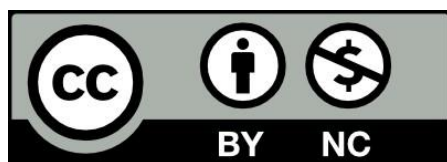


ESTIMACIÓN DE LA COMPENSACIÓN DE CO₂ DEL ARBOLADO URBANO RESPECTO
LAS EMISIONES VEHICULARES DEL TRÁNSITO DE MOTOCICLETAS EN EL
SEPARADOR VIAL DEL ESTADO MACAL, Cr 19 ENTRE CALLES 23ª 25,
VILLAVICENCIO



OMAR YESSID NAVARRO ROMERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

ESTIMACIÓN DE LA COMPENSACIÓN DE CO₂ DEL ARBOLADO URBANO RESPECTO
LAS EMISIONES VEHICULARES DEL TRÁNSITO DE MOTOCICLETAS EN EL
SEPARADOR VIAL DEL ESTADO MACAL, Cr 19 ENTRE CALLES 23ª 25,
VILLAVICENCIO

OMAR YESSID NAVARRO ROMERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

ANGÉLICA MARÍA BUSTAMANTE ZAPATA

Ingeniera Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Yesica Natalia MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano de Facultad

ANGÉLICA MARÍA BUSTAMANTE ZAPATA

Director Trabajo de Grado

JORGE ALESSANDRI ROMERO NOVOA

Jurado

RODRIGO ISAAC VELOSA CAICEDO

Jurado

Villavicencio, septiembre de 2019

Contenido

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.3. OBJETIVOS.....	19
1.3.1. Objetivo General	19
1.3.2. Objetivos Específicos	19
1.4. JUSTIFICACIÓN	19
1.5. ALCANCE DEL PROYECTO	21
1.6. ANTECEDENTES.....	23
1.7. MARCO TEÓRICO	26
1.8. MARCO CONCEPTUAL	29
1.9. MARCO LEGAL	32
2. METODOLOGÍA.....	35
2.1. FASE I: ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE BIOMASA Y CARBONO ALMACENADOS.....	37
2.1.1. Caracterización de los árboles de la zona.....	37
2.1.1.1 Medición del diámetro (DAP) del árbol.....	37
2.1.1.2. Medición de la altura del árbol.....	37
2.1.1.3. Características generales del arbolado.....	38
2.1.2. Determinación de la biomasa, carbono almacenado y tasa de crecimiento anual.....	38
2.1.2.1. Estimación de la biomasa aérea.....	38
2.1.2.2. Estimación indirecta del contenido de carbono en la biomasa aérea	40
2.1.2.3. Tasa de crecimiento anual	40
2.2. FASE II: ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO	41
2.2.1. Características de la ruta	41
2.2.2. Distribución y creación de la flota	42

Estimación de la compensación de CO ₂ respecto a las emisiones vehiculares	6
2.2.3. Patrones de conducción	43
2.2.4. Inserción de datos de localidad	44
2.2.5. Factores de emisión	44
2.3 FASE III: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE EMISIONES POR PARTE DE LA AFLUENCIA VEHICULAR DE DIÓXIDO DE CARBONO Y LA PROPORCIÓN ALMACENADA POR LOS ÁRBOLES DEL SEPARADOR VIAL	45
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	74
5. CONCLUSIONES.....	76
6. RECOMENDACIONES	79
7. REFERENCIAS	80
8. APÉNDICES	84

Lista de tablas

TABLA 1. LEYENDA DE ESTRATIFICACIÓN.....	39
TABLA 2. ECUACIONES ALOMÉTRICAS EMPLEADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA.....	39
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS TIPOLOGICAS Y TECNOLÓGICAS	43
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DASOMÉTRICAS DEL ARBOLADO	47
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DASOMÉTRICAS DE LOS ÁRBOLES QUE PERMITEN DETERMINAR SU MORFOLOGÍA.....	50
TABLA 6. CÁLCULO DE BIOMASA AÉREA DE LAS ESPECIES QUE TIENEN UN DAP MAYOR A 10 CM.....	54
TABLA 7. CÁLCULO DE BIOMASA AÉREA PARA LAS PALMAS	55
TABLA 8. BIOMASA AÉREA TOTAL Y ESTIMACIÓN DE CARBONO ALMACENADO	57
TABLA 9 MUESTRA PARA POBLACIÓN FINITA.....	62
TABLA 10 INFORMACIÓN DE ENTRADA PARA EL MODELO IVE.....	67
TABLA 11 FACTORES DE EMISIÓN PARA ESCENARIOS DE ESTRÉS BAJO, MEDIO Y ALTO.....	68
TABLA 12 EMISIÓN DIARIA DE CO ₂ POR PARTE DE LA AFLUENCIA VEHICULAR	69
TABLA 13 DATOS DE CO ₂ POR UNIDAD DE EMISIÓN Y ALMACENAMIENTO.....	70

Lista de Figuras

FIGURA 1. DELIMITACIÓN RUTAS PRINCIPALES DE FLUJO VEHICULAR Y ZONA DE ESTUDIO	22
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS	36
FIGURA 3. PORCENTAJE DE CARBONO ALMACENADO POR ESPECIE	57
FIGURA 4. INCREMENTO MEDIO ANUAL DESDE LOS PRIMEROS REGISTROS MULTITEMPORALES DE LOS ÁRBOLES EN LA ZONA DE ESTUDIO	59
FIGURA 5. FLUJO VEHICULAR DE MOTOCICLETAS EN EL HORARIO 6:00 A.M. – 7:00 A.M	60
FIGURA 6. FLUJO VEHICULAR DE MOTOCICLETAS EN EL HORARIO 12:30 M – 1:30 P.M.....	61
FIGURA 7. FLUJO VEHICULAR DE MOTOCICLETAS EN EL HORARIO 5:40 P.M. – 6:40 P.M.....	61
FIGURA 8. COMPORTAMIENTO DE CONDUCCIÓN EN CATEGORÍAS LIVIANA, MEDIANA Y PESADA	63
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.....	64
FIGURA 10. RUTAS DE FLUJO EN LA ZONA DE ESTUDIO	65
FIGURA 11. VELOCIDADES MÁXIMAS DE LAS MOTOCICLETAS EVALUADAS	66
FIGURA 12. PROYECCIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS POR PARTE DE LAS MOTOCICLETAS VS FIJACIÓN REALIZADA POR EL ARBOLADO URBANO EXISTENTE EN EL SEPARADOR VIAL.....	71
FIGURA 13. DÉFICIT DE COMPENSACIÓN	72

Lista de Anexos

ANEXO A. LÍNEA DE TIEMPO DE LOS ANTECEDENTES UTILIZADOS EN EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	84
ANEXO B. IMÁGENES DESCRIPTIVAS PARA LA CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL TIPO DE HOJA Y TIPO DE COPA	84
ANEXO C. IMÁGENES DE LOS ÁRBOLES MÁS REPRESENTATIVOS DE LA ZONA DE ESTUDIO	85
ANEXO D. MULTI-TEMPORALIDAD DEL ARBOLADO URBANO EN EL SEPARADOR VIAL FRENTE AL ESTADIO MACAL DE VILLAVICENCIO	86
ANEXO E. MAPA DE LOS PUNTOS DE GEORREFERENCIACIÓN DE LA RUTA DE ESTUDIO	87
ANEXO F. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE MUESTRA	89
ANEXO G. CARACTERIZACIÓN DE MOTOCICLETAS Y VELOCIDADES	90

Glosario

ALMACENAMIENTO DE CARBONO: acumulación de carbono mediante procesos biológicos como la fotosíntesis

BIOMASA AÉREA: es la masa en general que tiene el árbol, entiéndase como tallo, ramas, hojas y demás

CARACTERÍSTICAS DASOMÉTRICAS: características medibles de los árboles, describen su desarrollo y crecimiento, es usada para obtener información en los inventarios forestales

COMPENSACIÓN: son acciones o actos que generan beneficios ambientales correspondientes a los daños o afectaciones ambientales generados por proyectos, obras o actividades

CONCENTRACIÓN DE UNA SUSTANCIA EN EL AIRE: es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen del aire en la cual está contenida

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire

DIÁMETRO A LA ALTURA DEL PECHO (DAP): es el diámetro del fuste o tronco de un árbol medido a la altura de un metro con treinta centímetros a partir del suelo

ECUACIÓN ALOMÉTRICA: relaciona el crecimiento heterogéneo de las distintas partes de un organismo (los árboles en este caso) y las distintas partes del mismo

EMISIÓN: es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, proveniente de una fuente fija o móvil

FUENTE MÓVIL: es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza

PATRONES DE CONDUCCIÓN: entiéndase como todos los cambios en velocidad y aceleración del vehículo que influyen cambios en el motor del mismo, cambios de los que dependen las emisiones atmosféricas

SUMIDERO DE CARBONO: fuente que representa la captación de carbono para su almacenamiento y posterior transformación

Resumen

La compensación ambiental es una forma de contrarrestar los efectos adversos de situaciones no evitables, como las emisiones atmosféricas por parte de las motocicletas. El presente trabajo expone la estimación de dicha compensación en el separador vial frente al estadio MACAL en la ciudad de Villavicencio.

Inicialmente se analizaron las características dasométricas del arbolado urbano, partiendo de métodos no destructivos que garantizaron la conservación de las características ambientales de la zona de estudio; para ello, se tomaron mediciones en campo como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de los fustes, altura total, tipo de hoja, tipo de copa, entre otros parámetros que fueron dispuestos en ecuaciones alométricas para obtener, de manera teórica, el total de carbono almacenado en el separador, el cual correspondió a: 338,98 Ton de CO₂/año.

