

Universidad Tecnológica de Bolívar

**Estimación de emisiones
atmosféricas producidas por
las motos y el transporte
público en Cartagena -
Colombia**

Autora: Melissa González Castillo

Directora: PhD María Elena Huertas

Nota de aceptación:

Firma Jurado

Firma Jurado

Fecha:

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Tecnológica de Bolívar, programa de Ingeniería Civil y Ambiental y su apoyo en la financiación del proyecto de investigación “Impacto ambiental de las motos y el Transcribe en la calidad del aire de la ciudad de Cartagena”, elegido en la convocatoria interna “1ra. Convocatoria Interna TRFCI-1P2016”. Así mismo agradezco al profesor Enrique Darinel González Campos, quien lidero este proyecto y a todos los profesores involucrados en mi desarrollo profesional y personal.

Especialmente agradezco a mi tutora de tesis la Dra. María Elena Huertas Bolaños, quien desde un principio aportó su tiempo y dedicación al desarrollo de este trabajo y que continuamente, a pesar de la distancia y los obstáculos, con sus correcciones y consejos fue posible culminar.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia y especialmente a mis padres, por incentivar me y permitirme culminar esta etapa académica.

A mi madre Aquever Castillo Olarte, por su amor incondicional, por celebrar mis victorias y guiarme en los momentos difíciles.

A mi hermano Leonardo González Castillo, que las metas si se alcanzan y los sueños si se cumplen.

A mi Madri, por siempre ser la voz de la razón y como una madre para mí.

A Raúl Arana, por su apoyo y cariño incondicional, por permitirme compartir a su lado y crecer juntos.

Dedico este trabajo a todas las mujeres que estudian y trabajan en el área de las CTIM, espero que sirva como ejemplo para futuras generaciones de mujeres, así como sus trabajos y sus logros han sido ejemplo para mí.

A todos mis amigos que han hecho parte de este proceso y han aportado su granito de arena en la realización de este trabajo.

Y finalmente a mí, por lograr vencer mis miedos y alcanzar esta nueva meta.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	12
2. Marco teórico	14
2.1. Estimación de emisiones en fuentes móviles.....	14
2.1.1. Medición directa.....	14
2.1.2. Medición indirecta.....	16
2.1.3. Emisiones producidas por motocicletas.....	17
2.2. Ciclos de conducción	19
3. Estado del arte	24
4. Objetivos	31
5. Metodología	32
5.1. Determinación del ciclo de conducción representativo.....	33
5.1.1. Aforos vehiculares y selección de la ruta.....	33
5.1.2. Depuración y caracterización de los ciclos de conducción	36
5.1.3. Elección del ciclo representativo.....	38
5.2. Estimación de emisiones mediante el modelo IVE.....	39
5.2.1. Potencia específica vehicular y estrés del motor	42
5.2.2. Factores de emisión	43
5.3. Determinación del CO ₂ Equivalente	44
6. Resultados	46
6.1. Determinación del ciclo de conducción	46
6.1.1. Aforos vehiculares	46
6.1.2. Ciclos de conducción representativos	49
6.1.3. Parámetros característicos de los ciclos de conducción.....	51
6.2. Estimación de emisiones.....	53
7. Análisis de resultados	56
7.1. Ciclos de conducción en las vías de Cartagena.....	56
7.2. Emisiones de motocicletas y transporte público en la ciudad de Cartagena	57

7.3. Factor de emisión.....	59
7.4. Inventario de emisiones	64
7.5. Determinación del CO ₂ equivalente.....	65
8. Conclusión	66
9. Trabajo futuro	68
10. Referencias	69

Lista de Figuras

Figura 1: Funcionamiento básico de un motor de combustión interna.	18
Figura 2: Ciclo de conducción FTP 75.	20
Figura 3: Ciclo de conducción Japonés modo 10-15.....	21
Figura 4: Ciclo de conducción WMTC.	22
Figura 5: Metodología utilizada en la investigación.	33
Figura 6: Ruta seleccionada y ubicación de aforos.	35
Figura 7. Datos requeridos por el modelo IVE.....	40
Figura 8: Potencial de Calentamiento Global.	44
Figura 9. Aforo vehicular sentido Cartagena – Mamonal.	47
Figura 10. Aforo vehicular sentido Mamonal - Cartagena.	48
Figura 11. Ciclo de conducción representativo para día de semana (panel superior) y sábado (panel inferior), sentido Cartagena – Mamonal.....	49
Figura 12. Ciclo de conducción representativo para día de semana (panel superior) y sábado (panel inferior), sentido Mamonal-Cartagena.....	51

Lista de tablas

Tabla 1: Métodos de medición directa.....	15
Tabla 2: Características del equipo VBOX Sport.....	36
Tabla 3. Información ingresada al modelo IVE.....	41
Tabla 4: Características de la flota vehicular.....	42
Tabla 5: Comparación ciclos de conducción del Corredor de Carga.....	53
Tabla 6: Emisiones producidas en el Corredor de Carga.....	54
Tabla 7: Comparación de los ciclos representativos de la ciudad de Cartagena ..	56
Tabla 8: Emisiones producidas por motocicletas en las principales vías de Cartagena.....	57
Tabla 9: Comparación emisiones ciclos reales vs emisiones ciclos representativos	60
Tabla 10: Contaminantes Criterio emitidos por el transporte público y las motos en la ciudad de Cartagena.....	58
Tabla 11: Factor de emisión de motos en la ciudad de Cartagena.	61
Tabla 12: Factores de emisiones	63
Tabla 13: Inventario de emisiones de fuentes móviles de la ciudad de Cartagena.	64
Tabla 14: CO ₂ equivalente producido por motocicletas.....	65

Resumen

Cartagena de Indias tiene un sistema de transporte público que consiste en el sistema de transporte masivo Transcaribe, autobuses, taxis y motocicletas; este último no está legalizado y es equivalente al mayor número de vehículos en la ciudad (57%). El transporte es una de las fuentes de emisión más representativas de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero en áreas urbanas.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es crear un inventario de emisiones de contaminantes primarios y gases de efecto invernadero (GEI) producidos por motocicletas y transporte público en la ciudad de Cartagena (sin incluir taxis) mediante la estimación de emisiones producidas por motos y Transcaribe en el Corredor de Carga y la Avenida Pedro de Heredia, y la comparación de estos resultados con los reportados en estudios previos realizados en la Transversal 54.

Para el Corredor de Carga se creó un ciclo de conducción representativo (CDR) basado en el método de mínimas diferencias mientras que para la Avenida Pedro de Heredia se utilizaron los ciclos de conducción para motos y Transcaribe obtenidos por Hernandez, (2017). Para estimar las emisiones de los vehículos, se ejecutó el Modelo Internacional de Emisión de Vehículos (IVE) utilizando los CDR y las características de la flota vehicular como datos de entrada.

Los resultados obtenidos indican que el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) son los gases contaminantes mayormente emitidos por las motocicletas en el Corredor de Carga con 107,06 kg/hr y 32,9 kg/hr, respectivamente. Mientras, el CO₂ es el gas de efecto invernadero mayormente emitido por las motocicletas con 681,11 kg/hr. Pero al realizar la comparación de las tres vías principales, es en la

Avenida Pedro de Heredia en donde se genera la mayor cantidad de emisiones producidas por motos para cada uno de los contaminantes. Además, se identificó que los autobuses son los mayores emisores de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM).

Palabras clave: Ciclo de conducción, Contaminantes criterio, Gases de Efecto Invernadero.

Abstract

Cartagena de Indias has a public transport system consisting of the Transcaribe massive transport system, buses, taxis and motorcycles, the latter not legalized and it is equivalent to the largest number of vehicles in the city (57%). Transportation is one of the most representative sources of criteria pollutants and greenhouse gases in urban areas.

Therefore, the objective of this work is to create the emission inventory of primary pollutants and greenhouse gases (GHG) produced by motorcycles and public transport in the city of Cartagena (excluding taxis) by estimating emissions produced by motorcycles and Transcaribe in the Cargo Corridor and Avenida Pedro de Heredia, and the comparison of these results with those reported in previous studies for the Transversal 54.

For the Cargo Corridor, a representative driving cycle (CDR) was created based on the minimum differences method, meanwhile for the Pedro de Heredia Avenue the cycles of driving for motorcycles and Transcaribe obtained by Hernandez (2017) were used. In order to estimate the vehicle emissions, the International Vehicle Emission Model (IVE) was executed using RDCs and vehicle fleet characteristics as input - data.

The results indicate that carbon monoxide (CO) and volatile organic compounds (VOCs) are the pollutant gases most emitted by motorcycles in the Cargo Corridor with 107.06 kg / hr and 32.9 kg / hr, respectively. Meanwhile, CO₂ is the greenhouse gas mostly emitted by motorcycles with 681.11 kg / hr. But when comparing the three main roads, it is on Avenida Pedro de Heredia where the greatest amount of emissions produced by

motorcycles is generated for each of the pollutants. In addition, it was identified that buses are the largest emitters of nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter (PM).

Key words: Driving cycle, Criteria pollutants, Greenhouse gases.

1. Introducción

La ciudad de Cartagena de Indias - Colombia, cuenta con un sistema de transporte público constituido por: el Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM) Transcribe, los buses, los taxis y las motocicletas. Este último medio de transporte no está legalizado y equivale a la mayor cantidad de vehículos en el parque automotor de la ciudad (57%) (Cartagena Cómo Vamos, 2017). El uso de las motocicletas como transporte público ha surgido como una opción de empleo dada la facilidad de adquisición (bajo porcentaje de intereses en el tiempo liquidación y amplios plazos de pago), el bajo costo de mantenimiento, el bajo consumo de combustible y la agilidad en el desplazamiento con respecto a los automóviles y buses acompañado de la mala planificación del sistema de transporte público en la ciudad.

En los últimos años en Colombia se ha incrementado de manera acelerada el uso de motocicletas, de acuerdo con el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) el parque automotor registrado en el país para el año 2016 durante el mes de mayo fue de 12.283.401 vehículos, de los cuales las motocicletas representan el 55,60%. En Cartagena, área escogida para este estudio, el porcentaje de crecimiento de motocicletas desde el año 2014 hasta el año 2015 fue del 17,6%; el incremento ha sido mayor que en cualquier otro tipo de vehículo (Estrat, 2014).

Debido al gran aumento de motocicletas circulando en la ciudad y conociendo que el transporte contribuye en un 80% de las emisiones atmosféricas totales en ciudades y asentamientos (Bespalov et al., 2016), se vuelve de interés cuantificar los contaminantes

emitidos a la atmósfera producidos por las motocicletas y el transporte público de la ciudad de Cartagena. Esta información es relevante para la adecuada gestión del transporte público y regulación ambiental que pueda ser aplicada en la ciudad. Debido a este interés, el presente trabajo se centra en realizar la estimación de las emisiones producidas por las motocicletas en dos de las principales vías de la ciudad de Cartagena (Corredor de Carga), haciendo uso de una metodología que integra la selección de un ciclo representativo de conducción y el cálculo de las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero mediante el modelo IVE (International Vehicle Emissions). Para llevar a cabo la estimación de emisiones de las motocicletas, fue indispensable crear un ciclo de conducción representativo que caracterizara el tráfico de Cartagena, debido a que las condiciones de tránsito de nuestra ciudad no son representadas en ciclos de conducción estándar como el FTP-75 (Federal Test Procedure 75, por sus siglas en inglés) utilizado en Estados Unidos de América, y el Ciclo 10-15 utilizado en Japón.

Los resultados obtenidos son complementarios a los trabajos previos realizados en el marco del proyecto de investigación “Impacto ambiental de las motos y el Transcaribe en la calidad del aire de la ciudad de Cartagena”, el cual fue financiado por la Universidad Tecnológica de Bolívar en la convocatoria interna “1ra. Convocatoria Interna TRFCI-1P2016”. En este sentido, el presente trabajo muestra los resultados finales del proyecto de investigación presentando la construcción de un inventario de emisiones que incluye los buses, el SITM Transcaribe y las motocicletas que transitan por la ciudad.

2. Marco teórico

2.1. Estimación de emisiones en fuentes móviles


Las emisiones atmosféricas en Colombia se definen según el artículo 2º del decreto 948 de 1995 como “la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de éstos, proveniente de una fuente fija o móvil.” Las fuentes móviles son aquellas susceptibles a desplazarse como son los vehículos de transporte a motor y los compuestos emitidos más estudiados son el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm (PM₁₀) (Granada & Cabrera, 2007). Para estimar las emisiones producidas por fuentes móviles existen dos metodologías principales, medición directamente en la fuente o determinación indirecta de las emisiones.

2.1.1. Medición directa

Consiste en pruebas mediante las cuales son recolectados los gases de escape de un vehículo, bajo condiciones establecidas y en un tiempo determinado, mediante un analizador de gases que mide la concentración de los contaminantes. Estas pruebas se pueden clasificar en:

- **Pruebas Estáticas:** Son aquellas pruebas de emisiones durante las cuales no se aplica carga externa al vehículo y, mientras se efectúa la medición, éste opera con la transmisión en neutro, es decir en estado ralentí.

Tabla 1. Métodos de medición directa.

