados encuesta de origen-destino 2023*, 2023. [Online]. Available: <https://www.medellincomovamos.org/informe-calidad-de-vida-2020-2023>.
- [31] A. H. de Carbono. “¿qué es el potencial de calentamiento global o pcg?” (2024), [Online]. Available: <https://alpuhuelladecarbono.com/que-es-el-potencial-de-calentamiento-global-o-pcg/>.
- [32] I. P. on Climate Change (IPCC), *Global warming potential (gwp) values: 2024 update*, 2024. [Online]. Available: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.

- [33] V. y. D. T. Ministerio de Ambiente, *Resolución 910 de 2008: Por la cual se establecen los niveles permisibles de emisión de contaminantes para fuentes móviles y se dictan otras disposiciones*, Normativa técnica colombiana para la medición de gases en motocicletas, motociclos, y otros vehículos similares, 2008. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/>.
- [34] C. S. Jiménez, Á. D. Mejía, and B. Á. Arboleda, “Determinación del desempeño energético y ambiental de una motocicleta dos tiempos convertida a eléctrica para el mejoramiento del tránsito, la seguridad y la gestión vial,” *Institución Universitaria Pascual Bravo*, 2023.
- [35] y. B. A. R.-G. Antonio H. Quiroz-Gutiérrez Johana I. Espitia-Pinedo, “Estimación del factor de emisión vehicular en diferentes áreas de cartagena de indias,” *Revista de Ciencias*, vol. 26, no. 4, pp. 54–65, 2022. [Online]. Available: https://revistaciencias.univalle.edu.co/index.php/revista_de_ciencias/article/view/8949.
- [36] J.-H. Tsai, Y.-C. Hsu, H.-C. Weng, W.-Y. Lin, and F.-T. Jeng, “Air pollutant emission factors from new and in-use motorcycles,” *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 28, pp. 4747–4754, 2000. [Online]. Available: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-17dd4270-19e4-3935-99a3-1a58178523ed>.
- [37] A. Hassani and V. Hosseini, “An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to tehran air pollution,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 45, pp. 11–20, 2016.
- [38] V. Nguyen, T. Hoang, and Q. Phung, “Emission characterisation of motorcycles and the potential of co-benefits from selected development scenarios in the urban ecosystem of hanoi, vietnam,” *Science of the Total Environment*, vol. 716, pp. 136–145, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.137065. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/338310363>.
- [39] Rappi, *Rappi: La superapp para pedidos y domicilios*, 2023. [Online]. Available: <https://about.rappi.com/es/inicio>.
- [40] ANDI, *Las motocicletas en colombia: Aliadas del desarrollo del país*, 2023. [Online]. Available: [https://www.andi.com.co/Uploads/Estudio%20-%20Las%20Motocicletas%20en%20Colombia%20Aliadas%20del%20desarrollo%20del%20pa%C3%ADs%20-%20V17%20Final%20Design%20\(Lowered%20case\).pdf_compressed.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/Estudio%20-%20Las%20Motocicletas%20en%20Colombia%20Aliadas%20del%20desarrollo%20del%20pa%C3%ADs%20-%20V17%20Final%20Design%20(Lowered%20case).pdf_compressed.pdf).
- [41] S. de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá - SIATA. “Calidad de aire.” (2017), [Online]. Available: https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/calidad_aire.
- [42] C. Antioquia, *Dinámica laboral antioqueña valle de aburrá 2023*, 2023. [Online]. Available: https://www.antioquiacomovamos.org/system/files/2024-02/docuprivados/20231411_Informe_DL%20VdeA%20%281%29.pdf.
- [43] Infobae, *Contaminación en el valle de aburrá: La mala calidad del aire está afectando a niños y ancianos*, 2024. [Online]. Available: <https://www.infobae.com/colombia/2024/08/20/contaminacion-en-el-valle-de-aburra-la-mala-calidad-del-aire-esta-afectando-a-ninos-y-ancianos/>.
- [44] SIATA, *Informe de operación amva - 02/02/2022*, 2022. [Online]. Available: https://siata.gov.co/CalidadAire/InformesOperacion/Informe_AMVA_02022022.pdf.