Seguido de esto, se estimó la cantidad de CO₂ en Ton/día del promedio de motocicletas que transitaron en hora pico (5:40 p.m. – 6:40 p.m.) durante 10 días mediante el modelo internacional de Emisiones Vehiculares IVE (por sus siglas en inglés); los datos requeridos para la modelación fueron: clasificación de las motocicletas (liviano, mediano, pesado), tipo de motor (2 tiempos o 4 tiempos), tipo de combustible (gasolina), velocidad promedio, aceleración, entre otros datos que se tomaron en mediciones de campo, para dar como resultado un total de 1409,6 Ton de CO₂ emitidas por año.

Finalmente se relacionaron los datos de almacenamiento de carbono con la cantidad de emisiones realizadas por las motocicletas que transitaron por el sector, para luego ser proyectadas en un modelo de 10 años que partió de índices de crecimiento poblacional e índices de motocicletas por habitante en la ciudad de Villavicencio, el resultado mostró un déficit en la compensación de las emisiones, pues tan solo en el primer año de estudio hace falta la fijación del 76% del CO₂ emitido, por tanto, se hace el análisis de posibles soluciones para disminuir este porcentaje.

Palabras Clave: Estimación de CO₂, características dasométricas, almacenamiento de carbono, emisiones atmosféricas vehiculares, compensación ambiental.

Abstract

Environmental compensation is a way of counteracting the adverse effects of non-avoidable situations, such as atmospheric emissions by motorcycles; this work sets out the estimate of this compensation of the road separator against the Villavicencio's MACAL stadium.

Initially, the dasometric characteristics of urban woodland were analyzed, starting from nondestructive methods that ensured the conservation of study area; for this, fields measurements were taken such as diameter at breast height, stem height, total height, leaf type, growth habit, among other parameters that were arranged in allometric equations to obtain, theoretically, the total carbon stored in the separator, which corresponded to: 338,98 Ton CO₂/year.

Following this, it was estimated the amount of CO₂ in Ton/day of the average of motorcycles traveling at peak time (5:40 p.m. – 6:40 p.m.) for 10 days using the International Vehicle Emissions Model (IVE); the data required for modelling were: classification of motorcycles (light, medium, heavy), type of engine (2 times or 4 times), type of fuel (petrol), average speed, acceleration, among other data taken in field measurements, resulting in a total of 1409,6 Ton of CO₂ emitted per year.

Finally, carbon storage was related to the amount of emissions from motorcycles travelling in the sector, to be projected in a model of 10 years that started from population growth indices and motorcycle indices per habitant in Villavicencio, the result showed a deficit in the compensation of emissions, in the first year of study alone, 76% of the CO₂ emitted needs to be fixed, therefore, an analysis is made of possible solutions to reduce this percentage.

Key Word: CO₂ estimation, dasometric characteristics, carbon storage, vehicle atmospheric emissions, environmental compensation

Introducción

Debido al crecimiento y desarrollo poblacional, las emisiones atmosféricas se han incrementado en las grandes ciudades y en las ciudades en expansión (Franklin, Diaz, & Syphard, 2016). Este hecho se atribuye, de manera individual, al aumento del parque automotor del cual se benefician los ciudadanos para la movilidad rutinaria.

“Se considera una ciudad en expansión si sus habitantes se encuentran entre los 50.000 y 500.000 habitantes y su tasa de crecimiento ha aumentado rápidamente los últimos años, superando la tasa nacional de 1,7% “ (Pabón, 2011). En ciudades como Villavicencio, donde se evidencia una tasa de crecimiento anual de 2,71% (Alcaldía de Villavicencio, 2010), las dinámicas poblacionales inciden en varios aspectos ambientales, pues, como se mencionó anteriormente, los medios de transporte aumentan y a su vez, se incrementan las emisiones atmosféricas.

Las emisiones por los viajes de las fuentes móviles en la ciudad de Villavicencio corresponden al 17% en el total de las emisiones del casco urbano, a su vez los recorridos motorizados corresponden al 69% de la totalidad de viajes realizados, de los cuales la motocicleta sobresale con 14% y los automóviles con 9,8% (Findeter, 2016). Esta es una proporción que va aumentando cada día y es un aspecto que afecta directamente la salud de la población, pues deteriora las características de la calidad del aire y causa otras afectaciones al ambiente como microclimas, aumento del calentamiento global y otras consecuencias indirectas como incendios, contaminación de fuentes hídricas, destrucción de fauna y flora, entre otros (Canales, 2002).

Es por esto que se deben generar acciones que mitiguen los impactos causados por el desarrollo de las actividades cotidianas en la ciudad, de esta manera no solo se previenen las afectaciones al ambiente, sino que también se fomenta la educación ambiental, el bienestar de la población y se mantiene el equilibrio entre los aspectos social, económico y ambiental.

El arbolado urbano, es una de las soluciones más viables y acertadas para compensar las afectaciones realizadas por las emisiones atmosféricas (Galindo & Uribe, 2012), pues sirve como receptor de gases contaminantes y no solo libera oxígeno, sino que también retiene aguas lluvia, fija nutrientes en el suelo, regula la temperatura, sirve como barrera acústica, contra corrientes de viento, brinda

confort, paisaje, ocio, entre otros servicios ecosistémicos de los que se benefician los seres vivos (Quiceno & Álvarez, 2016).

En este contexto, se motiva a realizar investigaciones que resalten la importancia del arbolado urbano en ciudades que se encuentran en expansión, articulando evaluaciones de fuentes contaminantes y haciendo énfasis en proyectos sectoriales o a pequeña escala con el fin de evidenciar el estado puntual de los aspectos ambientales y sociales de la ciudad, que, como sucedió en el presente trabajo de investigación, se demuestra la necesidad de asignar y mantener más zonas de este tipo para prevenir las afectaciones al ambiente.

Considerando la pertinencia de las temáticas abordadas, se llevó a cabo la presente investigación, cuyos resultados permitirían dar soporte en la toma de decisión en proyectos institucionales y/o gubernamentales.

1. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del Problema

El desarrollo social, económico, tecnológico y el crecimiento urbano, demandan constantemente la adecuación de infraestructuras, espacios públicos y zonas verdes para realizar las diferentes actividades básicas en el funcionamiento del modelo de vida actual (Franklin J. , Diaz, Syphard, & Regan, 2016).

La deforestación y deterioro de la vegetación se encuentran directamente relacionadas con el aumento del calentamiento global, ya que la vegetación terrestre desempeña un rol estratégico en los ciclos biogeoquímicos además de suministrar importantes servicios ambientales como la termorregulación, la fijación de dióxido de carbono, la producción de oxígeno, así como barreras de sonido, recreación, belleza escénica y confort (Franklin J. , Diaz, Syphard, & Regan, 2016).

En ciudades intermedias como Villavicencio, que son la ruta principal de comunicación entre los departamentos: Cundinamarca, Casanare, Vichada, Guainía, Guaviare y Caquetá, se generan proyectos de construcción y progreso en torno al auge económico, social y turístico que se tiene.

En la ciudad se ha tenido una expansión y desarrollo urbano que ha llevado a alterar las condiciones ambientales de los ecosistemas interviniendo grandes extensiones de sabana y altillanura por infraestructura civil (Pabón, 2011). Sin embargo, en los proyectos de expansión urbana, se debe garantizar que el espacio público y la conservación o recreación de zonas verdes como arbolado urbano, sean uno de los principales elementos estructurales de los Planes de Ordenamiento Territorial, puesto que son elementos articulados y estructuras fundamentales que actúan como agentes reguladores de las condiciones ambientales (Ministerio de Comercio, 1998).

Los escenarios de arbolado urbano como el parque Lineal, parque Los Fundadores, diferentes separadores viales arbolados ubicados en las avenidas principales como el separador del anillo vial y la que es objeto de estudio del presente trabajo: separador vial frente al estadio Macal en la Carrera 19, se encuentran ubicadas estratégicamente en puntos de alto flujo vehicular, para dar conocimiento de las vías principales de alta afluencia vehicular se presenta en la figura 1 el mapa de identificación.

Las emisiones de gases en departamentos como el Meta, cuya base de la economía es la agricultura y la explotación petrolera (Findeter, 2016), son objeto de diferentes estudios y seguimientos; pues para el año 2012, el departamento contaba con 21,24 millones de toneladas de emisiones de CO₂/año, lo cual lo posicionaba como el segundo departamento más emisor de Colombia (IDEAM, 2012).

Teniendo en cuenta las diferentes propuestas y objetivos en la acción por el clima, en Colombia se ha incluido la meta de contribuir con la reducción del 20% del total de emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 (IDEAM, 2012), es decir que, para este año las emisiones del departamento deberían estar en 16,99 millones de toneladas de CO₂/año aproximadamente.

Además de esto, estudios realizados en la ciudad demostraron un indicador de emisión de 3,6 toneladas de CO₂ por habitante/año (Findeter, 2016), el cual se encuentra por debajo de la media nacional 4,2 toneladas de CO₂ por habitante (IDEAM, 2012), partiendo de estos índices y tomando en cuenta la población de Villavicencio, se hace una relación teórica de las emisiones correspondientes para el casco urbano la cual sería de 7,67% del total de emisiones generadas por el departamento. Dentro de esta cantidad de emisiones, el 17% corresponde a fuentes móviles como motocicletas y automóviles (Findeter, 2016).

Debido al aumento que tiene el registro de motocicletas en la ciudad, se hace necesaria la toma de decisiones y la puesta en marcha de proyectos que busquen reducir, mitigar y controlar los impactos generados por las fuentes móviles (Pabón, 2011), pues se registra que por cada 20 personas en la ciudad existe un automóvil (índice de 0,05) y por cada 10, una motocicleta (índice de 0,1) (Findeter, 2016).