Método	Descripción	Imagen
Sensor remoto	<p>Basado en la detección de emisiones vehiculares que pasan en un punto de control a través de un haz de rayos infrarrojos y/o rayos ultravioletas.</p> <p>Se determinan los cambios en las concentraciones de contaminantes en el instante que pasa un vehículo, incluyendo el CO₂, CO, HC y NO_x, e incluso puede ser posible medir las partículas.</p>	 <p>(SEMARNAT, 2019)</p>
Medición a bordo	<p>Permite medir las emisiones directas procedentes de un vehículo en operación mediante el uso de un analizador de gases conocido como sistema portátil de medición de emisiones (PEMS por sus siglas en inglés) el cual es lo suficientemente pequeño y ligero para ser utilizado mientras el vehículo está en operación.</p> <p>Es un método costoso, pero se obtiene información precisa sobre las condiciones de operación del vehículo.</p>	 <p>(MAHA, 2001)</p>
Prueba en dinamómetro	<p>Las pruebas de dinamómetro se llevan a cabo en condiciones controladas donde a los vehículos se les aplica una carga conocida para representar la operación normal.</p> <p>La inversión inicial para la construcción del dinamómetro es muy alta, aunque una vez que se tienen las instalaciones operando, las pruebas no tienen un costo muy elevado.</p>	 <p>(Lesman.com, 2019)</p>

Fuente: (INECC-SEMARNAT, 2013)

- **Pruebas Dinámicas:** Son aquellas en las que se aplica una carga externa al motor, por lo cual durante la prueba se debe operar el vehículo con la transmisión

en una posición distinta de neutro (Estrada Alarcón, 2008). Estas pruebas son usualmente realizadas sobre dinamómetros de chasis o en condiciones de operación real de los vehículos.

El costo asociado al equipo requerido para la realización de las pruebas de medición directa es muy elevado y en ocasiones resulta poco viable para los proyectos de investigación que cuentan con recursos financieros limitados. Los métodos de medición directa más utilizados son los descritos en la Tabla 1.

2.1.2. Medición indirecta

Las metodologías de estimación indirecta utilizan correlaciones mediante la implementación de software para estimar las emisiones utilizando diversos parámetros como la meteorología y geografía del lugar. Para ello, se hace uso de los modelos de estimación de emisiones establecidos internacionalmente, los cuales utilizan la información adquirida a través de los métodos directos ajustada a las condiciones teóricas de cada modelo (Clean Air Institute, 2013) .

Los modelos de estimación de emisiones vehiculares más utilizados alrededor del mundo son el Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES por sus siglas en inglés) el cual permite estimar las emisiones de fuentes móviles en ruta al cargar un patrón de conducción fijo y realizar ajustes aproximados basado en las velocidades en ruta, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA); y el Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT por sus siglas en inglés), desarrollado por la Agencia Ambiental Europea (EEA), que consiste en una herramienta

para calcular emisiones provenientes de vehículos que estén tanto en circulación como fuera de camino. Debido a que estos modelos de estimación de emisiones fueron desarrollados para ciudades con ciertas características específicas, presentan inconvenientes al momento de calcular los factores de emisión vehicular para países en vía de desarrollo. Por esta razón, la Universidad de California en Riverside (UCR) financiada por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos elaboró el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE Model, por sus siglas en inglés), con el objetivo de suplir las necesidades de estos países en la realización de inventarios de emisiones de fuentes móviles.

2.1.3. Emisiones producidas por motocicletas

Las emisiones producidas por las motocicletas son generadas a partir del funcionamiento del motor de combustión interna, este es la unidad generadora de trabajo más ligera y de considerable autonomía que permitió alcanzar grandes velocidades con un vehículo tan pequeño como las motocicletas. El motor de combustión interna es una máquina térmica que convierte la energía química de un combustible en energía mecánica, usualmente para mover un eje. Como se aprecia en la Figura 1, en la cámara de combustión se mezcla el combustible con aire repartido por todo el volumen del cilindro. Cuando la mezcla (aire – combustible) es comprimida, el combustible reacciona con el oxígeno del aire generando una explosión que aumenta la presión y la temperatura del gas, expandiéndose y empujando el pistón con una fuerza lo suficientemente grande para ser desplazado hacia abajo y generar trabajo (Martínez Villegas, 2007). Posteriormente, los gases generados en el proceso de combustión son liberados al tubo de escape de los

vehículos. Los motores se pueden clasificar en motores de dos o cuatro tiempos, según los ciclos que se requieran para realizar el trabajo o movimiento del vehículo.



Figura 1. Funcionamiento básico de un motor de combustión interna. Fuente: (Imacapacitacion.com, 2018)

A diferencia del motor de dos tiempos, el motor de cuatro tiempos genera menos emisiones de NOx (Lopez Palancar, 2008) y de CO₂ debido a su mayor precisión en la dosificación de combustible inyectado (Celoni, 2007).

Para más detalle del funcionamiento de los motores, referirse a: Jennings & Jennings (2007), Martínez Villegas (2007) y Centro de Estudios de la Motocicleta (2014)

2.2. Ciclos de conducción

La relación velocidad - tiempo representa una forma típica de conducir en una ciudad o autopista y es conocida como ciclo de conducción, tomando a consideración las características del tráfico, la tecnología del vehículo, las características de la carretera y las características climáticas y geográficas.

Algunos de los objetivos de los ciclos de conducción consisten en planear adecuadamente una ciudad, diseñar vehículos y nuevas tecnologías. En términos ambientales, especialmente en lo referente a calidad del aire y control de emisiones, son utilizados para estimar las emisiones que producen los vehículos (González Oropeza, 2005).

Existen dos tipos de ciclos de conducción, los ciclos de conducción estándar o legislativos (de homologación) y los ciclos de conducción no estándar. Dentro de los ciclos estándar encontramos el FTP 75 (Federal Test Procedure de 1978) y el ciclo horario Japonés modo 10-15, que se utilizan actualmente en los Estados Unidos y Japón, respectivamente. Estos ciclos son realizados en dinamómetros de chasis y permiten a las entidades reguladores evaluar y controlar las emisiones de los vehículos nuevos, asegurándose que no sobrepasen los niveles máximos permitidos. A continuación, son descritos cada uno de los ciclos de homologación, incluyendo el Ciclo Mundial de Prueba de Motocicletas (WMTC por sus siglas en inglés).

Ciclo de conducción FTP 75: La Figura 2 presenta el ciclo de conducción FTP 75, el cual es el más utilizado y ha sido establecido por la Agencia de Protección Ambiental de

los Estados Unidos para la certificación de emisiones de vehículos ligeros y medianos (Grupo de Investigaciones Ambientales CIDI, 2008).

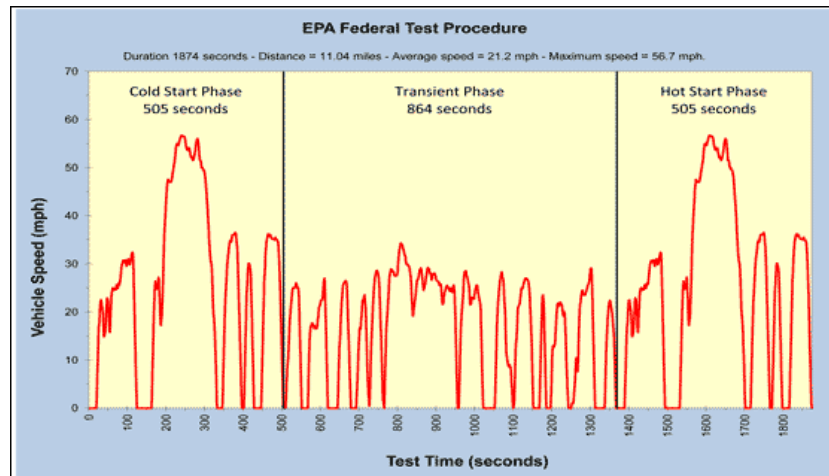


Figura 2. Ciclo de conducción FTP 75. Fuente: (US EPA, 2017)

Como se observa en la Figura 2 el FTP75 consta de tres fases:

- 1. Fase de arranque en frío:** se refiere al arranque inicial cuando el motor del vehículo está frío y en reposo. Tiene una duración de 505 segundos.
- 2. Fase de transición:** el vehículo sigue el patrón predeterminado por el ciclo de conducción mientras se completa un ciclo completo de encendido del motor. Tiene una duración de 864 segundos.
- 3. Fase de arranque en caliente:** en esta fase el ciclo se reinicia, pero esta vez el motor del vehículo, después de haber completado un ciclo completo de encendido se encuentra en condiciones de estrés diferentes debido a su aumento de temperatura por el trabajo realizado.

El FTP75 recorre una distancia de 17,77km, con una velocidad promedio de 34,1km/h y una duración de 1874s.

Ciclo Japonés de Conducción 10-15: La Figura 3 presenta el ciclo de conducción utilizado en Japón para pruebas de emisiones y economía de combustible para vehículos ligeros. Se deriva del ciclo japonés modo 10 y se le añade un segmento a una velocidad máxima de 70km/h.

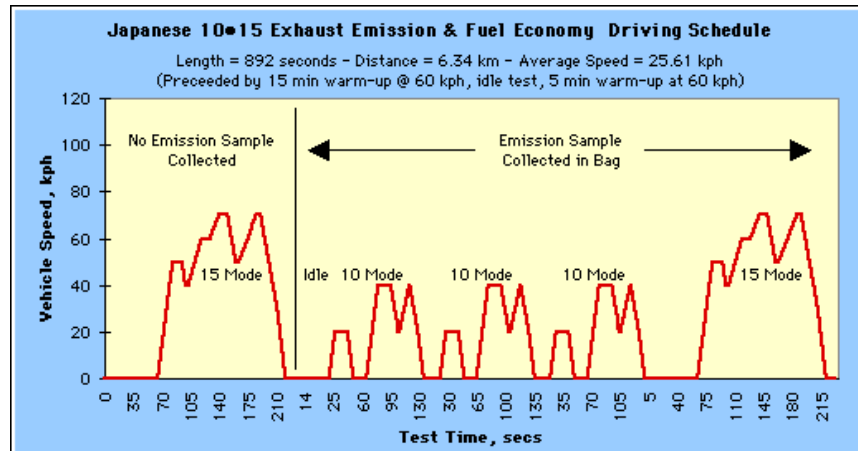


Figura 3. Ciclo de conducción japonés modo 10-15. Fuente: (US EPA, 2017)

El ciclo completo, como se muestra en la Figura 3, incluye una secuencia de calentamiento de 15 minutos a 60km/h y un segmento del ciclo modo 15, seguido de tres segmentos donde se repite el ciclo modo 10 y termina con un segmento del ciclo modo 15. Las emisiones se miden en los últimos cuatro segmentos. El ciclo recorre una distancia de 4,16km, a una velocidad promedio de 22,7km/h y tiene una duración de 660s sin incluir el segmento inicial donde no se toman datos (US EPA, 2017).

Ciclo Mundial de Prueba de Motocicletas (WMTC): La Figura 4 presenta el ciclo de conducción WMTC el cual es utilizado para medir el consumo de combustible y las emisiones producidas específicamente por motocicletas. Su metodología hace parte del Reglamento Técnico Global establecido en el Foro Mundial de las Naciones Unidas para

la Armonización de Reglamentos de Vehículos, también conocido como WP 29. El ciclo WMTC recorre una distancia total de 4065,26m, en un tiempo total de 600s y una velocidad promedio de 28,92 km/h. (Barlow, Latham, Mccrae, & Boulter, 2009).

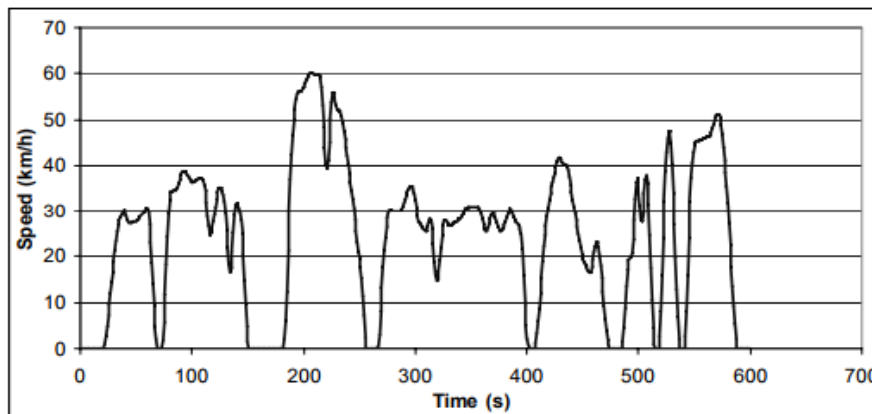


Figura 4. Ciclo de conducción WMTC. Fuente: (Barlow, et al., 2009)

Por otro lado, los ciclos de conducción no legislativos o ciclos de conducción reales, son representativos de las características de tráfico y hábitos de conducción de un lugar en específico (Tong, Hung, & Cheung, 1999). Los ciclos de conducción varían dependiendo de las condiciones características de cada lugar, aun así, todos tienen en común la misma serie de estados que se deben tener en cuenta (Sanabria Sandí, 2010):

1. **Estado ralenti:** es el régimen mínimo de revoluciones por minuto que presenta un motor para permanecer en funcionamiento sin necesidad de estar en movimiento. La velocidad es cero.
2. **Estado de aceleración:** porciones del ciclo con una razón de cambio de velocidad positiva mayor o igual a $0,1 \text{ m/s}^2$.

3. **Velocidad constante:** segmentos del ciclo con una razón de cambio de velocidad cuyo valor absoluto es menor a 0,1 m/s.
4. **Estado de desaceleración:** parte del ciclo con una razón de cambio de velocidad negativa menor o igual a -0,1 m/s².
5. **Periodo de conducción:** Fragmento de la curva de velocidad versus tiempo limitada en los extremos por secciones en estado ralenti (no incluye el tiempo ralenti).

Para construir un ciclo de conducción representativo es necesario tener los datos de velocidad en la ruta de estudio segundo a segundo. Al utilizar los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) se recauda información acerca de posicionamiento, navegación y cronometraje permitiendo hallar la velocidad del vehículo durante todo el recorrido.

3. Estado del arte

La preocupación por el cambio climático y la contaminación del aire generados por gases de efecto invernadero y contaminantes tóxicos provenientes de actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, ha ocasionado que los países tomen la decisión de implementar metodologías de medición de emisiones para determinar de manera cuantitativa la tendencia o comportamiento de estos gases, y obtener un diagnóstico de los contaminantes que están siendo emitidos, de tal manera que permita aplicar medidas de mitigación efectivas (IPCC, 2014).