Lo anterior representaría que para una población de 451.212 habitantes en Villavicencio (DANE, 2018), en teoría existirían 22.560 autos (población * 0,05 índice de automóviles) y 45.121 motos (población * 0,1 índice de motocicletas), donde este último vehículo de transporte representa más del doble del primero; de esta manera, las emisiones y las consecuencias que estas traen consigo también representan un índice superior con respecto del emitido por los carros.

La ciudad tiene una dinámica de flujo que interconecta los diferentes barrios mediante avenidas y calles principales, de las cuales también se alimentan las rutas escolares, ciclovías, buses colectivos y camiones de carga (ver figura 1). Una de las principales y más largas rutas que tiene estas

características es de la que hace parte la zona de estudio del presente trabajo de investigación, pues atraviesa toda la ciudad y alimenta la Avenida 40 (ruta nacional).

Para efectos del análisis y evaluación de la estimación de la compensación realizada, se hizo énfasis en un tramo de esta gran ruta en el cual convergieran vías principales de hasta 3 carriles como la avenida Catama y la avenida Maracos, vías que sean ruta de buses colectivos como la carrera 19 (ruta Porfia – Catama) y la calle 25 (ruta Centro - Retiro, Popular, Estero); y que a su vez se encontrara cerca a establecimientos de alto comercio o turismo como el Estadio Macal, Fresilandia, Colegio INEM sede Catatumbo, cajeros automáticos y otras zonas de comercio que implican la conglomeración de habitantes.

La zona seleccionada para el estudio del trabajo de investigación se caracteriza, además, porque en ciertas horas del día el flujo vehicular es tan alto que los vehículos generan una acumulación excesiva que impide la circulación normal de la ruta (embotellamiento), esto se debe a que son horarios en los cuales las personas salen de sus trabajos, se culmina la jornada estudiantil, son horas comunes para el desplazamiento del comercio (los sitios de comidas rápidas empiezan sus labores, donde también se incluyen domicilios en moto), entre otros aspectos que contribuyen al aumento de la movilidad (Findeter, 2016).

1.2. Formulación del problema

Partiendo del gran potencial de almacenamiento que tienen los árboles y de la densidad del flujo vehicular, se estima que el arbolado urbano existente en el separador vial frente al estadio MACAL realiza la fijación y posterior almacenamiento del 80% de las emisiones de CO₂ provenientes de la afluencia de motocicletas en la ruta estudiada.

De esta manera se plantea la pregunta problema: ¿Cuál es la proporción de dióxido de carbono que puede ser fijada por el arbolado urbano del separador vial frente al estadio Macal, como medida de compensación respecto a las emisiones de las motocicletas que transitan por el lugar?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar la cantidad de dióxido de carbono que puede ser fijada por el arbolado urbano en el separador vial del Estadio Macal entre las calles 23ª y 25, como medida de compensación respecto las emisiones de las motocicletas que transitan por el lugar, a partir del aforo vehicular y la caracterización dasométrica del arbolado existente.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Estimar la cantidad de dióxido de carbono que puede ser fijado por el arbolado urbano existente en la zona de estudio, mediante el uso de ecuaciones alométricas.
2. Establecer teóricamente la cantidad de emisiones atmosféricas de CO₂ que se genera anualmente por la afluencia de motocicletas que transita alrededor del separador vial por medio de aforo vehicular y modelación de datos obtenidos en campo.
3. Determinar la relación de compensación de CO₂ que tiene el arbolado existente en el área de estudio mediante un modelo de proyección de 10 años donde se relacione la totalidad de las emisiones atmosféricas de las motocicletas con el potencial de fijación de los árboles del separador.

1.4. Justificación

Las acciones antropogénicas requieren de adecuadas compensaciones que reduzcan y/o mitiguen los efectos relacionados con estas afectaciones al ambiente, ya que los impactos pueden repercutir en la salud humana (Franklin, Diaz, & Syphard, 2016); en el caso de las emisiones contaminantes por parte de las fuentes móviles, la medida de compensación más cercana, inmediata y efectiva son los árboles que se encuentran en diferentes puntos estratégicos de las ciudades (Canales, 2002), estos

puntos suelen ser identificados por que están alrededor de zonas donde la afluencia vehicular tiene gran cantidad de vehículos motorizados.

De esta manera, el control y monitoreo de los árboles en la ciudad brinda información sobre el grado de compensación que se tiene ante proyectos que generen impacto ambiental, además, se tiene el conocimiento cuantitativo de los servicios ambientales que prestan las zonas arbóreas en la ciudad; dentro de estos están: prevención de la erosión del suelo, filtración de agua lluvia (evitando inundaciones), regulación de la temperatura atmosférica, recreación, paisaje, entre otras (Franklin, Diaz, & Syphard, 2016).

Cuando se realizan estudios que caracterizan los árboles que reducen las consecuencias del calentamiento global, existe una tendencia a realizar estos seguimientos a las afueras de las ciudades, generalmente los estudios que se encuentran respecto al tema están enfocados en zonas de reserva o de gran densidad vegetal, en sitios alejados de las fuentes de emisiones y contaminación; sin embargo, es de vital importancia que estos estudios se propongan cercanos a las fuentes de emisión o en zonas de alta afluencia vehicular, pues valoran las afectaciones *in situ*, generan conciencia sobre las afectaciones al ambiente y promueven estrategias que permiten mejorar la calidad ambiental de las ciudades.

Por ejemplo, en la revisión inicial realizada para el desarrollo del presente proyecto de investigación, se encontró un informe en Argentina, donde se caracterizó y evaluó la capacidad de fijación de plantaciones forestales, es decir, en zonas de alta extensión vegetal, donde no se tiene incidencia de afectación antropogénica durante los años de crecimiento y desarrollo de los individuos arbóreos, este hecho crea un ambiente retirado de la contaminación de la ciudad y promueve la calidad y estabilidad ambiental (Norberto, 2002).

Por otro parte, a nivel nacional, se encontraron estudios realizados en resguardos indígenas y en jardines botánicos donde los árboles tienen grandes alturas y tienen una alta cobertura vegetal (Quiceno & Álvarez, 2016), estas características pueden impedir la determinación de la altura total y por esto se debe recurrir a otros métodos que fortalezcan el cumplimiento de los objetivos, en el caso del estudio realizado en el resguardo indígena, se tuvo en cuenta la producción de hojarasca analizada en laboratorio para la determinación del almacenamiento de carbono.

En Villavicencio se han desarrollado iniciativas que buscan caracterizar la calidad del aire de la ciudad, con el fin de implementar un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), donde se

estudian las fuentes de emisiones atmosféricas y su desempeño en la ciudad, los cuales evidencian una mayor proporción de motocicletas por habitante que automóviles y de allí, surge la preocupación por generar estrategias que detengan este aumento (Findeter, 2016).

Para contribuir a esta toma de decisiones, se deben generar estudios donde se identifique la incidencia de las emisiones de las motocicletas en la calidad del aire, para poder llevar a cabo programas, proyectos y decisiones que puedan facilitar la toma de decisiones para controlar y manejar el crecimiento de la cantidad de motocicletas convencionales en la ciudad, puesto que este aumento, representa que las principales vías de comunicación se saturen de motocicletas, se generen altos tráficos y, por ende, se concentren las fuentes de emisión.

Es por esto que el presente proyecto de investigación seleccionó una ruta de alta afluencia vehicular, que fuera caracterizada por el tránsito de motocicletas, camiones de carga, buses escolares, buses colectivos, tuviera ciclo-ruta, es decir, que representara un alto tráfico vehicular; además cuyo separador vial arbolado contara con datos existentes en el inventario forestal de la Secretaría de Medio Ambiente de la Alcaldía Municipal de Villavicencio de 2019 (última actualización), con el fin de socializar los resultados obtenidos y que estos puedan ser verificados y/o correlacionados por autoridades o entidades interesadas en la apropiación del tema para diferentes fines.

1.5. Alcance del Proyecto

El desarrollo del proyecto de investigación permitió identificar el potencial de almacenamiento de carbono que tiene el arbolado urbano existente en el separador vial frente al estadio Macal, respecto de las emisiones atmosféricas de CO₂ de las motocicletas que transitan por el sector; además, fue posible plantear un modelo de compensación partiendo de un crecimiento constante en el parque automotor de motocicletas, proyectado a un periodo de 10 años, dada la acelerada tasa de crecimiento en el uso de motocicletas en la ciudad y la posibilidad de incorporar en el modelo de compensación las especies más pequeñas que se encontraron en el sector, a fin de que su tamaño ya pudiera ser considerado en una nueva estimación.

La zona de estudio es parte de una de las vías principales de flujo de la ciudad, pues comunica los barrios aledaños al estadio con la Avenida Catama. Esta sección de la malla vial presenta dos

sentidos de flujo: el primero de ellos es el correspondiente a las motocicletas que van de la Avenida Catama hacia el Parque la Llanura y el segundo sentido lleva la afluencia vehicular en sentido inverso del primero.

Algunos de los barrios que se benefician de esta vía son: barrio Dos Mil, 7 de agosto, barrio El Estero, Macunaima, Popular, entre otros (EAAV, 2017). Además, esta vía comunica flujos vehiculares provenientes de otras partes de la ciudad como la Avenida Maracos y la Calle 25 (ruta principal de autobuses de servicio público). El separador vial existente en la sección de la vía cuenta con 27 árboles de diferentes proporciones y especies. En aras de lograr una mejor percepción de la ubicación y delimitación de la zona de estudio y los dos diferentes sentidos de flujo mencionados anteriormente se presenta el mapa de la ubicación de la zona de estudio en la figura 1.