De acuerdo al informe “El comercio internacional y la protección del medio ambiente: contradicción o complementariedad” de Do Amaral (2012), el sector del transporte es uno de los mayores emisores de gases a la atmósfera, como puede evidenciarse en los inventarios de emisiones realizados por Estados Unidos, Ciudad de México, y Colombia, en los cuales las emisiones de gases de efecto invernadero en CO₂ equivalente del sector de transporte representaron el 28% (U.S. EPA, 2018), 49% (CDMX, 2018) y el 15,19% (IDEAM, 2016) de sus emisiones totales en cada una de las respectivas regiones.

Por lo anterior, se han realizado diversos estudios que buscan detallar las emisiones provenientes de los vehículos. Por ejemplo, en el 2014 en Múrmansk, Rusia se monitorearon las partículas de diésel y las emisiones de carbono negro. Los resultados de este estudio revelaron que los vehículos diésel emiten 11,7 tons de carbono negro y que los principales factores que determinan el nivel de emisiones son la estructura de la flota y el nivel de control de emisiones de los vehículos (Kholod et al., 2016). Por otro

lado, en China se realizó un estudio sobre las tendencias de las emisiones vehiculares en la región que abarca las ciudades de Beijing-Tianjine-Hebei (BTH). Los análisis de las contribuciones de los diferentes tipos de vehículos a las emisiones vehiculares totales muestran que los Automóviles de Pasajeros (PC por sus siglas en inglés) y Vehículos Ligeros (LV por sus siglas en inglés) fueron las principales fuentes de emisiones de CO y COV. En la región de BTH, las motocicletas (MC) tuvieron un importante aporte a las emisiones de CO y COV vehiculares, pero las contribuciones fueron disminuyendo con la disminución de la proporción de MC en toda la flota. Por otro lado, los buses y los camiones de carga pesada (HDT) fueron las fuentes más representativas de emisiones de NOx vehicular y las emisiones de PM₁₀ en BTH. Sin embargo, los PC han sido otra fuente importante para la emisión de PM₁₀ vehicular en Beijing, debido al rápido crecimiento de esta población de (Lang et al., 2012).

Por otro lado, las motocicletas se han convertido en una importante fuente de contaminación para muchas ciudades del mundo. En Theran (Irán) se realizó un estudio con una muestra de 60 motocicletas con kilometrajes y ubicación de motores diferentes. Las motocicletas fueron evaluadas en un dinamómetro de chasis siguiendo los procedimientos de la norma de emisiones Euro 3. Sus resultados arrojaron que en promedio las emisiones de CO eran casi siete veces mayores a los límites establecidos por la certificación Euro 3 (Hassani & Hosseini, 2016). En Taiwan se realizó un estudio similar donde las motocicletas fueron seleccionadas para determinar su consumo de gasolina y emisiones por tubo de escape siguiendo el ciclo de conducción ECE (Europe Driving Cycle). Se obtuvieron valores medios de CO: 2,98 g/km, hidrocarburos totales

(THC): 0,98g/km, NOx: 0,21g/km, CO₂: 60,5 g/km. Los resultados indicaron que las emisiones de CO, THC y CO aumentan entre mayor kilometraje y tiempo de fabricación tengan las motocicletas (J. Tsai, Huang, & Chiang, 2017).

En la ciudad de Shenyang, China, se realizó un estudio para evaluar los co-beneficios del transporte público urbano. Se utilizó la base de datos de conducción de la Oficina de Protección Ambiental de Shangay (EPB por sus siglas en inglés), cuya información se obtiene mediante encuestas y ejecución del modelo IVE (International Vehicle Emission Model) para estimar las emisiones generadas por los vehículos. Los resultados indicaron que los autobuses que utilizan Gas Natural Comprimido (GNC) tienen los mejores resultados económicos y medioambientales globales, generando 206,614kg*año⁻¹*vehículo⁻¹ de COV, 1462,246kg*año⁻¹*vehículo⁻¹ de NOx, 6,259kg*año⁻¹*vehículo⁻¹ de óxidos de azufre (SOx), 592,317 kg*año⁻¹*vehículo⁻¹ de PM₁₀ y 61298,061 kg*año⁻¹*vehículo⁻¹ de CO₂ comparados con otros vehículos de transporte público (Geng et al., 2013).

Un inventario de emisiones vehiculares realizado en diferentes zonas urbanas de Chongqing, China, el cual hacía uso el modelo IVE en su metodología de estimación de emisiones, arrojó los siguientes resultados: los buses livianos representaron el 51,1% del parque vehicular y tienen una tasa de contribución de las emisiones totales del 71% de CO, 59% en COV, 48% en NOx y 44% en PM. En segundo lugar se obtuvo que las motocicletas, a pesar de representar el 11,4% de la flota vehicular, generan el 12% de CO y el 23% de COV de las emisiones totales (Feng, Wang, & Zhao, 2013).

También se utilizó el modelo IVE para la estimación de emisiones vehiculares en la ciudad de Delhi, India. Por medio de factores de emisión dinámicos, se encontró que las emisiones totales de CO, NOx y PM₁₀ se incrementaron en un 45,63%, 68,88% y 17,92%, respectivamente, desde el año 2003 hasta el año 2012 y las emisiones de NOx y PM₁₀ crecieron de forma continua con una tasa de crecimiento anual promedio de 5,4 % y 1,7% respectivamente (Mishra & Goyal, 2014). En esta misma ciudad se efectuó un estudio de emisiones en carretera de CO, CO₂ y NOx para vehículos de cuatro ruedas, arrojando como resultado bajas emisiones de CO y altas emisiones de NOx en los nuevos vehículos diésel (posteriores a 2010) en comparación con los coches viejos (posteriores a 2005). Finalmente, se evaluó la contribución del tipo de combustible: diesel, gasolina y GNC; para el total de las emisiones de CO fue de 7%, 84% y 9%; para CO₂ fue de 50%, 48% y 2% y de NOx fue de 58%, 41% y 1% respectivamente. Como conclusión se indicó que la edad y el mantenimiento del vehículo son factores importantes en la evaluación de las emisiones (Jaiprakash et al, 2016).

En la ciudad de Kaohsiung, Taiwán, se desarrolló un ciclo de conducción local (Kaohsiung DrivingCycle, KHM) para motos con las mediciones de los factores de emisión locales, los cuales se compararon con los factores de emisión del ECE, los resultados indicaron que las proporciones de los factores de emisión de los ciclos de conducción KHM con respecto a ECE para motocicletas nuevas de 2 tiempos (2T) fueron de 2,5 en CO, 1,5 en hidrocarburos totales, 2 en NOx y 1 en CO₂ y en motocicletas de 2 tiempos usadas fue de 1,5 en CO, 1,3 en hidrocarburos totales, 1,4 en NOx y 1 en CO₂. Además, el consumo de combustible del ciclo KHM fue 10% más alto que el ciclo ECE para el mismo tipo de

motor. En consecuencia, el patrón KHM debe ser usado para representar verdaderamente el patrón de tráfico, factor de emisión y consumo de combustible en la ciudad de Kaohsiung (J. H. Tsai, Chiang, Hsu, Peng, & Hung, 2005). Igualmente, en la ciudad de Edimburgo, Escocia, se realizó un estudio donde se determinó el ciclo de conducción real para motos. Los resultados mostraron que este ciclo tiene una duración de 770s para los desplazamientos urbanos y 656s para los rurales, en comparación con el ciclo de conducción de la Comisión Europea para los coches usados para la estimación de las emisiones de las motocicletas cuya duración es menor (Saleh, Kumar, Kirby, & Kumar, 2009).

En Latinoamérica también se han realizado estudios para conocer las emisiones generadas por los vehículos. Hilario Roman & Lovera Davila, (2011) hicieron una estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles en el departamento de Pasco, Perú, donde descubrieron que se emiten 28 Ton/día de contaminantes a la atmósfera, de los cuales el CO es el más representativo con 24,05 Ton/día y el NOx es el segundo contaminante más representativo con una tasa de emisión diaria promedio de emisión de 4,38 g/km.

TolvetCaro (2009) analizó y comparó las emisiones de vehículos diésel en ciudad de México, Santiago de Chile y Sao Paulo, utilizando sistemas de medición a bordo y la metodología de Potencia Específica Vehicular. Implementó el modelo de emisiones MODEM basado en COPERT III, observando que las emisiones de NOx son hasta 4 veces mayores en la categoría de vehículos pesados en México D.F. respecto a Santiago de Chile, y hasta 3 veces mayores respecto a Sao Paulo, relación que se mantiene para

el material particulado. Por otro lado, en Argentina se realizó un análisis de la evolución espacial de las emisiones de carbono provenientes de los vehículos que circulan en la ciudad de Buenos Aires, mediante la implementación de un Sistema de Información Geográfico basado en una plataforma de código abierto, descubriendo que el transporte particular es responsable de emitir 390 Ton por día de CO, representando el 71,5% de las emisiones totales (Perez, Puliafito, & Pirani, 2009).

En Colombia se han elaborado estudios de estimación de emisiones como el realizado en el Valle de Aburrá, en el cual se desarrolló un modelo para la estimación de emisiones vehiculares producidas por los viajes de trabajo y/o estudio a escala institucional, junto con un caso de aplicación en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Se encontró que los viajes realizados dentro de la institución no aportan más del 0,025% de las emisiones totales de la zona (Valencia-arroyave et al., 2015). Otro trabajo desarrollado en el país es la estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, donde se estimaron los aportes de cada categoría vehicular al total de emisiones, siendo los buses y camiones las categorías de mayor relevancia, al aportar el 41% y 39,5% respectivamente de las emisiones de PM₁₀ (Londoño, Correa, & Palacio, 2011).

En el municipio de Montería se estimó la emisión de gases de efecto invernadero, mediante la ejecución del modelo IVE 1.1 para el cálculo de las emisiones de COV, NO_x, CO, SO₂ y PM₁₀ de algunas categorías de fuentes móviles, arrojando que la fuente más importante, en cuanto a emisión de gases de efecto invernadero, es el parque automotor

con un 50,4% donde el 46,5% de los contaminantes son generados por las motos (Echeverri Londoño, 2006).

Los trabajos consultados indican que las emisiones producidas en cada una de las ciudades donde se realizaron los estudios están altamente ligadas a la distribución de su parque automotor, año de fabricación de los vehículos y las respectivas características de conducción. En muchos de los casos, las motocicletas representan la flota vehicular que más emite CO en países como India y China, sin embargo, las proporciones varían de acuerdo a las características del área de estudio.

La ciudad de Cartagena a pesar de ser una de las ciudades más importantes de Colombia, cuenta con pocos estudios para cuantificar de manera precisa las emisiones provenientes de fuentes móviles. Uno de los pocos estudios es el realizado por Echeverría & Vilorio, (2017) en el que se realizó la estimación de emisiones generadas por motocicletas que transitan una de las vías principales de la ciudad (Tv. 54), donde se obtuvo que los gases mayor emitidos son el CO₂, el CO y VOC, con 187,8 kg/h, 43,43 kg/h y 12,94 kg/h respectivamente entre los días lunes a viernes. Otro trabajo realizado en la ciudad de Cartagena estima los factores de emisión de CO y PM_{2.5} para vehículos livianos y pesados obtenidos mediante la aplicación inversa del modelo AERMOD donde se obtuvo que el FE de CO es de 0,06 g//km-veh y 42 g//km-veh para vehículos livianos y pesados respectivamente y el FE de PM_{2.5} es de 102 g//km-veh y 740 g//km-veh para vehículos livianos y pesados respectivamente (Álvarez, 2015).

4. Objetivos

- **Objetivo general**

Crear un inventario de emisiones de contaminantes primarios y gases de efecto invernadero (GEI) producidos por motocicletas y transporte público en la ciudad de Cartagena.

Objetivos específicos

- Determinar el ciclo de conducción representativo de motocicletas para el corredor de carga de la ciudad de Cartagena
- Estimar las emisiones de contaminantes primarios y gases de efecto invernadero producidos por motocicletas en el corredor de carga y transporte público en la Avenida Pedro de Heredia en la ciudad de Cartagena mediante la implementación del modelo IVE.
- Comparar los datos obtenidos con los resultados presentados en las otras vías principales de la ciudad.
- Determinar un factor de emisión característico de las motocicletas en la ciudad de Cartagena.

5. Metodología

Para la estimación de emisiones del transporte público y las motocicletas de la ciudad de Cartagena, se partió de la información previamente desarrollada en el marco del proyecto de investigación “Impacto ambiental de las motos y el Transcaribe en la calidad del aire de la ciudad de Cartagena” y se complementó con la estimación de las emisiones provenientes de las motocicletas en la vía del Corredor de Carga de Cartagena, la cual es una de las vías de mayor tráfico vehicular de la ciudad (EDURBE, 2017). La información previa correspondió a los datos de emisiones y factores de emisiones en la Transversal 54 obtenidos por Echeverría & Vilorio (2017) y los resultados de ciclo de conducción de motocicletas y de Transcaribe obtenidos por Hernández (2017). Las emisiones producidas por los buses fueron tomadas de los resultados obtenidos por Aguilar (2016). La Figura 5 muestra el flujograma de la metodología implementada sobre el Corredor de Carga, vía de estudio en esta investigación, la cual se encuentra dividida en dos grandes secciones: determinación del ciclo de conducción representativo para motocicletas y la estimación de las emisiones producidas por las motocicletas en el Corredor de Carga de la ciudad de Cartagena mediante el modelo IVE.

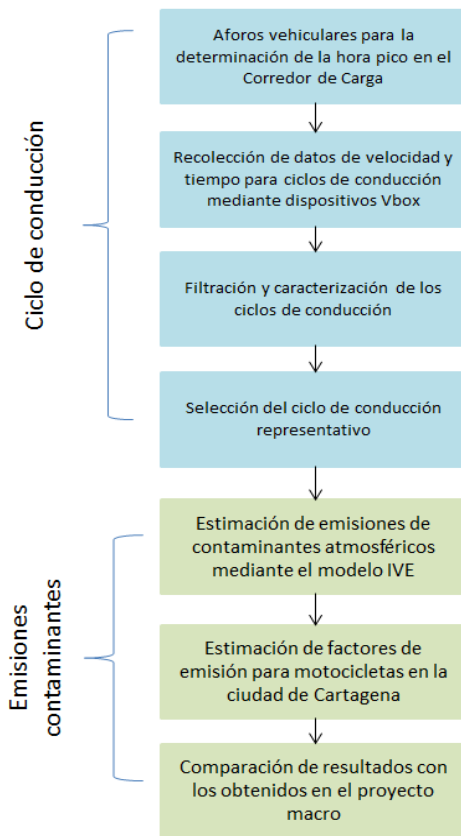


Figura 5. Metodología utilizada en la investigación. Fuente: Autora

5.1. Determinación del ciclo de conducción representativo

5.1.1. Aforos vehiculares y selección de la ruta

El Corredor de Carga en Cartagena corresponde a una de las principales vías de Cartagena, tiene una longitud aproximada de 5km y conecta el área residencial que comprende desde el barrio Bella Vista hasta el barrio Policarpa (Figura 6), con la zona franca de la ciudad (Mamonal). En su gran mayoría el Corredor de Carga está rodeado de empresas y colinda con algunos barrios residenciales. Debido a que esta vía se considera de acceso rápido a la ciudad, no cuenta con semaforización a lo largo de su

trayecto con el fin de evitar puntos de congestión (Figura 6). Es importante resaltar que los barrios que limitan con el Corredor de Carga desembocan sobre la vía en el sentido Mamonal – Cartagena, mientras que en sentido Cartagena – Mamonal solo las empresas comunican con la vía.

El ciclo de conducción representativo fue construido partiendo de las condiciones de mayor emisión de contaminantes, es decir, cuando se encuentran mayor número de vehículos sobre la vía. Por ello, fue necesario identificar el horario donde se da el mayor flujo vehicular (hora pico). Para esto, se realizó un conteo de vehículos haciendo uso de cámaras de video instaladas en dos puntos de la vía. Estos puntos fueron: Hotel Luz del Norte ($10^{\circ}20'48.07''N$ y $75^{\circ}29'39.91''O$) y MCT Empresa ($10^{\circ}22'44.79''N$ y $75^{\circ}30'9.74''O$), los cuales se encuentran en los extremos de la vía de estudio como se muestra en la Figura 6.

Los aforos se desarrollaron durante 12 horas los días martes, miércoles y jueves para evaluar el flujo normal de vehículos bajo las normas de pico y placa que rigen durante los días laborales, y el día sábado, debido a que los vehículos transitan sin ninguna restricción.

El conteo se realizó en intervalos de 15 minutos durante las 12 horas de grabación y debido a la gran variabilidad de vehículos que transitan esta vía, se hizo el conteo mediante la siguiente clasificación: autos, motocicletas, buses, camiones de 2, 3, 4 e iguales o mayores a 5 ejes. Después de definir el número de vehículos que transitan por el punto de aforo, se determinó el horario con mayor flujo vehicular, mediante la cantidad

de vehículos equivalentes totales con el fin de homogeneizar el flujo basado en el volumen de los vehículos, para continuar con la construcción del ciclo de conducción.

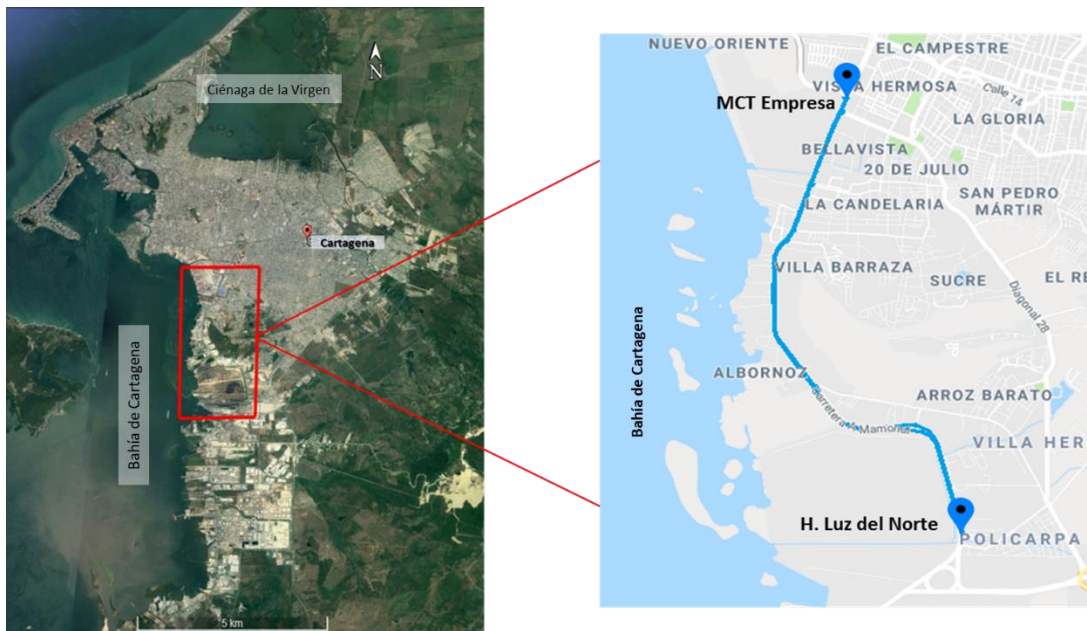



Figura 6. Ruta seleccionada y ubicación de aforos. Fuente: Google Earth

Después de definir las horas pico se realizaron recorridos en motocicletas para recopilar los datos portando un dispositivo VBOX (GPS) que proporciona la información de las velocidades a lo largo del tiempo. La Tabla 2 presenta las características de precisión del equipo.

Al realizar los recorridos se utilizaron motocicletas de la referencia “AutecoBajaj”, comúnmente conocidas como motos “Boxer” debido a que son las más frecuentes (35.7%) respecto a otras referencias de las motocicletas que transitan la ciudad según

los datos del CDA (Centro de Diagnóstico Automotor) de la ciudad de Cartagena en el año 2014.

Tabla 2. Características del equipo VBOX Sport

VBox Sport	Características técnicas	Referencia
	Velocidad: <ul style="list-style-type: none"> • Exactitud: 0,1 km/h • Velocidad mínima: 0,1 km/h • Velocidad máxima: 1800 km/h • Resolución: 0,01 km/h 	(Racelogic, 2014)
	Aceleración: <ul style="list-style-type: none"> • Exactitud: 0,5% 	

Un total de 30 recorridos fueron realizados, 15 los días martes, miércoles y jueves y 15 los días sábados, para ambos casos estos fueron efectuados durante la hora pico determinada en el aforo vehicular y realizado para ambos sentidos de la vía.

5.1.2. Depuración y caracterización de los ciclos de conducción

Después de obtener los datos de los recorridos, estos fueron sometidos a un proceso de depuración, debido a que durante la toma de datos los VBOXs pueden presentar fallas por pérdida de señal o reportar cambios de velocidad atípicos. Estos datos deben ser detectados y eliminados para evitar inconsistencias en los resultados.

Inicialmente fue necesario conocer a partir de qué valor se puede considerar un dato como atípico, para esto se realizó un recorrido en motocicleta con aceleración a fondo.

Con los resultados obtenidos, se calculó el cambio máximo de velocidad que puede realizar una motocicleta AutecoBajaj en 0,05 segundos y se obtuvo un valor de 1 km/h.

Con este dato se modificó el programa desarrollado en Visual Basic por Hernández (2017), el cual al ingresar los datos de tiempo vs. Velocidad proporcionados por el dispositivo GPS detecta los datos que presentan alguna de estas irregularidades:

- Diferencias de velocidades en que superan cambios de 1 km/h en menos de 0.05 segundos.
- Pérdidas de señal en el dispositivo que son indicadas por valores de longitudes y latitudes iguales cero.

El programa identifica las anomalías mencionadas e inmediatamente corrige el valor atípico por medio de interpolación por SPLINE (interpolación cúbica). Posteriormente, el programa verifica que ninguna celda supere la velocidad máxima en menos de 0,05 segundo, si es así, realiza una interpolación lineal que corrige el valor encontrado (Echeverría & Vilorio, 2017).

Posterior a la depuración de los 30 ciclos de conducción, se procedió a la caracterización de los mismos a través de sus parámetros característicos, los cuales son: velocidad promedio (km/h), velocidad máxima (km/h), aceleración promedio (m/s^2), desaceleración promedio (m/s^2), tiempo total del recorrido (s) y distancia total recorrida (km), debido a que en su mayoría, estos son los parámetros utilizados en diferentes metodologías (Zhang, Zhao, & Shen, 2012) . El tiempo ralenti no fue tenido en cuenta ya que al realizar

los recorridos las motocicletas no se detienen, debido a que en la vía de estudio no hay semáforos y el flujo vehicular de la vía permite transitar sin necesidad de realizar paradas.

5.1.3. Elección del ciclo representativo

Para seleccionar los ciclos de conducción representativos, para día de semana y para el día sábado, se utilizó la metodología propuesta por Huertas et al. (2018). El ciclo representativo es seleccionado partiendo de los parámetros característicos de cada ciclo y es escogido aquel que minimiza el promedio ponderado de las diferencias con respecto a la media de todos los ciclos (Ecuación 1).

$$y = \min \left(\sum_i W_i \text{abs} (P_{i,j} - \bar{P}_i) \right) \quad (1)$$

Dónde, y representa el ciclo de conducción representativo, $P_{i,j}$ es valor del parámetro i (cada uno de los parámetros característicos) para el ciclo j (cada uno de los ciclos a evaluar), W_i es el peso ponderado y \bar{P}_i es el valor promedio de cada uno de los parámetros característicos.

En esta investigación fue asignado un valor de uno (1) para todos los pesos ponderados debido a que no existen estudios de referencias que ayuden a determinar este valor para cada uno de los parámetros característicos de los ciclos de conducción dado las características particulares del corredor de carga; además, tampoco se cuentan con los equipos necesarios para determinar cuáles serían las características a evaluar y sus respectivos pesos ponderados.

Después de obtener el ciclo de conducción representativo para los días de semana y el ciclo representativo para el día sábado, los cuales en ambos casos se obtuvo un ciclo representativo para cada sentido de la vía (dirección Mamonal – Cartagena y dirección Cartagena – Mamonal) se pasa a la siguiente fase de la investigación.

5.2. Estimación de emisiones mediante el modelo IVE

El modelo IVE es un software por medio del cual es posible estimar las emisiones de contaminantes criterio, gases efecto invernadero y otras sustancias tóxicas provenientes de vehículos de pasajeros, motocicletas, buses y camiones. El modelo IVE tiene en cuenta las diferentes tecnologías y condiciones existentes en los distintos países, como su geografía y meteorología. También considera factores como la distribución de tecnología de la flota de vehículos locales, el ciclo de conducción del vehículo, el kilometraje recorrido promedio del vehículo (VKT), la potencia específica vehicular (VPS) y la distribución de tensiones del motor que tiene efecto en las emisiones de los vehículos. Adicionalmente, tiene en cuenta el programa de inspección y mantenimiento (I/M) al cual se encuentren sujetos los vehículos y la calidad del combustible utilizado (Q. Zhang, Xu, Wang, Tian, & Jiang, 2008).

La estimación de emisiones fue realizada para los ciclos representativos obtenidos en este trabajo y para los ciclos representativos de motocicletas y Transcribe obtenidos por Hernández (2017) sobre la Av. Pedro de Heredia en Cartagena de Indias. Para ejecutar el modelo IVE, es necesario ingresar las condiciones meteorológicas y geográficas del lugar de estudio, las características de combustible, el ciclo de conducción representativo

y las características de la flota vehicular. La Figura 7 presenta en detalle la información requerida por el modelo IVE.

Información general

- Tipo de I/M
- Fecha y hora
- Aire acondicionado

Meteorología

- Humedad relativa
- Temperatura

Geografía

- Altitud
- Pendiente

Característica del combustible

- Tipo de combustible
- Niveles de plomo, azufre y benceno
- Niveles de oxigenados

Característica de conducción

- Distancia recorrida
- Número de partidas
- Velocidad promedio
- Bines de potencia

Flota vehicular

- Descripción del vehículo mediante características como la antigüedad y el cilindraje

Figura 7. Datos requeridos por el modelo IVE

La Tabla 3 presenta la información ingresada al modelo en donde se explican los valores utilizados en cada uno de los parámetros y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para su elección.

Tabla 3. Información ingresada al modelo IVE

Parámetro	Valor	Consideraciones
Tipo de I/M	Ralentí descentralizado para vehículos de pasajeros de 2 o 3 ruedas	El programa de inspección y mantenimiento se realiza en distintos centros autorizados de la ciudad
Temperatura y humedad relativa	Temperatura: 27°C Humedad relativa: 81%	Según Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de la estación meteorológica del Aeropuerto Rafael Núñez.
Geografía	Altitud: 0 m	Debido a que la ciudad de Cartagena se encuentra ubicada al nivel del mar
Combustible	Azufre: 300ppm Plomo: bajo (0,07 g/L) Benceno: moderado (1,50%) Oxigenados: 0%	Según los datos del CAD (2014) en su gran mayoría, las motocicletas de la ciudad de Cartagena utilizan gasolina como combustible (Consejo Colombiano de Seguridad, 2015)
Características de conducción	Distancia recorrida, número de partidas y velocidad promedio	Datos obtenidos del ciclo de conducción representativo

Para la flota vehicular se tienen en cuenta las características propias del vehículo de estudio, en este caso se utilizaron las indicadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de la flota vehicular

Características	Motocicletas	SITM Transcaribe
Descripción	Motor pequeño	Camión/Bus
Combustible	Gasolina	Gas natural
Peso	Ligero	Medio
Control Aire/combustible	Carburador, 4-ciclos	Carburador/Mezclador
Tubo de escape	Ninguno	3-way /EGR
Evaporativo	Ninguno	PCV
Edad	>50mil km	80-161mil km

5.2.1. Potencia específica vehicular y estrés del motor

La potencia específica vehicular (VSP por sus siglas en inglés) se refiere a la potencia requerida para mover una unidad de masa del objeto (kW/ton). Este parámetro depende directamente del ciclo de conducción y puede ser calculado sin la necesidad de instalar instrumentación compleja en el vehículo.