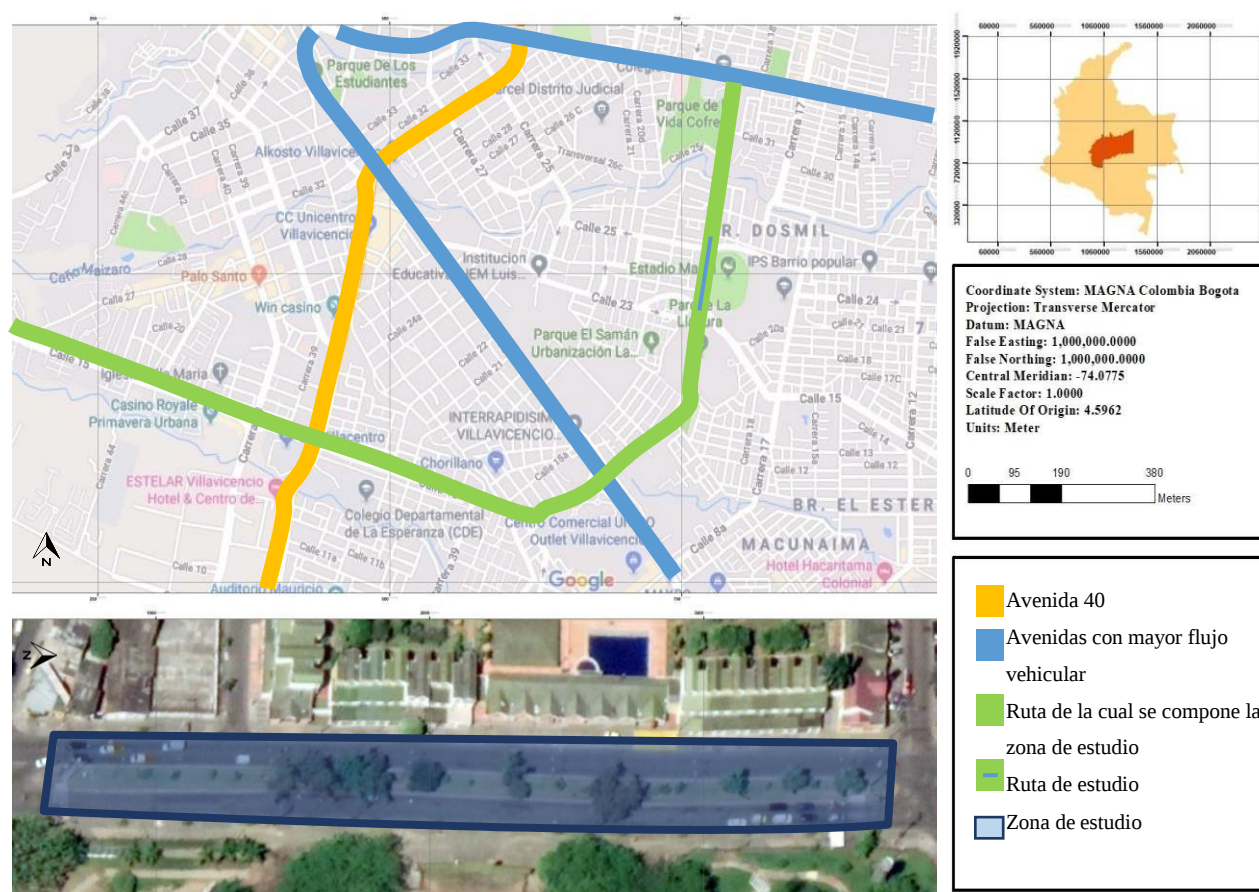


Figura 1. Delimitación rutas principales de flujo vehicular y zona de estudio (Navarro, 2019)

1.6. Antecedentes

Las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (GEI), cobraron importancia en la Cumbre de la Tierra en Rio de Janeiro en 1992, pues se demostró y se estableció que el calentamiento global (producto de las emisiones por actividades antropogénicas) era un riesgo para el equilibrio del ambiente (PNUD, 1992). Cuando se perturban las dinámicas naturales del ambiente, se desencadenan diferentes factores que alteran la calidad del aire y la disponibilidad de recursos naturales, se propagan enfermedades, se fuerzan cambios en los ecosistemas, se generan variaciones en las temperaturas, entre otros (Franklin, Diaz, & Syphard, 2016).

Es por esto que, con el objetivo de prevenir estas consecuencias, la comunidad internacional se propuso el reto de articular un modelo de desarrollo mundial que fuera capaz de garantizar colectivamente el desarrollo económico, el bienestar social y el equilibrio ambiental (PNUD, 1992). Además de esto, se hizo el compromiso de proponer y desarrollar medidas que prevengan y mitiguen el aumento de la temperatura global.

De esta manera en 2002 se presentó un trabajo investigativo que buscaba determinar la capacidad de fijación de las plantaciones forestales de Argentina, adicionalmente se calcularon las emisiones producidas en los procesos de producción primario y secundario (Norverto, 2002). Es de esta manera que se evidencia que los estudios de este tipo deben ir asociados a estimaciones o cálculos de emisiones atmosféricas.

Para realizar este tipo de estudios es necesario partir de una fuente de datos que caracterice las especies arbóreas que existen en la región o en la zona, pues muchas de las ecuaciones que se deben aplicar para no destruir los individuos del área de estudio requieren de sus características específicas, es por esto que, en 2007 se realizó un inventario forestal de las especies más abundantes en la ciudad de Villavicencio – Colombia (Molina & Vargas, 2007), dónde se clasificaron según su procedencia (nativo o introducido), el lugar de pertinencia para ser sembrados (separadores, parques, andenes, jardines, etc.) y finalmente se recomiendan algunas especies adecuadas para mejorar y/o mantener la calidad de aspectos ambientales como: agua, suelo y aire.

La toma de características y su correspondiente estimación del almacenamiento de carbono deben seguir un protocolo o una metodología para evitar error en las mediciones o sesgos en las

estimaciones, así pues, en 2011 se desarrolló el “Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia” (IDEAM, 2011) el cual caracteriza los diferentes bosques de Colombia según su ubicación geográfica y brinda diferentes ecuaciones para la estimación de especies arbóreas y no arbóreas.

La cuantificación de carbono es un factor clave en la obtención de incentivos para generar proyectos que fomenten la reducción de emisiones de GEI; el protocolo para la estimación de biomasa-carbono, es una herramienta que brinda los pasos para planificar las mediciones de biomasa-carbono en campo, de la misma manera, describe los materiales, procedimientos, ecuaciones y recomendaciones que se deben tener para el desarrollo de las prácticas.

El almacenamiento de carbono varía en los diferentes tipos de bosques, pues las características ambientales influyen en la fijación de CO₂ que estos pueden tener (IDEAM, 2011), es por esta razón que existen estudios que se centran en un tipo de bosque en particular, como el realizado por la Universidad de Caldas en 2016, el cual estimó la cantidad de carbono almacenado en un bosque muy húmedo tropical (altitud mayor a 800 m.s.n.m) (Quiceno & Álvarez, 2016).

Así como la ubicación geográfica tiene incidencia en el potencial de fijación de las especies arbóreas, también lo tiene en los índices de emisiones atmosféricas por fuentes móviles, pues si un terreno es inclinado o tiene ciertas condiciones que fuerzan el motor del vehículo a un mayor esfuerzo como la velocidad, aceleración y paradas o arranques constantes, el resultado son mayores emisiones atmosféricas (ISSRC, 2008).

La cuantificación de dichas emisiones se puede realizar mediante monitoreo de emisiones vehiculares, las cuales se realizan con dispositivos electrónicos que verifican la cantidad de gases contaminantes que resultan de la combustión en el motor. En el año 2005 se realizó el programa de “Prevención y control de emisiones contaminantes generadas por motocicletas en el área metropolitana del Valle de Aburrá” (Gómez, 2006). Este programa surgió a partir de la carencia en normatividad ambiental regulatoria para las motocicletas, teniendo en cuenta que su impacto ambiental a la calidad del aire es significativo.

La estimación de emisiones vehiculares también se puede realizar a partir de sistemas operativos que permiten la modelación de las mismas; en 2015 se realizó la estimación de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles, obteniendo como resultado que las emisiones de CO de las motocicletas (19,16 g CO/km) alcanzaron un rango similar al de los vehículos (19,44 g

CO/km) (Rojas, 2015). Tomando en cuenta este tipo de procedimientos y la relación que tienen las emisiones con los sumideros de carbono, se pueden articular proyectos que involucren ambas variables con el fin de determinar el porcentaje almacenado con respecto a una cantidad emitida.

Estas estimaciones deben seguir un patrón a la hora de realizar la metodología de estudio, este sentido se expresa en el trabajo de investigación “Estimación de las emisiones contaminantes por fuente móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de normas de emisión” (Winston, 2006), el cual mediante un diagnóstico inicial genera una base de datos a partir de información primaria que caracteriza los vehículos a estudiar, también tiene en cuenta el estudio de la gasolina empleada por los vehículos, los kilómetros recorridos en el trayecto y demás atributos que influyen en los factores de emisión.

En este estudio se obtuvo el informe de la cantidad de vehículos por clase y modelo de servicio particular por parte del ministerio de transporte de Colombia para la ciudad de Bogotá, en donde se evidencia que la cantidad de motocicletas (1'054.929 unid) es superior a la suma total de las categorías: buseta, bus, camión, camioneta, campero, microbús, moto carguero, tracto mula y volqueta (729.798 unid) (Winston, 2006). De esta manera, se evidencia el exceso de motos que existe en la ciudad.

Existen diferentes métodos para realizar la estimación de las emisiones atmosféricas, uno de ellos es el procesamiento de información mediante el uso de software como: “Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE)”;

para ello, se requieren datos bases que caracterizan la zona de estudio.