El cálculo del VSP (Ecuación 3) se centra en las fuerzas que un vehículo debe superar cuando va en el camino, esto incluye la aceleración, la fuerza de gravedad (debido a las pendientes), resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica (US EPA, 2002)

$$VSP = v[1.1a + 9.81(\text{atan}(\text{sen}(\text{pendiente}))) + 0.132] + 0.000302v^3 \quad (3)$$

Donde, v es velocidad (m/s), a es la aceleración (m/s²), h es altitud (m) y $pendiente$ se define como:

$$Pendiente = \frac{h_{t=0} - h_{t=-1}}{v_{(t=1 \text{ a } 0 \text{ seg})}} \quad (4)$$

Para determinar el estrés del motor (Ecuación 5) se toma como referencia la potencia específica vehicular y las RPM implícitas, ya que este parámetro describe el comportamiento del motor en los últimos 20 segundos de operación y permite conocer las condiciones a las cuales el vehículo se enfrentó durante el recorrido.

$$ES = \text{índice RPM} + \left(0.08 \frac{\text{ton}}{\text{kW}}\right) * \text{potencia promedio} \quad (5)$$

Donde, la *potencia promedio* equivale a:

$$\text{Potencia promedio} = \text{promedio} (VSP_{t=5 \text{ a } 25 \text{ seg}}) \left(\frac{\text{kW}}{\text{ton}}\right) \quad (6)$$

$$\text{índice RPM} = \frac{\text{Velocidad}}{\text{divisor de velocidad}} \quad (7)$$

Para transformar el ciclo de conducción en función de la potencia específica vehicular y el estrés del motor se utilizó la plantilla de Excel descargada de la página del International Vehicle Emission Model.

5.2.2. Factores de emisión

El factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con la actividad asociada a la liberación de dicho contaminante. Estos factores generalmente se expresan como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite el contaminante (US EPA, 2018).

Debido a que en esta investigación se desea conocer el factor de emisión producido por fuentes móviles, se utilizó la Ecuación 8 propuesta por Aristizabal & Toro (2008).

$$FEp = \frac{Ep}{TPD * L} \quad (8)$$

Donde, Ep equivale a la emisión del contaminante p en unidades de kg/h, TPD es el tráfico promedio horario (vehículos/h), L es la longitud de la vía (km) y FEp es el factor de emisión del contaminante (kg/veh-km).

La estimación de emisiones procedentes de diversas fuentes atmosféricas se facilita gracias al factor de emisión. El factor de emisión típico de las motocicletas que transitan por la ciudad fue determinado promediando los factores de emisión calculados para el Corredor de Carga, la Av. Pedro de Heredia y la Transversal 54 por Echeverría & Viloria (2017). Posteriormente, mediante un intervalo de confianza del 95%, se establece el rango donde posiblemente se encontraría el factor de emisión para los diversos contaminantes emitidos por las motocicletas.

5.3. Determinación del CO₂ equivalente

En este estudio son estimadas las emisiones de tres de los seis gases de efecto invernadero establecidos según el protocolo de Kyoto (CO₂, CH₄ y N₂O) (Naciones Unidas, 1998).

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR† (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153

Figura 8. Potencial de Calentamiento Global. Fuente: (IPCC, 2007)

Para comparar los efectos de los diferentes gases es necesario medir su equivalencia en CO₂, basado en su potencial de calentamiento global (PCG), el cual expresa su potencial de calentamiento en comparación con el que posee el mismo volumen de CO₂ durante el mismo periodo de tiempo. El PCG del CO₂ es igual a 1 (IPCC, 1997) para realizar este cálculo se multiplica la masa del gas por el potencial de calentamiento global que le corresponde, el cual se puede observar en la Figura 8.

6. Resultados

Los resultados presentan inicialmente los ciclos representativos obtenidos para el Corredor de Carga y posteriormente se presentan las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero emitidos por las motocicletas y el SITM Transcaribe. Debido a que este trabajo hace parte de un macro proyecto que evalúa las emisiones atmosféricas producidas por el transporte público y las motos en la ciudad de Cartagena, se realizará una comparación de las emisiones obtenidas con los resultados presentados en trabajos anteriores que hacen parte de este proyecto.

6.1. Determinación del ciclo de conducción

6.1.1. Aforos vehiculares

La Figura 9 presenta los resultados del aforo vehicular realizado en el Corredor de Carga, se observa que el mayor flujo vehicular se da a las 7:00 hrs el día miércoles, en el sentido Cartagena – Mamonal, en el punto ubicado en el Hotel Luz del Norte el cual registra un total de 2492 vehículos, mientras que el punto de menor flujo vehicular se da igualmente el día miércoles en el mismo punto durante las 12:00hrs con un total de 1200 vehículos contados. Este comportamiento es de esperarse ya que en horas de la mañana comienza el horario laboral para la gran mayoría de las empresas ubicadas en esta zona de la ciudad; mientras que a mediodía las personas se encuentran en el horario de almuerzo, por tanto, se encuentran fuera de las vías. Este comportamiento se asemeja en cada uno de los puntos aforados tanto para días de semana como para sábados.

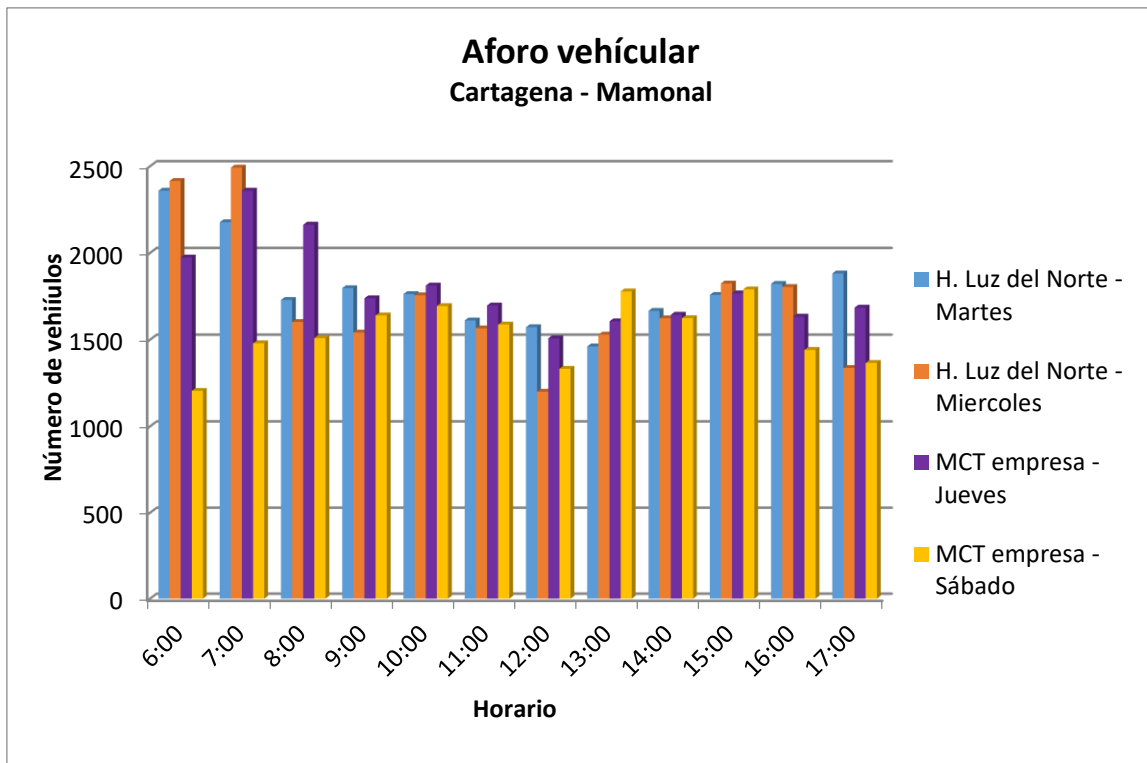


Figura 9. Aforo vehicular sentido Cartagena – Mamonal. Fuente: Autora

En el aforo realizado para el sentido Cartagena - Mamonal (Figura 9) el punto con un mayor flujo vehicular es en el Hotel Luz del Norte durante el día miercoles con un total de 21597 vehículos que transitan desde las 6:00hrs hasta las 18:00hrs, con un máximo de 2492 vehículos a las 6:00hrs. Por otra parte, durante los días de semana, también es posible observar un aumento del flujo vehicular entre las 16:00 y las 17:00hrs debido a que en este horario finaliza la jornada laborar de la mayoría de las empresas de la zona, aunque no supera la hora pico de la mañana.

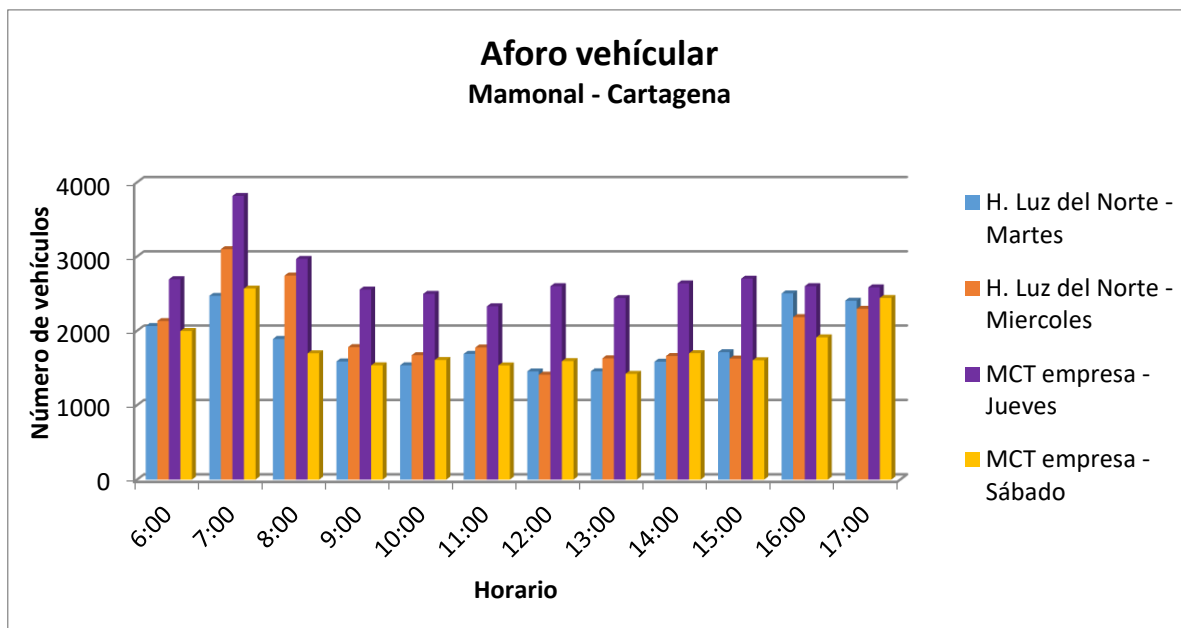


Figura 10. Aforo vehicular sentido Mamonal - Cartagena. Fuente: Autora

Para el sentido Mamonal – Cartagena (Figura 10) el aforo realizado indica que el punto con un mayor flujo vehicular es en MCT empresa durante el día jueves con un total de 32425 vehículos desde las 6:00hrs hasta las 18:00hrs, con un máximo de 3816 vehículos a las 7:00hrs.

En ambas figuras, 9 y 10, es posible observar que los sábados se presenta un menor flujo vehicular, esto se debe a que gran parte de las empresas no laboran este día. Para los días de semana se presenta mayor tránsito vehicular debido a que el Corredor de Carga es la vía más corta y rápida para transportarse desde Mamonal hasta los barrios residenciales de Cartagena, por lo tanto, el horario pico durante los días de semana se da entre las 6:30 y 8:30hrs en ambos sentidos de la vía pero para el día sábado las horas pico son diferentes en ambos sentidos del Corredor de Carga. Con el fin de poder realizar

los ciclos en un horario continuo, se determinó que el horario de alto flujo vehicular durante el cual se realizarán los recorridos es de 7:00 a 9:00 horas.

6.1.2. Ciclos de conducción representativos

La Figura 11 presenta los ciclos de conducción representativos en el Corredor de Carga en el sentido Cartagena - Mamonal, durante días de semana, (obtenido un miércoles) y sábado respectivamente.

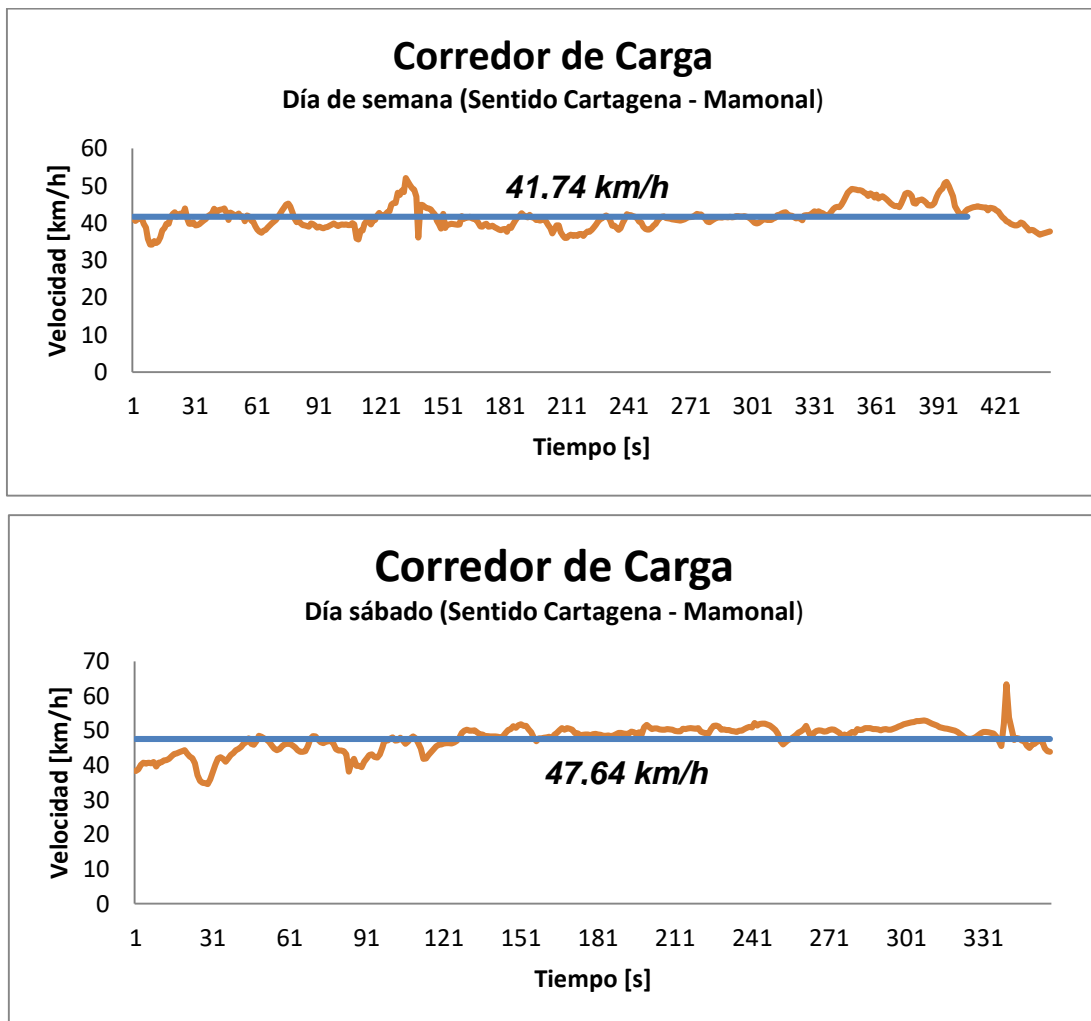


Figura 11. Ciclo de conducción representativo para día de semana (panel superior) y sábado (panel inferior), sentido Cartagena – Mamonal. Fuente: Autora

Debido a que, en este sentido de la vía, únicamente se encuentran empresas, el flujo vehicular es poco variable tanto en los días de semana, como en los días sábados. El ciclo de conducción representativo para el día de semana presenta una velocidad promedio de 41,74 km/h y una velocidad máxima de 50,72 km/h. El recorrido se realiza en un tiempo total de 404 s (aproximadamente 7 min) y una distancia de 4,7 km. Para el caso de los sábados, el ciclo de conducción representativo presenta una velocidad promedio de 47,64 km/h y una velocidad máxima de 63,42 km/h. El recorrido se realiza en 356 s (aproximadamente 6 min) y tiene una distancia de 4,7 km.

La Figura 12 describe la forma típica de conducción de motocicletas sobre el Corredor de carga en el sentido Mamonal – Cartagena, durante días de semana (obtenido un jueves) y sábado respectivamente.

En la Figura 12 se observa que en la semana por recorrido se presenta una velocidad promedio de 36,54 km/h, una velocidad máxima de 48,8 km/h y una distancia de 4,9 km recorrida en 489s (aproximadamente 8 min). También se puede observar que existen disminuciones abruptas de velocidad, que corresponden a las características típicas de conducción en esta avenida.

Para el día sábado en la Figura 12 se presenta una velocidad promedio de 49,21 km/h, una velocidad máxima de 57,4 km/h, una distancia recorrida de 4,9 km en 363s. Este ciclo tiene un comportamiento un más constante con respecto al ciclo que se presenta para día de semana, esto se debe a que durante este día el flujo vehicular disminuye por lo cual es posible mantener una velocidad mayor y con menores variaciones.

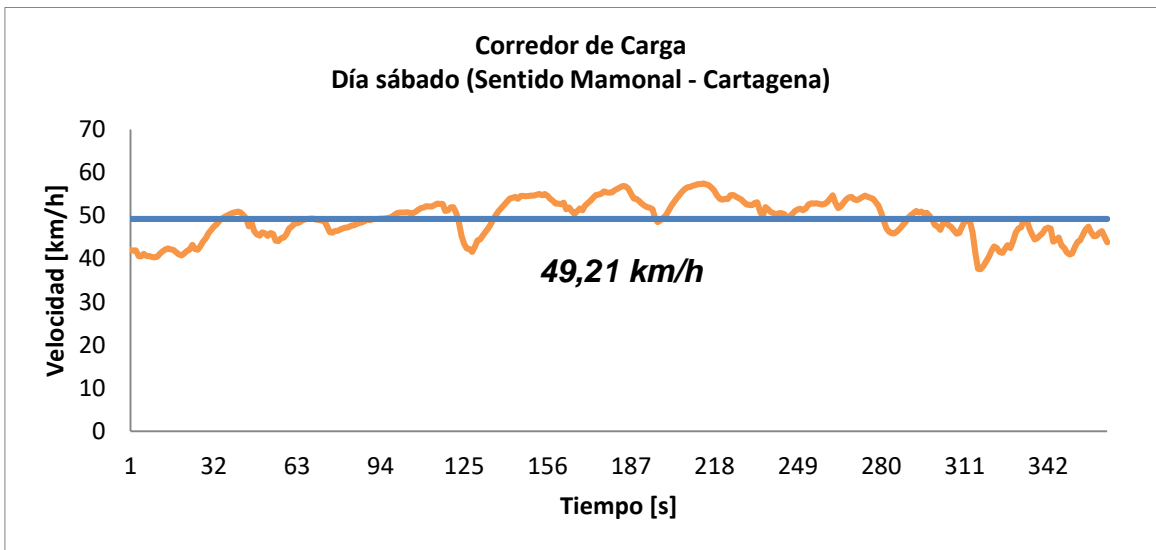
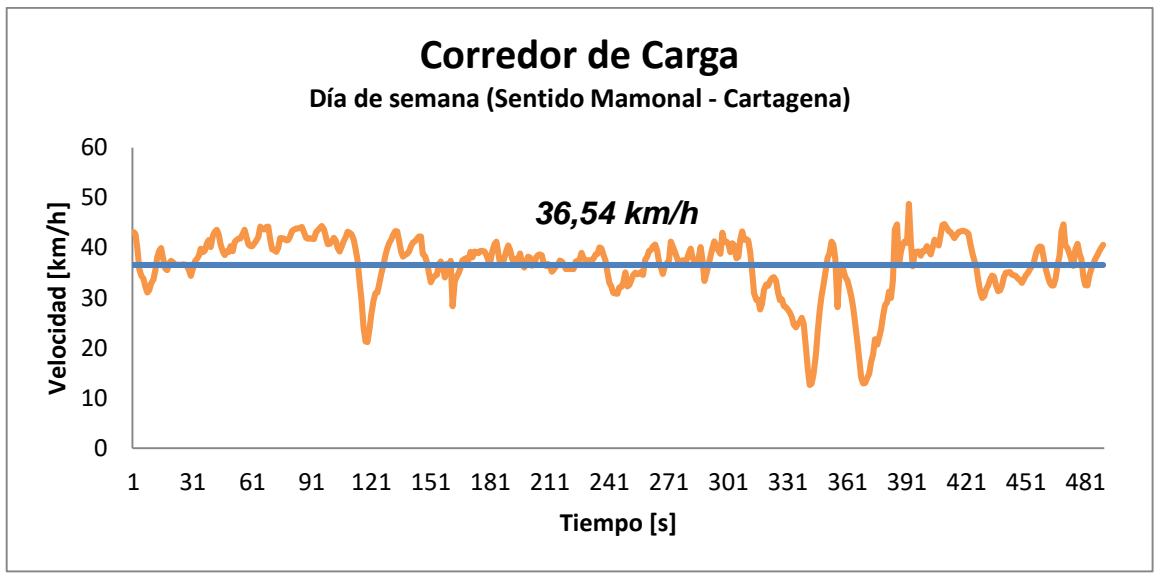


Figura 12. Ciclo de conducción representativo para día de semana (panel superior) y sábado (panel inferior), sentido Mamonal-Cartagena. Fuente: Autora

6.1.3. Parámetros característicos de los ciclos de conducción

La Tabla 5 presenta los parámetros característicos de los ciclos de conducción representativos para el Corredor de Carga de la ciudad de Cartagena. Se observan los cambios de velocidad en cada uno de los sentidos y entre los días de semana y sábados,

ya que a pesar de ser la misma vía, cada sentido presenta características diferentes, así mismo existen diferencias marcadas en el tráfico de la vía dependiendo si es día laborar o no. Por lo tanto, se resaltan los siguientes puntos:

- Las máximas velocidades se dan los días sábado (63,43 y 57,57 km/h), debido a que se presenta un menor número de vehículos que transitan esta vía, permitiendo que las motocicletas puedan alcanzar mayores velocidades.
- Durante los días de semana se evidencia valores mayores de desaceleración (-0,094 y -0,15 km/h), ya que el alto flujo vehicular genera algunos puntos de congestión en la vía (en los segundos 9, 13, 110, 211 y 440 para el sentido Cartagena – Mamonal y en los segundos 118, 317, 342, 356 y 370 en el sentido Mamonal – Cartagena) forzando a las motocicletas a disminuir la velocidad de forma representativa.
- La aceleración negativa que se presenta durante el ciclo representativo para día de semana en el sentido Mamonal – Cartagena (-0,0014 m/s²) se debe a que durante este recorrido la motocicleta se ve obligada a disminuir la velocidad en mayor proporción a lo que podía aumentarla.
- Finalmente, el tiempo recorrido los días sábado (356 y 363 s) es evidentemente menor que el de los días de semana (439 y 485 s), ya que, debido al bajo flujo vehicular, las motocicletas pueden realizar el mismo recorrido alcanzando mayores velocidades y logrando hacerlo en menor tiempo.

Tabla 5. Comparación ciclos de conducción del Corredor de Carga.

Parámetros	Días de semana		Día sábado	
	Cartagena - Mamonal	Mamonal - Cartagena	Cartagena – Mamonal	Mamonal – Cartagena
Velocidad promedio [km/h]	41,74	36,55	47,65	49,21
Velocidad máxima [km/h]	52,13	48,80	63,43	57,47
Aceleración promedio [m/s ²]	0,002	-0,0014	0,004	0,0014
Aceleración máxima [m/s ²]	2,45	2,82	3,16	0,60
Desaceleración promedio [m/s ²]	-0,094	-0,15	-0,089	-0,07
Tiempo total [s]	404	489	356	363
Distancia [km]	4,70	4,97	4,70	4,97

Fuente: Autora

6.2. Estimación de emisiones

El cálculo de emisiones mediante el modelo IVE, se realizó para ambos sentidos de la vía durante los días de semana y para el día sábado, teniendo en cuenta los datos obtenidos de aforo vehicular, ciclos representativos y las características del parque automotor de la ciudad.

En la Tabla 6 se observan los resultados de las emisiones de contaminantes criterio (CO, COV, NOx, SOx, PM) y gases de efecto invernadero (CO₂, N₂O, CH₄) obtenidos para el Corredor de Carga. Para el sentido Cartagena – Mamonal se encontró que el gas mayormente emitido por las motocicletas es el CO₂ con 92,85 kg/h y 112,69 kg/h para día de semana y sábado respectivamente. Lo cual corresponde a un aumento de las emisiones de CO₂ del 17,61% y un incremento de motocicletas del 16,71%. Esto indica

que, para este sentido de la vía, durante el sábado transita una mayor cantidad de motos en comparación con los días de semana. Lo anterior, debido a que durante los días de semana hay mayor tránsito de otro tipo de vehículos que permiten la movilización de las personas que trabajan en el sector de Mamonal. Por otra parte, el CO es el contaminante criterio mayormente emitido con 14,75 kg/h y 20,63 kg/h para día de semana y sábado respectivamente seguido de los COVs con 4,06 kg/h y 20,63 kg/h.

Cabe resaltar que los COV y los COV evaporativos, no hacen parte de los contaminantes criterios, pero se consideró pertinente incluirlos en los resultados ya que presentan una cantidad representativa en las emisiones estimadas y son precursores de la formación de ozono troposférico (contaminante criterio).

Tabla 6. Emisiones producidas en el Corredor de Carga.

Emisiones (kg/h)		Semana (Cartagena - Mamonal)	Sábado (Cartagena - Mamonal)	Semana (Mamonal - Cartagena)	Sábado (Mamonal - Cartagena)
Contaminantes criterio	CO	14,75	20,63	51,56	8,79
	VOC	4,06	4,37	12,58	2,15
	VOC.evap	1,4	1,52	4,21	0,76
	NOx	0,45	0,67	2,08	0,22
	SOx	0,01	0,01	0,03	0
	PM	0,21	0,29	0,71	0,13
GEI	CO ₂	92,85	112,69	305,86	55,15
	N ₂ O	0	0	0	0
	CH ₄	0,81	0,87	2,52	0,43
Número de Motos		773	928	1960	454

Fuente: Autora

Para el sentido Mamonal – Cartagena, la Tabla 6 indica que la mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero fueron de CO₂ con 305,86 kg/h y 55,15 kg/h para semana y sábado respectivamente, lo cual corresponde a una reducción de

81,97%% entre la semana y el sábado cuando el porcentaje de motocicletas disminuyó en 70,84%. Para los contaminantes criterio, el gas que más se emitió fue el CO con 51,56 kg/h y 8,79 kg/h para semana y sábado. De esta manera se evidencia que el CO₂ y el CO son los gases mayormente emitidos en el Corredor de Carga de Cartagena.