Se han realizado diferentes estudios en Colombia que exponen la calidad del aire y el estado de las emisiones por fuentes móviles. En 2011, se publicó el informe “Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia” (Londoño, Correa, & Palacio, 2011); cuyo método para la estimación fue el desarrollo del software “IVE”, donde se obtuvo datos atmosféricos como altura sobre el nivel del mar, humedad relativa, temperatura media, entre otros; además de la caracterización vehicular donde se tomaron datos de velocidad, coordenadas de las rutas, cantidad de vehículos, grupos vehiculares, entre otros.

Para reconocer la capacidad de compensación y mitigación que tienen las áreas de bosque y/o el arbolado urbano frente a las emisiones atmosféricas vehiculares, se hace necesario llevar a cabo estudios que valoren las características dasométricas de los individuos vegetales con el fin de obtener

la relación que estos tienen frente a los impactos generados en el ambiente. En 2013 se desarrolló en la ciudad de Bogotá – Colombia una propuesta metodológica para la cuantificación de la compensación forestal en zona urbana (Díaz, 2013).

En este, como en otros estudios que se han realizado, se definen los criterios dasométricos para establecer el factor de compensación, seguido de esto se clasifican los individuos encontrados en las zonas conforme a sus dimensiones y los criterios previamente establecidos, y finalmente se realiza el cálculo de factores de compensación, en el cual, en promedio, por cada árbol que es talado, se deben sembrar tres.

Para efectos de lograr una percepción del avance temporal de los antecedentes empleados en esta sección del trabajo de grado, se presenta la línea de tiempo de los antecedentes en el anexo A.

1.7. Marco Teórico

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció que, generar y desarrollar acciones contra el aumento de la temperatura global es de vital importancia para garantizar la habitabilidad de la Tierra, pues este incremento conllevaría al deterioro de la calidad atmosférica y esto acarrearía diferentes consecuencias como propagación de enfermedades respiratorias, aumento de los rayos ultra violeta, efecto invernadero y demás problemáticas que afectan la salud de las personas (Cagua, 2017).

Es por esto que los países deben generar proyectos y actividades que contrarresten los efectos adversos del calentamiento global, estas iniciativas no pueden dar espera en los países que se encuentran en vía de desarrollo, pues el progreso social y económico es directamente proporcional a la contribución del aumento de la temperatura (Davis, He, & Others, 2010).

Los factores que reciben progreso y desarrollo en primera instancia son el transporte y la adecuación de las vías, pues las dinámicas poblacionales así lo demandan; los datos de ciudades intermedias y crecientes como Villavicencio, revelan que este modelo de desarrollo, conlleva a su vez, al aumento del parque automotor e incrementa las emisiones atmosféricas (Pabón, 2011), pues cada vehículo representa, en condiciones de fábrica, un factor de emisión de 2,196 kg CO₂/l de Gasolina y 2,471 kg CO₂/l de Diésel (Winston, 2006).

Las emisiones atmosféricas son un aspecto que se encuentra regulado por diferentes entidades, pues inicialmente los vehículos de transporte, reciben una evaluación y monitoreo en fábrica de las sustancias nocivas que pueden emitir y, una vez salen de allí, es responsabilidad del conductor, realizar esta revisión anualmente (Davis, He, & Others, 2010). También se puede realizar el monitoreo de las emisiones mediante equipos de medición que se instalan por lo general en los tubos de escape y generan medidas exactas de emisión (Londoño, Correa, & Palacio, 2011).

Por otra parte, se han desarrollado métodos más teóricos para estimar las emisiones, este consiste en el uso de ecuaciones o sistemas operativos, que, bajo datos previos requeridos, pueden brindar una cuantificación de las emisiones que realizan las fuentes móviles; como el sistema empleado en el presente proyecto de investigación: Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), este sistema puede predecir contaminantes atmosféricos locales, gases responsables del efecto invernadero y tóxicos (ISSRC, 2008).

El proceso para estimar las emisiones en el modelo IVE consta de tres componentes bases: factores de emisión de vehículos, actividad vehicular y distribución vehicular. Estos componentes reúnen datos atmosféricos (humedad relativa, altura sobre el nivel del mar, temperatura, entre otros) y caracterizan las dinámicas del flujo vehicular (velocidad, kilómetros recorridos, número de arranques y paradas).

La diversidad de métodos para medir indirectamente las emisiones vehiculares, surge a partir de la magnitud en el crecimiento del parque automotor y de la afectación que estos tienen al ambiente (Davis, He, & Others, 2010). El dióxido de carbono, entre otros gases de emisión atmosférica, tienen como fuente principal la quema de combustibles fósiles; al llegar a la atmósfera forma una película gaseosa que impide la salida de la radiación infrarroja al espacio, creando una cápsula que retiene la temperatura y altera las dinámicas terrestres, a este fenómeno se le denomina efecto invernadero (Franklin, Diaz, & Syphard, 2016)

Tomando este hecho y relacionándolo con el aumento del parque automotor que se genera como consecuencia del desarrollo económico, el cual presenta diferentes perfiles de densidad que varían según la hora del día, se puede asumir que las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos, hacen parte de las causas que incrementan el calentamiento global y propician un ambiente menos sano para las personas.

Estas variaciones de la densidad vehicular en las diferentes horas del día se encuentran establecidas en el Plan de Acción de Villavicencio en 2016, donde se definen tres horas pico en el día: en la mañana durante las 5:45 – 6:45 horas, al medio día durante las 12:00 – 13:00 horas y en la tarde durante las 17:45 – 18:45 horas (Findeter, 2016). En este orden de ideas, la mayor incidencia de las emisiones atmosféricas que causan afectaciones al ambiente, se encuentra en los horarios de hora pico.

Una de las acciones que contrarrestan las afectaciones ambientales causadas por las emisiones atmosféricas del tránsito vehicular, es la presencia de vegetación en la ciudad, pues las plantas absorben dióxido de carbono y por procesos fotosintéticos, degradan y asimilan este compuesto, y, de la misma manera emiten oxígeno como producto resultante de la fotosíntesis realizada. Además, ofrecen otros servicios ambientales que mejoran la calidad de vida de las personas, pues estos servicios garantizan la calidad del ambiente (Canales, 2002).

Con el desarrollo y avance de estos estudios, surgen varios métodos para la estimación del carbono en ecosistemas forestales, entre los cuales se tiene en cuenta: volumen existente, inventarios forestales, aplicación de ecuaciones alométricas y estimación de biomasa utilizando sistemas de información geográfica (Brown, 1997).

Este avance en los procesos metodológicos se ha realizado con el fin de proteger y mantener las condiciones ambientales de las zonas de estudio, pues se conoce que el equilibrio ecológico es muy débil y cualquier interferencia, puede tardar varios años en recuperarse (Canales, 2002)

Es por esto que el arbolado urbano ha cobrado importancia en los proyectos de desarrollo de las ciudades, pues en estas áreas, se percibe una mejor calidad del aire y se generan microclimas que regulan las altas temperaturas (Galindo & Uribe, 2012). Por ejemplo, una hectárea absorbe en promedio 43 toneladas de CO₂ al año (Norverto, 2002), esto indica que el valor de compensación que tiene la vegetación es significativo, ya que, en promedio, cada 5.000 kilómetros recorridos por un automóvil significa la emisión de 750 kilogramos de CO₂ (ISSRC, 2008).

Esto supone que un automóvil emite 0,826 toneladas de CO₂ en el recorrido y tomando la capacidad de absorción que tendría la hectárea de árboles, se hace una relación de compensación de 1,92%, es decir, que de las 43 toneladas que puede fijar el arbolado, la emisión de un automóvil que recorre 5.000 kilómetros representa el 2% aproximadamente.

Cuando se habla de compensación, se hace referencia a las “medidas y acciones generadoras de beneficios ambientales proporcionales a los daños o perjuicios ambientales causados por acción antropogénica” (MINAM, 2013). En este orden de ideas, la compensación ambiental que se asocia al arbolado urbano en el presente trabajo de investigación, hace referencia al almacenamiento del dióxido de carbono que produce el parque automotor y a su posterior transformación.

1.8. Marco Conceptual

La necesidad de controlar y prevenir el calentamiento global, es uno de los temas más importantes en la búsqueda del bienestar común y sostenibilidad del planeta, pues el aumento de la temperatura en la atmósfera desencadena diferentes afectaciones al ambiente y salud humana como proliferación de enfermedades, aumento del nivel del mar, lluvias ácidas, escases de alimento, sequía, alteración de los ciclos biogeoquímicos, entre otros impactos (Cagua, 2017).

La fuente principal del calentamiento global son los gases de efecto invernadero, este denominado efecto invernadero, es un fenómeno en el cual la producción de calor que se genera por las actividades antropogénicas es absorbida por los gases de la atmósfera (dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, y otros gases de efecto invernadero); allí, una proporción del calor se retiene y otra parte del calor es emitida nuevamente en todas las direcciones (Davis, He, & Others, 2010).

Las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero se clasifican en fuentes fijas y fuente móviles, el primer grupo de fuentes de emisión se caracteriza por que son estáticas, no cambian su sitio ni se pueden transportar (volcanes, plantas industriales, emisiones por digestión aerobia y anaerobia, emisiones por vegetación, actividad microbiana en suelos y océanos, entre otros) (Davis, He, & Others, 2010).

Las fuentes móviles se caracterizan porque son móviles, pueden emitir contaminantes mientras se trasladan de lugar, como, por ejemplo: motocicletas, automóviles, aviones, helicópteros, tranvías, embarcaciones; por lo general, estas fuentes funcionan bajo el aprovechamiento de combustibles fósiles (Rojas, 2015).

La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de las fuentes móviles, puede realizarse por medio de modelos que relacionan variables climáticas, tecnológicas y del comportamiento de conducción, para estimar la cantidad de gases emitidos por los vehículos (ISSRC, 2008).