7. Análisis de resultados

7.1. Ciclos de conducción en las vías de Cartagena

En esta sección se realizará la comparación de los diferentes ciclos de conducción obtenidos para las motocicletas en la ciudad de Cartagena, reportados en trabajos anteriores que también hacen parte de este macro proyecto. En este caso únicamente se utilizarán los datos obtenidos para los días de semana ya que no en todas las vías se recopilaban datos durante los sábados.

Tabla 7. Comparación de los ciclos representativos de la ciudad de Cartagena

Parámetros/ Ciclos	Transversal 54	Corredor de Carga	Av. Pedro de Heredia	Ciclo Mundial de Prueba de Motocicletas
Velocidad prom [km/h]	26	36,55	16,52	28,47
Velocidad máx [km/h]	47,8	48,80	14,72	64,4
Tiempo recorrido [s]	727	489	1682	1022
Distancia total[km]	5,19	4,97	8,93	8,09
No motos	3632	1960	2677	-
Referencia	(Echeverría & Vilorio, 2017)	Autora	(Hernández, 2017)	(Barlow, et al., 2009)

En la Tabla 7 se evidencia que en el Corredor de Carga las motocicletas transitan con una velocidad promedio mayor (36,55 km/h) en comparación con la Transversal 54 (26km/h) y la Av. Pedro de Heredia (16,52), y por tanto es la vía que requiere menos tiempo para ser recorrida. Es posible que esto se relacione con la semaforización de las vías, ya que el Corredor de Carga no cuenta con ningún semáforo a lo largo de su recorrido. También se observa que la velocidad alcanzada por las motocicletas en el

Corredor de Carga sobrepasa la velocidad máxima permitida sobre la vía de 40 km/h. Por otra parte, la Av. Pedro de Heredia, es la vía con más semáforos, generando mayor número de paradas, lo cual se ve reflejado en la velocidad promedio de la misma, que corresponde a la menor en comparación a las otras dos vías.

7.2. Emisiones de motocicletas y transporte público en la ciudad de Cartagena

Las emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterio de la Transversal 54 obtenidos por Echeverría & Viloría (2017), los datos de emisiones obtenidos para el ciclo de conducción de la Av. Pedro de Heredia determinado por Hernández (2017) y las emisiones del corredor de carga obtenidos en este trabajo para la vía en dirección Mamonal – Cartagena son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Emisiones producidas por motocicletas en las principales vías de Cartagena

Emisiones (kg/h)		Tv 54 Semana	Tv 54 Sábado	Corredor de Carga Sábado (Mamonal - Cartagena)	Corredor de Carga Semana (Mamonal - Cartagena)	Corredor de Carga Sábado (Cartagena - Mamonal)	Corredor de Carga Semana (Cartagena - Mamonal)	Av. Pedro de Heredia
Contaminantes criterio	CO	107,06	85,58	8,79	51,56	20,63	14,75	189,03
	VOC	32,9	21,64	2,15	12,58	4,37	4,06	58,69
	VOC.evap	10,56	7,2	0,76	4,21	1,52	1,4	18,12
	NOx	3,25	3,15	0,22	2,08	0,67	0,45	7
	SOx	0,06	0,05	0	0,03	0,01	0,01	0,1
	PM	1,53	1,22	0,13	0,71	0,29	0,21	2,69
GEI	CO2	681,11	533,59	55,15	305,86	112,69	92,85	1171,49
	N2O	0	0	0	0	0	0	0
	CH4	6,58	4,33	0,43	2,52	0,87	0,81	11,74
Referencia		(Echeverría & Viloría, 2017)		Autora				

*Las casillas sombreadas indican los valores máximos

De la Tabla 8 se observa que:

- El CO₂ es el GEI mayormente emitido en cada una de las vías, siendo la Avenida Pedro de Heredia la vía de mayor emisión (1171,49 kg/h).
- El CO es el contaminante criterio que más se emite en cada una de las vías, siendo nuevamente la Avenida Pedro de Heredia la vía de mayor emisión (189,03 kg/h)
- La Avenida Pedro de Heredia es la vía en la cual se presenta la mayor cantidad de emisiones, esto puede ser debido a que es la vía en la que se presenta el mayor número de paradas por la cantidad de semáforos que existen a lo largo de esta (28 semáforos aproximadamente en cada sentido de la vía).

Tabla 9. Contaminantes criterio emitidos por el Transporte público y las motos en la ciudad de Cartagena

Emisiones (kg/h)		Tv 54 Semana	Corredor de Carga Semana Mamonal-Cartagena	Av. Pedro de Heredia	Buses	SITM Transcaribe
Contaminantes criterio	CO	107,06	51,56	189,03	22,14	0,07
	VOC	32,9	12,58	58,69	5,18	0
	NOx	3,25	2,08	7	176,36	0
	SOx	0,06	0,03	0,1	0,08	0
	PM	1,53	0,71	2,69	57,17	0
No de vehículos		3632	1960	2677	341	60
Distancia (km)		5,03	4,97	8,93	9,4	3,3
Referencia		(Echeverría & Vilorio, 2017)	Autora	Autora	(Aguilar, 2016)	Autora

*Las casillas sombreadas indican los valores máximos

Finalmente, se comparan las emisiones de contaminantes criterio emitidas por el transporte público y las motocicletas en la ciudad de Cartagena durante los días de semana, mostrados/expuestos en la Tabla 9.

De acuerdo a los resultados presentes en la Tabla 9, se resaltan los siguientes puntos:

- Los buses son los mayores emisores de NOx y PM con 176,36 kg/h y 57,17 kg/h respectivamente, esto se debe a que los buses convencionales de la ciudad de Cartagena funcionan con combustible diésel. Los motores a diésel operan a temperaturas más elevadas que los motores a gasolina, promoviendo una mayor producción de NOx. Adicionalmente, el diésel tiene un contenido de azufre superior a la gasolina que promueve la formación de material particulado.
- El contaminante criterio más emitido es el CO con una máxima de 189,03 kg/h en la Av. Pedro de Heredia, seguido de 51,56 kg/h en la Transversal 54, en ambos casos emitidos por motos.
- Exceptuando PM y NOx, en la Av. Pedro de Heredia es la vía en donde se generan más emisiones de todos los demás contaminantes.
- La cantidad de emisiones generadas por el SITM Transcaribe no son representativas para la ciudad de Cartagena, esto se debe a que los buses de este servicio cuentan con un sistema de control de emisiones aprobado por la norma de control de contaminación atmosférica Euro VI, y utilizan gas natural como combustible en vez de gasolina o diésel.

7.3. Factor de emisión

En Colombia, los Centros de Diagnóstico Automotriz (CDAs), establecen los límites máximos permitidos en función de la concentración de contaminantes, lo cual obstaculiza la revisión de los datos obtenidos en este trabajo cuyas unidades son de flujo másico. Además, Colombia no cuenta con un ciclo de conducción propio que represente la forma

típica de conducción en el país, es por esto que la regulación de emisiones se realiza tomando como referencia los límites máximos para CO, NOx y HC establecidos en el ciclo FTP-75 construido originalmente para los Estados Unidos y en base a esto se establecen en el artículo 21 de la Resolución 910 de 2008 los límites máximos permisibles de emisiones atmosféricas de CO y NOx producidas por motocicletas en Colombia en función de los gramos de contaminante por kilómetro recorrido. La Tabla 10 presenta la comparación de los factores de emisión obtenidos para la ciudad de Cartagena con su correspondiente ciclo representativo y las emisiones obtenidas al ejecutar el modelo con los ciclos de homologación utilizando el modelo IVE.

Tabla 10. Comparación de factores de emisión de ciclos reales vs emisiones ciclos representativos

Factor de emisión (g/km*moto)		Tv 54 Semana	Corredor de Carga Semana	Av. Pedro de Heredia	WMTC	FTP 75	JAPANESE 10-15
Contaminantes criterio	CO	1,14	0,72	3,69	1,45	3,36	0,34
	VOC	0,35	0,18	1,15	0,47	1,15	0,09
	VOC.evap	0,11	0,06	0,35	0,15	0,36	0,03
	NOx	0,03	0,03	0,14	0,04	0,11	0,02
	SOx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PM	0,02	0,01	0,05	0,02	0,05	0,00
GEI	CO ₂	7,23	4,26	22,88	9,23	21,53	2,11
	N ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CH ₄	0,07	0,04	0,23	0,09	0,23	0,02
Velocidad promedio(km/h)		25,98	36,55	19,11	28,47	21,19	33,73
Distancia (km)		5,03	4,97	8,93	8,09	17,77	2,17
Tiempo (s)		698	489	1682	1022	1874	231
No de paradas		5	1	14	6	20	1

Es posible notar que el ciclo FTP-75 presenta valores cercanos a los reportados en la Av. Pedro de Heredia, pero se debe resaltar que a pesar que los valores de los factores de

emisión de los ciclos estándar se encuentran en similares magnitudes a los obtenidos mediante ciclos de conducción reales, los ciclos FTP-75 y Japanese 10 -15, son diseñados para vehículos diferentes a motocicletas.

En la Tabla 11 se especifica el factor de emisión obtenido para la ciudad de Cartagena aplicando la metodología descrita en la sección 5.2.2.

Tabla 11. Factor de emisión de motos en la ciudad de Cartagena.

Factor de emisión (g/km*moto)	Factor de emisión de motos en la ciudad de Cartagena	Resolución 910 de 2008
CO	1,11 ± 1,08	13
VOC	0,32 ± 0,35	-
VOC.evap	0,10 ± 0,11	-
NOx	0,04 ± 0,04	0,3
SOx	0,00	-
PM	0,02 ± 0,02	-
CO2	6,82 ± 6,75	-
N2O	0,00	-
CH4	0,06 ± 0,07	-

Fuente: Autora

Tras establecer el factor de emisión es posible comparar los resultados obtenidos con la Resolución 910 de 2008. Como se observa en la Tabla 11 las emisiones de NOx y CO generadas por motocicletas no exceden los límites máximos permisibles establecidos en la ley colombiana.

Por último, en la Tabla 12, se comparan los datos obtenidos del factor de emisión para la ciudad de Cartagena con los factores de emisión reportados en la literatura en distintas ciudades del mundo.

En la Tabla 12 se evidencia que los datos reportados por Tsai et al. (2005), Jaipraskash (2018) y Garcia et al. (2013) para el área metropolitana de Kaohsiung, Nueva Delhi y para Rio de Janeiro respectivamente, se encuentran dentro de los rangos de factor de emisión de CO obtenidos para la ciudad de Cartagena. Estos tres trabajos coinciden en que los datos fueron tomados mediante muestreos de gases en ruta o en dinamómetros de chasis, esto puede ser un indicador de que los resultados obtenidos para CO en este trabajo son adecuados.

El factor de emisión de NO_x y PM reportado para la ciudad de Cartagena (Tabla 12), se encuentran muy por debajo en comparación a lo reportado en los estudios, lo cual puede ser debido a que en Cartagena las motocicletas realizan en promedio una parada por cada dos kilómetros recorridos, y en caso de no existir semáforos a lo largo de la vía, el número de paradas a lo largo de un recorrido puede ser igual a cero.

Por otra parte, los valores de CO₂ observados en la Tabla 12 varían ampliamente, esto se debe a que las emisiones de CO₂ son bastante influenciadas por el tipo de la motocicleta analizada, ya que para estudios donde se utilicen motocicletas 2 tiempos, se obtienen resultados de factores de emisión más altos, mientras que para los estudios donde se utilizan motocicletas con motores de 4 tiempos, los resultados de factores de emisión son más bajos, como los obtenidos en este trabajo.

Tabla 12. Comparación de los factores de emisión de motocicletas en Cartagena y otras ciudades del mundo

	Factor de emisión (g/km*moto)									Referencias
	CO	VOC	VOC. evap	NOx	SOx	PM	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
Dhanbad, India	1,60	-	-	0,460	-	-	-	-	-	(Adak, Sahu, & Elumalai, 2016)
Área metropolitana de Kaohsiung, Taiwán	1,43	-	-	0,100	-	-	0,950	-	-	(J. H. Tsai et al., 2005)
Theran, Irán	12,99	-	-	0,263	-	-	-	-	-	(Hassani & Hosseini, 2016)
Áreas urbanas de Chongqing, China	29,5	5,71	-	0,590	-	0,46	-	-	-	(Feng et al., 2013)
Shanghái, China	13,860	5,360	-	0,310	-	0,150	64,690	-	-	(Q. Zhang et al., 2008)
La gran región de Delhi	2,861	0,455	-	0,392	-	-	-	-	-	(Goel & Guttikunda, 2015)
Hanói, Vietnam	8,2	-	-	0,170	-	-	29,000	-	-	(Nguyen, Nguyen, & Nguyen, 2018)
New Delhi, India	1,0	-	-	0,070	-	-	0,6*	-	-	(Jaiprakash et al., 2016)
Rio de Janeiro, Brasil	0,702	-	-	0,066	-	-	-	-	-	(Garcia et al., 2013)
Cuenca, Ecuador	11,6	-	-	-	-	-	-	-	-	(Toledo, 2016)
Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia	15,3	8,400	-	0,050	0,003	0,290	-	-	-	(Valencia-arroyave et al., 2015)
Valle de Aburra	10,730	-	-	-	-	-	-	-	-	(Giraldo Aristizabal & Toro Gómez, 2008)
Cartagena de Indias	1,1 ± 1,08	0,32 ± 0,35	0,10 ± 0,11	0,04 ± 0,04	0,00	0,02 ± 0,02	6,82 ± 6,75	0,00	0,06 ± 0,07	Autora

* Factor de emisión en 100*g km⁻¹

7.4. Inventario de emisiones

Teniendo en cuenta los datos de emisiones obtenidos para el Corredor de Carga y la compilación de las emisiones de motocicletas, buses y SITM Transcaribe en las principales vías de la ciudad, es posible realizar un inventario de emisiones que permita comparar fácilmente esta información. La Tabla 13 presenta un inventario de emisiones de fuentes móviles de la ciudad de Cartagena que recopila la información de las emisiones atmosféricas generadas por las motocicletas y el transporte público de la ciudad.