La modelación realizada en el presente trabajo de investigación fue mediante el modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), el cual se basa en la caracterización de los vehículos y de los patrones de conducción. Estos patrones de conducción parten de la velocidad, aceleración y desaceleración de los vehículos, los cuales tienen un profundo impacto en las emisiones atmosféricas.

El modelo internacional, analiza la potencia específica vehicular (VSP) y el estrés del motor; el primero de estos factores resume el potencial que tiene el vehículo para acelerar y lograr altas o bajas velocidades y el segundo factor hace alusión al conjunto de alteraciones que se producen en el motor como respuesta ante determinadas condiciones de conducción como cuando se cambian las velocidades, se sufre un aumento de las revoluciones o por el contrario el motor no recibe las revoluciones necesarios, entre otros comportamientos que generan cambios en el motor; a su vez, el estrés de motor se clasifica en bajo, medio y alto dependiendo de la magnitud de las condiciones en los patrones de conducción (ISSRC, 2008).

Ambos parámetros son definidos mediante fórmulas que categorizan el resultado en compartimentos de energía (bines, según definición del modelo) que varían dependiendo el estrés del motor, en este orden de ideas el estrés de motor bajo corresponde a bajas energías, el estrés medio a energías medias y estrés alto a energías altas (ISSRC, 2008).

Estos cambios en el motor se ven reflejados en las emisiones vehiculares, por lo cual, todo vehículo ensamblado a partir de 1996 en Colombia, debe cumplir por normatividad con un sistema de catalizador de gases denominado catalizador, el cual beneficia la reacción química de los gases de efecto invernadero que el motor emite; de la misma manera, la normatividad colombiana estipula estándares mínimos de emisión de gases contaminantes a la atmósfera (GEI), por lo cual estas partes de los vehículos no pueden ser removidas ni retiradas, pues esta acción acarrearía el incumplimiento de las normas legales, además de generar un impacto mayor y directo al ambiente (Carballos, 2002).

Debido a que los gases de efecto invernadero se encuentran en la atmósfera y son invisibles, se deben contar con fuentes que puedan capturar con facilidad estos contaminantes, degradarlos y almacenarlos para mejorar la calidad ambiental.

Cuando se habla de almacenamiento de carbono, se hace alusión al proceso fotosintético que tienen las plantas para extraer el dióxido de carbono del aire y transformarlo en oxígeno que posteriormente liberan a la atmósfera, mientras que, el porcentaje de carbono restante lo guardan y hacen parte de su composición física (IDEAM, 2011)

Así como las emisiones de gases de efecto invernadero pueden ser cuantificadas, el almacenamiento de carbono también puede ser estimado mediante el uso de ecuaciones alométricas que recopilan las características morfológicas o dasométricas de los árboles como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de los fustes y altura total, para obtener el total del porcentaje de carbono almacenado (IDEAM, 2011).

Estas características dasométricas revelan el estado de madurez o el tiempo que llevan sembrados los árboles, pues cuanto mayor sea el DAP, mayor es el tiempo de vida que tiene el individuo estudiado (Quiceno & Álvarez, 2016) y, por tanto, mayor será el porcentaje de carbono almacenado.

La estimación de la biomasa se debe realizar con árboles cuyo diámetro a la altura del pecho (DAP) sea superior a 10 centímetros, pues aquellos inferiores contribuyen en bajos niveles a la biomasa y carbono de una parcela o zona arbórea (Brown, 2002).

Sin embargo, estas cualidades solo se evidencian en especies arbóreas, pues en especies no arbóreas como las palmas, no se presenta mayor capacidad de almacenamiento de carbono, sin importar su altura o DAP (IDEAM, 2011), y, así como en un árbol, se determinan las características dasométricas para ser evaluadas en el porcentaje de carbono almacenado; estas partes son: DAP, estipe o tronco y altura total.

Este proceso de fijación, degradación y almacenamiento de carbono se considera como un servicio del ecosistema que hace las veces de compensación ambiental ante las afectaciones producidas por la emisión de sustancias nocivas en el tránsito de fuente móviles, puesto que se obtiene una ganancia (oxígeno) mientras que se elimina un problema (MINAM, 2013).

1.9. Marco Legal

La revisión de la normatividad parte del momento clave para la calidad ambiental, el cual fue en 1992 luego de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, donde se llegó a un acuerdo para negociar un Convenio Mundial sobre el Manejo Sostenible de los Bosques.

Esta cumbre generó una motivación política para la gestión del desarrollo sostenible a nivel nacional, se creó la Comisión para el Desarrollo Sostenible (CDS) y se iniciaron las negociaciones para la Convención de las Naciones Unidas de la Lucha Contra la Desertificación (MINAMBIENTE, 2011)

También se crea la Ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.

Así pues, se establecen las diferentes funciones que corresponden a los entes de control, iniciando con el Ministerio del Medio Ambiente: *Artículo 5:*

- *“Dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir las contaminaciones geo esféricas, hídricas, del paisaje, sonoras y atmosféricas, en todo el territorio nacional”.*
- *“Definir y regular los instrumentos administrativos y mecanismos necesarios para la prevención y el control de los factores de deterioro ambiental”.*

Siguiendo el nivel jerárquico de mando, se tiene el *Artículo 65* que expresa las funciones de los municipios, de las cuales son competentes para el proyecto de investigación:

- *“Dictar con sujeción a las disposiciones legales reglamentarias superiores, las normas necesarias para el control, la preservación y la defensa del patrimonio ecológico del municipio”.*
- *“Participar en la elaboración de planes, programas y proyectos de desarrollo ambiental y de los recursos naturales renovables a nivel departamental”.*

Para el año 1995 se crea el Reglamento de protección y control de la calidad del aire bajo el Decreto 948, en el cual se instauran prohibiciones y reglamentaciones con el fin de promover la calidad del

aire. El *Artículo 37* se ajusta a las fuentes de emisión que se expresan en el trabajo de investigación: *“Se prohíbe la descarga al aire, por parte de cualquier fuente móvil, en concentraciones superiores a las previstas en las normas de emisión, de contaminantes determinados por el Ministerio del Medio Ambiente”*.

Los compuestos con los que se fabrica la gasolina son de importante monitoreo y control, pues de esto depende que las emisiones después de la combustión de la gasolina no contengan compuestos perjudiciales potencialmente tóxicos, que no sean de fácil depuración por el ambiente y, que, por el contrario, su sola emisión, represente un riesgo inminente para la calidad del aire. Es por esto que se crea el Decreto 1530 de 2002 donde se reglamenta el uso de estos compuestos tóxicos. *Artículo 1: “No se podrá importar, producir o distribuir en el país, gasolinas que contengan tetra etilo de plomo”*.

Con el desarrollo social que trae consigo el pasar de los años, se observa la necesidad de implementar nuevas disposiciones sobre niveles de emisiones, autoridades ambientales competentes, rangos de emergencia y niveles de exposición. Mediante la Resolución 610 de 2010 Se establece la norma de calidad del aire, con el propósito de garantizar un ambiente sano y minimizar los riesgos sobre la salud humana que puedan ser causados por la concentración de contaminantes en el aire ambiente, establece los niveles permisibles de los contaminantes atmosféricos y las obligaciones de las autoridades ambientales.

Para el año 2015 se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible bajo el Decreto 1076. El cual presenta por títulos los diferentes aspectos ambientales que deben recibir atención y manejo; del título 5 se destacan los artículos más relevantes que tratan temáticas sobre el aire:

- *Artículo 2.2.2.3.3.1: “Los estudios ambientales de recursos forestales son el diagnóstico de alternativas y el estudio de impacto ambiental que deberán ser presentados ante la autoridad ambiental competente”*.
- *Artículo 2.2.5.1.2.1: “Definición de tipos de los contaminantes del aire”*.
- *Artículo 2.2.5.1.2.2: “Actividades especialmente controladas (sujetas de atención y control por parte de autoridades ambientales), entre otras b) la quema de combustibles fósiles utilizados por el parque automotor”*.

Mediante la Resolución 2254 de 2017 Se establece la norma de calidad del aire y se adoptan disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, en objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera.

En las ciudades se toman medidas para el control y regulación del tránsito de vehículos, esto estipula áreas de no tránsito, reduce el número de vehículos que transita e indirectamente reduce la incidencia de las emisiones atmosféricas. En la ciudad de Villavicencio, mediante el decreto 347 de 2019 se establecen las medidas de pico y placa y se restringen áreas urbanas de circulación.

2. Metodología

La estimación de la compensación que realiza el separador vial inició con la caracterización vegetal en el mes de febrero del periodo académico 2019-1, donde inicialmente se implementó una metodología no destructiva, en conjunto con ecuaciones alométricas para la determinación de la cuantificación de carbono la cual garantizó la conservación de las condiciones morfológicas de los árboles existentes en el separador vial, es decir, que la zona de estudio no fue alterada de ninguna manera.

Seguido de esto, se realizó un aforo vehicular recurriendo a medios electrónicos como cámaras de seguridad y toma de datos en campo con el fin de establecer la cantidad de motocicletas que transitan en los horarios “pico” definidos por el Plan de Acción de Villavicencio en 2016.

Para estimar las emisiones atmosféricas se empleó el modelo internacional de Emisiones Vehicular (IVE), para el cual, se tomó la velocidad con el uso de un velocímetro a bordo de las motocicletas y se realizaron encuestas a los conductores para obtener la caracterización de las motocicletas.

Finalmente se realizó un modelo de compensación basado en una proyección de 10 años en el crecimiento del parque automotor, esto, con el fin de determinar la cantidad CO₂ que sería almacenado por los individuos arbóreos durante este periodo y que, al finalizar el tiempo, se tuviera que contemplar un nuevo modelo donde se incluyeran especies que cumplieran los criterios de DAP para la estimación del almacenamiento.

El diagrama de flujo que resume la metodología empleada para el desarrollo de la estimación de la compensación de CO₂ del arbolado urbano en el separador vial frente al estadio Macal en Villavicencio respecto a las, emisiones vehiculares del sector, se presenta a continuación:

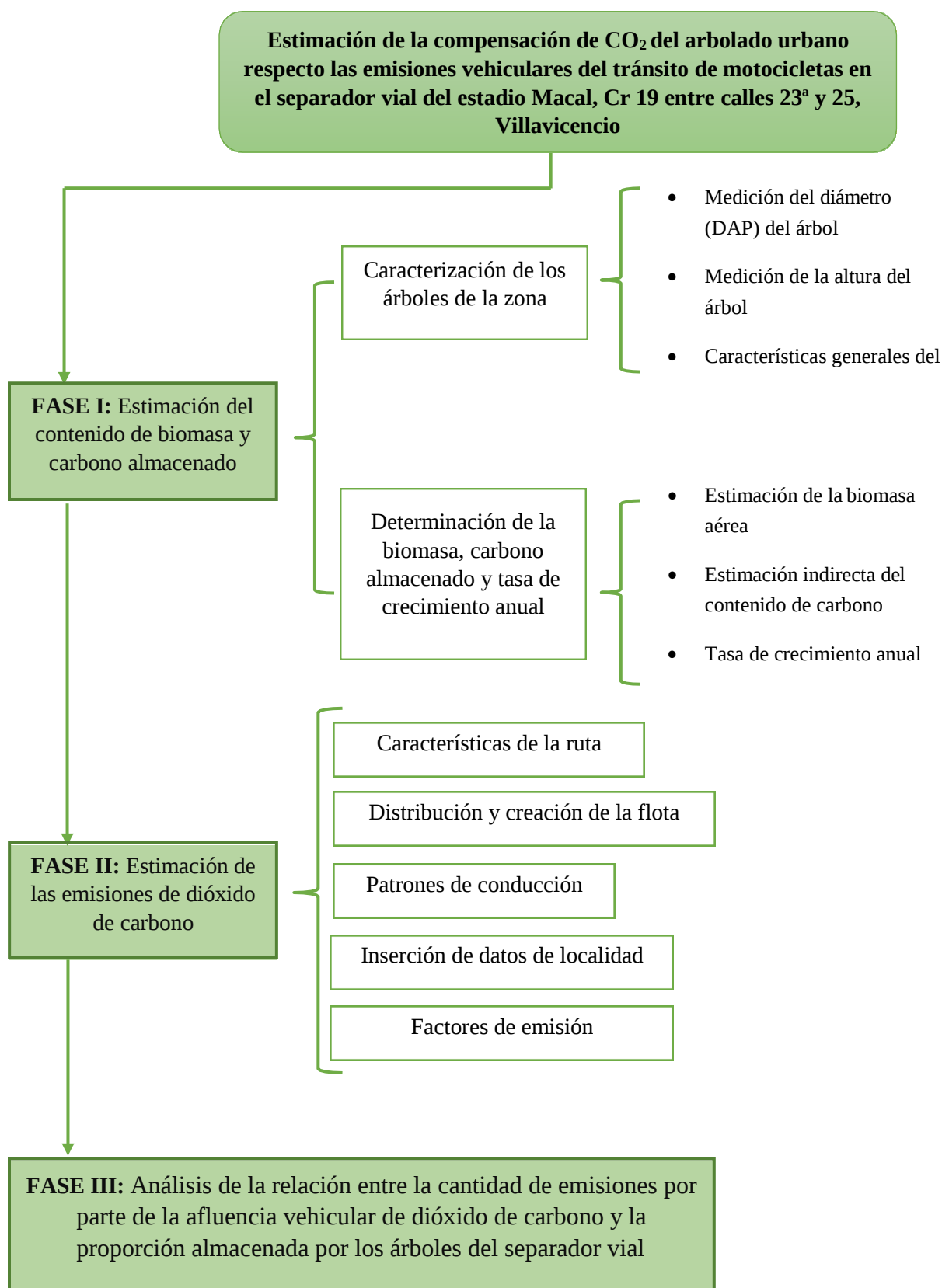


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología empleada para el desarrollo de los objetivos (Navarro, 2019)

2.1. FASE I: Estimación del contenido de biomasa y carbono almacenados

2.1.1. Caracterización de los árboles de la zona

La caracterización de los árboles existentes en el área de estudio, inició con la información del presente año suministrada por la Secretaria de Medio Ambiente de la Alcaldía Municipal; con esta información se realizó el comparativo de las especies existentes en el área de estudio.

Seguido de esto, se procedió a realizar en campo la toma de las características dasométricas a los 27 árboles existentes en el separador vial, estas características fueron: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, altura de los fustes y descripción general de características como: tipo de copa y tipo de hoja.

2.1.1.1. Medición del diámetro (DAP) del árbol

El diámetro de cada individuo presente en el separador vial se midió inicialmente con una cinta métrica, esta medición se denomina circunferencia a la altura del pecho (CAP) puesto que se realiza a 1,3 metros de altura en el tronco del árbol; seguido de esto, el dato de CAP fue puesto en la ecuación $DAP = CAP/\pi$ (IDEAM, 2011) para obtener el diámetro a la altura del pecho.

2.1.1.2. Medición de la altura del árbol

Luego de tomar la medida de la circunferencia a la altura del pecho, se procedió a determinar la altura total del árbol, para ello se tomó una distancia de aproximadamente 10,56 metros y con ayuda de un hipsómetro digital se obtuvo la altura del árbol.

El hipsómetro digital es un dispositivo que permite obtener las características dasométricas requeridas de los árboles, tiene una mirilla desde la cual se observa la copa del árbol formando un ángulo entre la horizontal (distancia que se toma desde la base del árbol) y la inclinación de la mira (IDEAM, 2011).

2.1.1.3. Características generales del arbolado

Después de obtener los parámetros anteriormente mencionados, se realizó la descripción general de árbol, entre las cuál se incluye: tipo de copa, tipo de hojas, alturas de fustes e inclinación del tronco (solo un individuo presento esta característica). Para esta descripción se emplearon las imágenes descriptivas suministradas por la Universidad Autónoma de Colombia, en las que se identifican las diferentes formas de las hojas, para la descripción del tipo de copa se utilizó la imagen descriptiva que se muestra en el anexo B.

Con esta descripción se pretende brindar información sobre el estado morfológico de las especies de árboles que se encontraron en el área de estudio.

2.1.2. Determinación de la biomasa, carbono almacenado y tasa de crecimiento anual

Para el desarrollo de esta fase, se siguió el “Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia” (IDEAM, 2011); puesto que la metodología propuesta inicialmente -Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales del Centro Mundial de Agroforestería- no contaba con el ajuste pertinente al tipo de bosque, precipitaciones, altitud, ni temperatura media.

Este protocolo establece sub parcelas en la zona de estudio, con el fin de cuantificar el carbono almacenado por secciones, estas se sugieren de 10x10m, 20x20m, 50x50m o de 100x100m (IDEAM, 2011); debido a que el ancho del separador no permitía ajustar las parcelas a las establecidas por el protocolo, se asumió el separador vial como una sola parcela, la cual tiene una dimensión de 690 m² (230 m * 3 m), lo que supone un área de 0,069 Hectáreas.

2.1.2.1. Estimación de la biomasa aérea

Inicialmente se obtuvieron los datos de: altitud (m.s.n.m), temperatura (°C) y precipitación (mm año), para clasificar la zona de estudio, bajo los rangos que se establecen en la tabla 1 y poder designar una de las ecuaciones alométricas que se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Leyenda de estratificación					
Tipo de bosque	ID	Altitud (m.s.n.m)	Temperatura (° C)	Precipitación (mm año⁻¹)	Ecuación alométrica
Bosque muy seco tropical	Bms-T	<800	>24,0	500 – 1.000	1
Bosque seco tropical	Bs-T	<800	>24,0	1.000 – 2.000	1
Bosque húmedo tropical	Bh-T	<800	>24,0	2.000 – 4.000	2
Bosque muy húmedo tropical	Bmh-T	<800	>24,0	4.000 – 8.000	2
Bosque pluvial tropical	Bp-T	<800	>24,0	>8.000	3

Nota: Estratificación de tipos de bosque según su caracterización geográfica, por: (IDEAM, 2011)

Tabla 2. Ecuaciones alométricas empleadas para la estimación de la biomasa aérea		
Ecuación	Ecuación alométrica	R²
1	$BA = \exp[4,039 - 1,991 \cdot \ln(D) + 1,236 \cdot (\ln(D))^2 - 0,126 \cdot (\ln(D))^3 + 1,283 \cdot \ln(\rho)]$	0,954
2	$BA = \exp[2,828 - 1,596 \cdot \ln(D) + 1,236 \cdot (\ln(D))^2 - 0,126 \cdot (\ln(D))^3 + 0,441 \cdot \ln(\rho)]$	
3	$BA = \exp[1,595 - 1,224 \cdot \ln(D) + 1,236 \cdot (\ln(D))^2 - 0,126 \cdot (\ln(D))^3 + 0,691 \cdot \ln(\rho)]$	
4	$BA = \exp[2,421 - 1,415 \cdot \ln(D) + 1,236 \cdot (\ln(D))^2 - 0,126 \cdot (\ln(D))^3 + 1,067 \cdot \ln(\rho)]$	
5	$BA = \exp[2,225 - 1,552 \cdot \ln(D) + 1,236 \cdot (\ln(D))^2 - 0,126 \cdot (\ln(D))^3 - 0,237 \cdot \ln(\rho)]$	
6	$BA = \exp[3,441 - 1,809 \cdot \ln(D) + 1,236 \cdot (\ln(D))^2 - 0,126 \cdot (\ln(D))^3 + 1,743 \cdot \ln(\rho)]$	

Nota: Ecuaciones alométricas que dependen de la estratificación, por: (IDEAM, 2011).