Tabla 13. Inventario de emisiones de fuentes móviles de la ciudad de Cartagena.

Emisiones (kg/h)		Motos	Buses	SITM Transcaribe
Contaminantes criterio	CO	115,88	22,14	0,07
	VOC	34,72	5,18	0
	NOx	4,11	176,36	0
	SOx	0,06	0,08	0
	PM	1,64	57,17	0

Fuente: Autora

De los gases reportados en la Tabla 13, es posible determinar que el CO es generado en un 80,15% por motocicletas mientras que los NOx y el PM son emitidos principalmente por los buses convencionales (97,72% y 97,21% respectivamente). Por último, las emisiones del SITM Transcaribe no son representativas para la ciudad de Cartagena.

Los resultados reportados en este trabajo indican que una de las principales fuentes de NOx y PM son los buses convencionales, por lo tanto, si se desearan reducir los niveles de emisiones de estos gases es importante generar políticas públicas que controlen la

cantidad y el buen mantenimiento de este tipo de vehículos que transitan por la ciudad. La transición de buses convencionales al nuevo sistema de transporte masivo Transcaribe que se está realizando en Cartagena tiene un impacto positivo en términos de la calidad del aire de la ciudad. La chatarrización de los buses convencionales y la implementación de la flota de buses del nuevo sistema de transporte masivo, hace parte de las políticas públicas que deben continuar siendo aplicadas en la ciudad para mejorar la calidad del aire de Cartagena de Indias.

7.5. Determinación del CO₂ Equivalente.

Para lograr cuantificar los GEI y comparar la generación de estos en cada una de las vías de este estudio.

Tabla 14. CO₂ Equivalente producido por motocicletas.

Emisiones (kg/h CO ₂ eq)	Tv 54 Semana	Tv 54 Sabado	Corredor de Carga Sabado (Mamonal - Cartagena)	Corredor de Carga Semana (Mamonal - Cartagena)	Corredor de Carga Sabado (Cartegena - Mamonal)	Corredor de Carga Semana (Cartagena - Mamonal)	Av. Pedro de Heredia
CO ₂	681,11	533,59	55,15	305,86	112,69	92,85	1171,49
N ₂ O	0	0	0	0	0	0	0
CH ₄	138,18	90,93	9,03	52,92	18,27	17,01	246,54
Total	819,29	624,52	64,18	358,78	130,96	109,86	1418,03

Fuente: Autora

De la tabla 14 es posible observar que en la Avenida Pedro de Heredia se genera el 40,22% del total de GEI emitidos en las principales vías de la ciudad, seguido de la Tv 54 semana en donde se genera el 23% de los GEI. Este resultado indica que es necesario que las motocicletas hagan uso de vías alternas con el fin de disminuir las emisiones generadas sobre estas avenidas, especialmente la Avenida Pedro de Heredia.

8. Conclusión

Los ciclos de conducción determinados en el Corredor de Carga de la ciudad de Cartagena presentan velocidades promedio que supera la velocidad máxima permisible de 40 km/h en esta vía, esto probablemente se debe a la falta de semaforización y reductores de velocidad sobre esta vía e incluso cuando existen puntos de congestión las motocicletas logran pasar fácilmente entre los demás vehículos sin detenerse, lo cual se puede evidenciar al observar los ciclos representativos encontrados en este estudio ya que no presentan ninguna parada.

Por otra parte, los resultados de estimación de emisiones indican que el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO) son los gases mayormente emitidos por las motocicletas que transitan sobre el Corredor de Carga y la Avenida Pedro de Heredia.

Por otro lado, al comparar la flota vehicular, se identificó que son los buses lo mayores emisores de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) y entre más viejos sean los buses, estas cifras seguirán en aumento; y se evidencia que el SITM Transcaribe no genera emisiones representativas para la ciudad de Cartagena, ya que para todos los contaminantes sus emisiones son cercanas a cero.

Al determinar el factor de emisión para motos en la ciudad de Cartagena y compararlo con los niveles máximos permisibles de CO y NO_x establecidos en la resolución 910 de 2008, se encontró que las emisiones de estos contaminantes generadas por motos no exceden los límites decretados.

Finalmente se construyó un inventario de fuentes móviles para la ciudad de Cartagena que incluye los datos de emisiones obtenidos para motocicletas, buses y SITM Transcaribe en las principales avenidas de la ciudad, este inventario de emisiones indica que del total de PM emitido, el 97,21% es generado por buses convencionales, al igual que el total de NOx, la mayor proporción también es emitida por buses convencionales (97,72%), mientras que son las motocicletas las mayores generadoras de CO con el 80,15% de las emisiones totales de este contaminante.

Estos resultados indican que en términos de calidad del aire se debe impulsar el proceso de chatarrización de buses convencionales y continuar con el proceso de implementación del SITM Transcaribe para disminuir los niveles de NOx y PM. Actualmente este proceso está estancado ya que los recursos están siendo utilizados para dar prioridad a otro tipo de proyectos, pero los resultados presentados en este trabajo expresan la importancia de darle prioridad al proceso de chatarrización, que para principios del año 2018 solo se había realizado a 450 buses de los 700 vehículos que se tenían como meta.

9. Trabajo futuro

Para seguir avanzando con la construcción del inventario de emisiones de fuentes móviles de Cartagena se deben determinar las emisiones generadas por los automóviles y demás vehículos que hacen parte del parque automotor de la ciudad. Para este fin se recomienda continuar con la metodología establecida en este proyecto y seguir con la misma secuencia de trabajo que permita recopilar y validar todos los datos encontrados.

Además, debido a que el SITM Transcaribe ha aumentado su flota y mejorado su funcionamiento desde el momento que se realizó este estudio, se recomienda actualizar los datos de este tipo de vehículo, igualmente como la cantidad de buses convencionales ha disminuido al implementar el SITM se debe tener en cuenta la disminución en la cantidad de estos.

10. Referencias

- Aguilar Vélez, C. E. (2016). Aproximación a un inventario de emisiones para buses de transporte público urbano en la ciudad de Cartagena, Colombia.
- Alemla Marco, H. (2012). La evolución de la moto.
- Adak, P., Sahu, R., & Elumalai, S. P. (2016). Development of emission factors for motorcycles and shared auto-rickshaws using real-world driving cycle for a typical Indian city. *Science of the Total Environment*, 544, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.099>
- Álvarez, V. (2015). Estimación de los factores de emisión para co y pm 2.5 generados por el tráfico vehicular en la ciudad de cartagena.
- Barlow, T. J., Latham, S., Mccrae, I. S., & Boulter, P. G. (2009). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*.
- Bespalov, V. I., Gurova, O. S., & Samarskaya, N. S. (2016). Main Principles of the Atmospheric Air Ecological Monitoring Organization for Urban Environment Mobile Pollution Sources. *Procedia Engineering*, 150, 2019–2024. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.286>
- Cartagena Cómo Vamos. (2017). Informa Calidad De Vida 2016.
- Celoni, S. (2007). Motores De Combustion Interna, 1–94.
- Centro de Estudios de la Motocicleta. (2014). Mecanica de Motocicletas. <https://doi.org/10.11477/mf.5001100562>
- Clean Air Institute. (2013). Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano de carga y guías para la recopilación y organización de datos.
- Consejo Colombiano de Seguridad. (2015). Ficha tecnica gasolina automotor. Retrieved from <https://goo.gl/bdSDfZ>
- Echeverri Londoño, C. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Cordoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellin*, 5(9), 85–96. <https://doi.org/1692-3324>
- Echeverría Gonzalez, M. M., & Viloría Marimon, O. M. (2017). Estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de las motocicletas en Cartagena de Indias.
- EDURBE. (2017). Corredor de acceso rápido a la variante de cartagena contrato de concesion n° 0868804.

- Estrada Alarcón, J. (2008). Automatización de un dinamometro de chasis. Retrieved from http://p8080-132.248.9.195.pbidi.unam.mx:8080/tesdig2/Procesados_tesis_2008/octubre/0635397/Index.html
- Estrat, A. (2014). Presentación Evaluación calidad de vida 2014.
- Feng, X., Wang, T. L., & Zhao, Q. (2013). The Application of the IVE Model for Establishing the Vehicle Emission Inventory in the Urban Areas of Chongqing. *Applied Mechanics and Materials*, 361–363, 854–859. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.361-363.854>
- Garcia, L., Corrêa, S., Penteado, R., Daemme, L., Gatti, L., & Alvim, D. (2013). Measurements of Emissions from Motorcycles and Modeling Its Impact on Air Quality, *24*(3), 375–384.
- Geng, Y., Ma, Z., Xue, B., Ren, W., Liu, Z., & Fujita, T. (2013). Co-benefit evaluation for urban public transportation sector a case of Shenyang , China. *Journal of Cleaner Production*, 58, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.034>
- Giraldo Aristizabal, W. A., & Toro Gómez, M. V. (2008). Estimation of the emission polluting agents by motorcycles in the aburra valley, 241–250.
- Goel, R., & Guttikunda, S. K. (2015). Evolution of on-road vehicle exhaust emissions in Delhi. *Atmospheric Environment*, 105, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.045>
- González Oropeza, R. (2005). Los ciclos de manejo , una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte.
- Granada, L. F., & Cabrera, B. (2007). Estimación de las emisiones de fuentes móviles utilizando el mobile 6 en cali – colombia, (6).
- Grupo de Investigaciones Ambientales CIDI. (2008). Monitoreo de Fuentes Móviles, 1–18.
- Hassani, A., & Hosseini, V. (2016). An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution. *Transportation Research Part D*, 47(October 2002), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.003>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. INECC-SEMARNAT. (2013). Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas, 1–146.
- Lesman.com. (2019). Testo Authorized Distributor - Buy or rent TESTO instruments at Lesman.com. [online]

- Maschinenbau Haldenwang. MAHA. (2001). Dymomierze, analizatory spalin do silników benzynowych i na gaz.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. IPCC. (1997). Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada em 1996. *Reino Unido: IPCC WGI Technical Support Unit*, 1996–1997.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.*, (October), 129–234. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.220407>
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. IPCC. (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad - Resumen para responsables de políticas.*, 34.
- Jaiprakash; Gazala; Anil; Akash and Minza. (2016). ON-road Emissions Of CO, CO2 and NOX from Four Wheelers and Emission Estimates for Delhi. *Jes*, (X), 9. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.01.034>
- Jennings, B. G., & Jennings, G. (2007). *Two-Stroke Tuner's Handbook*, 158.
- Kholod, N., Evans, M., Gusev, E., Yu, S., Malyshev, V., Tretyakova, S., & Barinov, A. (2016). A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk. *Science of the Total Environment*, 547, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.151>
- Lang, J., Cheng, S., Wei, W., Zhou, Y., Wei, X., & Chen, D. (2012). A study on the trends of vehicular emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China. *Atmospheric Environment*, 62, 605–614. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.006>
- Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista EIA.*, (16), 149–162. Retrieved from www.redalyc.org/pdf/1492/Resumenes/Resumen_149222630011_1.pdf
- Lopez Palancar, L. (2008). Comparación de Motores Diesel de 2T y 4T.
- Martínez Villegas, A. (2007). Motores de combustión interna, 1–94.
- Mishra, D., & Goyal, P. (2014). Estimation of vehicular emissions using dynamic emission factors: A case study of Delhi, India. *Atmospheric Environment*, 98, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.047>
- Naciones Unidas. (1998). Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. *Protocolo de Kyoto*, 61702, 20. Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

- Nguyen, K., Nguyen, H., & Nguyen, V. (2018). Performance enhancement and emission reduction of used motorcycles using fl exible fuel technology. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.004>
- Perez, F., Puliafito, E., & Pirani, K. (2009). Calculo de las emisiones del transporte para la ciudad de Buenos Aires usando un sistema de información geográfico. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 7.57-7.64. Retrieved from <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2009/2009-t007-a008.pdf>
- Racelogic. (2014). Vbox Sport, (10).
- Saleh, W., Kumar, R., Kirby, H., & Kumar, P. (2009). Real world driving cycle for motorcycles in Edinburgh. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(5), 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.03.003>
- Sanabria Sandí, R. F. (2010). Desarrollo de un ciclo de conducción para la ciudad de San José de Costa Rica, 1–15.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT (2019). Opera Semarnat sensores remotos en el valle de México para detectar vehículos altamente contaminantes. [online] gob.mx.
- Toledo, D. (2016). Estudio de contaminación de motocicletas de 4 tiempos en la ciudad de Cuenca.
- Tong, H. Y., Hung, W. T., & Cheung, C. S. (1999). Development of a driving cycle for Hong Kong, 33, 2323–2335.
- Tsai, J. H., Chiang, H. L., Hsu, Y. C., Peng, B. J., & Hung, R. F. (2005). Development of a local real world driving cycle for motorcycles for emission factor measurements. *Atmospheric Environment*, 39(35), 6631–6641. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.040>
- Tsai, J., Huang, P., & Chiang, H. (2017). Air pollutants and toxic emissions of various mileage motorcycles for ECE driving cycles. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.019>
- US EPA. (2002). Draft Design and Implementation Plan for EPA’s Multi-Scale Motor Vehicle & Equipment Emission System (MOVES), (October).
- Valencia-arroyave, D., Muñoz-duque, M. A., Muñoz, A. R., Alejandro, L., Jaramillo, B., & Hoyos-restrepo, C. A. (2015). Modelo para la estimación de emisiones vehiculares como herramienta para la gestión ambiental institucional *, 10(1), 22–39.
- Zhang, Q., Xu, J., Wang, G., Tian, W., & Jiang, H. (2008). Vehicle emission inventories projection based on dynamic emission factors: A case study of Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 42(20), 4989–5002. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.010>

Zhang, X., Zhao, D. J., & Shen, J. M. (2012). A synthesis of methodologies and practices for developing driving cycles. *Energy Procedia*, 16(PART C), 1868–1873. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.286>