Donde D= Diámetro (cm) y ρ = densidad de la madera (g/cm³)

Teniendo en cuenta las características: altitud, temperatura y precipitación de la zona de estudio, se sigue la ecuación correspondiente en la tabla 1, una vez se tiene clara la ecuación a implementar, se procede a buscar la fórmula en la tabla 2 y se remplazan los valores de diámetro y densidad de la madera para obtener la biomasa aérea de las especies arbóreas.

Para determinar la biomasa aérea de las palmas que se encontraron en la zona de estudio, se implementó la siguiente ecuación: $BA = 0,632 + 1,296 * \ln(L)$.

Donde L hace referencia a la longitud del estipe de la planta en centímetros. Las palmas que se tienen en cuenta para el desarrollo de este cálculo son cuyo DAP cumpla con el mínimo de 10 cm (IDEAM, 2011).

2.1.2.2. Estimación indirecta del contenido de carbono en la biomasa aérea

Una vez se obtiene el dato de biomasa aérea el cual está expresado en kilogramos por zona de estudio, se debe presentar el dato en toneladas por hectárea. Para ello, se empleó la siguiente ecuación: $BA(t/Ha) = BA(kg/par) * (1 ton/1000kg) * FC$.

Dónde, BA es la biomasa aérea (Ton/Ha) y FC es el factor de conversión según la dimensión de la parcela (adimensional), en este caso: 14,4927536 (IDEAM, 2011).

Finalmente, se asume que el contenido de carbono en la biomasa es el 50% (Brown, 1997), así que se utilizó el factor de 0,5 para transformar la biomasa en carbono.

2.1.2.3. Tasa de crecimiento anual

La tasa de crecimiento anual se determinó mediante el incremento medio anual de las especies arbóreas existentes en el arbolado urbano, para ello fue necesario calcular el volumen con la fórmula (Quiceno & Álvarez, 2016):

$$Volumen = \frac{1}{4} \pi * DAP * Altura\ de\ fustes * Altura\ total$$

Seguido de esto, se procedió a revisar en bases de datos espaciales, los registros de los árboles del separador, con el fin de estimar su año de plantación (anexo D). Para realizar la gráfica de crecimiento de la masa forestal o la epidometría de la zona de estudio, se utilizó la tasa de incremento medio anual (IMA), cuya fórmula es (UNAL, 2009):

$$IMA = \frac{\text{Volumen (periodo 2)} - \text{Volumen (periodo 1)}}{\text{Tiempo transcurrido}}$$

2.2. FASE II: Estimación de las emisiones de dióxido de carbono

La estimación de las emisiones de CO₂ se realizó por medio del modelo internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) el cual es un sistema operativo que permite realizar la modelación de emisiones de vehículos motorizados en países de vías de desarrollo (ISSRC, 2008).

Para realizar la correcta estimación, se obtuvo inicialmente datos ambientales como altura sobre el nivel del mar, temperatura y humedad relativa puesto que son factores climáticos que inciden en la prevalencia de los gases contaminantes en la atmósfera.

Seguido de esto, se realizó el aforo vehicular por medio de recursos digitales y visuales, en el cual se caracterizaron los tres horarios de mayor flujo vehicular (hora pico) establecidos en el Plan de Acción de Villavicencio – 2016, para obtener el límite máximo de motocicletas que pueden transitar por la ruta estudiada.

Partiendo de este máximo de motocicletas, se tomaron las velocidades y tiempos de recorrido para una sección del grupo y se relacionaron estos datos en el software de modelación, con el fin de obtener información para una sola motocicleta, generar índices de emisión y poder evaluar la totalidad de la afluencia registrada.

2.2.1. Características de la ruta

El proceso de estimación inició con los muestreos en campo que caracterizaron la ruta por la que se evaluó la afluencia de motocicletas; para ello se tomaron coordenadas con GPS en diferentes puntos de la ruta, con el objetivo de trazarla y se realizó la descripción de la ruta mediante los elementos que existen en el campo como semáforos (que indican paradas), la distancia recorrida (230 metros) y las dinámicas de flujo vehicular.

Para complementar la caracterización de la ruta y obtener los datos requeridos por el modelo IVE (ISSRC, 2008), se construyeron bases de datos en campo que describen: características del vehículo (encuesta y observación – Anexo G), duración del trayecto (es el promedio del tiempo que toma cada motocicleta en atravesar la ruta – Anexo G), número de motocicletas en diferentes horarios (aforo vehicular – figuras 5, 6 y 7), velocidad promedio (se obtuvo partiendo de la duración del trayecto realizada por cada motocicleta y la distancia recorrida – Anexo G) y la cantidad de arranques que realizaron los vehículos (esto se estimó por la cantidad de semáforos que se encontraron dentro de la ruta – figura 10).

El aforo de las motocicletas se realizó durante 10 días consecutivos, los cuales mostraron mayor tránsito en el horario de la tarde con 1.584 motocicletas. Debido a que se debía tipificar las motocicletas (referencia, cilindraje y composición de dispositivos como catalizador y carburador), se procedió a establecer un tamaño de muestra que permitiera obtener una muestra significativa de la población que cumpliera con las características de la investigación y de esta manera reducir costos y tiempo en el desarrollo del proyecto.

De esta manera se procedió a calcular el tamaño de la muestra para una población finita, con el objetivo de determinar la cantidad de motos que necesitaban ser encuestadas y monitoreadas para la información requerida por el software. Las fórmulas, parámetros y procedimientos para el cálculo de la muestra se encuentran en el anexo F.

2.2.2. Distribución y creación de la flota

Una vez obtenidos los datos en campo, se procedió a ingresar los datos en el software, para ello se definió la tecnología de la motocicleta (dato requerido por el modelo), esto se logró teniendo en cuenta las características tipológicas y tecnológicas presentes en el manual del usuario IVE y la clasificación de la motocicleta (tabla 3).

Tabla 3. Características tipológicas y tecnológicas					
Tipo de combustible	Tamaño motor	Clasificación	Tipo de motor	Dispositivo	Regulador emisiones
Pt (gasolina)	SmlEng (se refiere a motocicletas o vehículos de 3 ruedas)	Lt (liviano)	2 Cyc (2 tiempos)	Carb (carburador)	Catalyst (tiene catalizador)
		Md (liviano)			
		Hv (pesado)	4 Cyc (4 tiempos)	Fi (sin carburador)	None (no tiene catalizador)

Nota: Características vehiculares requeridas para insertar los datos en el modelo internacional de emisiones vehiculares IVE, por: (ISSRC, 2008)

2.2.3. Patrones de conducción

Las emisiones de los vehículos muestran ciertas variaciones bajo determinadas condiciones de conducción (ISSRC, 2008), es por esto que se determinó la potencia específica vehicular (VSP) que describe la relación entre la potencia del motor y el cilindraje total de la moto; y el estrés del motor que hace referencia a el comportamiento bajo el que se somete el motor según las características de conducción. Ambos parámetros se obtuvieron con base en las características del vehículo y los trazos de velocidad.

Las características del vehículo y los trazos de velocidad fueron datos que se tomaron en campo; el primero de ellos se realizó mediante una encuesta previa a la toma del segundo dato, en la cual se preguntó al conductor por el cilindraje, referencia de la motocicleta, el uso de carburador, el uso de catalizador, tipo de combustible y tipo de motor (2 tiempos o 4 tiempos).

Seguido de esto, y con la ayuda de un velocímetro, se registró el perfil de velocidad desde un momento inicial (al inicio de la ruta) hasta un momento final (final de la ruta), ambos puntos de partida se encontraron regulados por semáforos.

2.2.4. Inserción de datos de localidad

El sistema operativo IVE requiere para su funcionamiento, características locales como el comportamiento de conducción (descritas en el manual), variables ambientales (humedad promedio, temperatura media y altura sobre el nivel del mar), características del combustible (para obtener este dato se realizó la revisión de fuentes bibliográficas como “Calidad de los Combustibles en Colombia” (Arango, 2009) y se consultó la normatividad que rige para los compuestos con los que se fabrican los combustibles en Colombia – Decreto 1073 de 2015).

2.2.5. Factores de emisión

Los factores de emisión se obtuvieron con el desarrollo de los archivos flota (tipología y tecnología de las motocicletas) y localidad (características de la ruta de estudio) requeridas por el software, para efectos del presente trabajo de investigación, se realizaron diversos factores de emisión agrupados por tipologías de las motocicletas registradas en el aforo vehicular.

Seguido de esto se remplazó el factor de emisión en la siguiente ecuación con el fin de obtener la cantidad diaria de emisión de dióxido de carbono

$$Emi_k = \sum_j^n N_j * M_j * FE_{jk}$$

Donde: Emi_k es la cantidad total diaria de emisión de CO₂; N_j es el número de vehículos de la categoría; M_j es la actividad vehicular diaria expresada como la cantidad de kilómetros recorridos y FE_{jk} es el factor de emisión asociado a la categoría vehicular (Londoño, Correa, & Palacio, 2011).

Luego de concluir el dato de emisiones diarias, se estableció la relación entre la cantidad de emisión al año con la unidad de motocicleta, presentando el dato unitario de emisión por motocicleta.

2.3 FASE III: Análisis de la relación entre la cantidad de emisiones por parte de la afluencia vehicular de dióxido de carbono y la proporción almacenada por los árboles del separador vial

Para determinar la relación existente entre el factor de emisiones generadas por la afluencia vehicular de la zona de estudio y los árboles del separador vial, se planteó un modelo de compensación el cual fue proyectado para los próximos 10 años, donde se propone un crecimiento uniforme de la cantidad de motocicletas que fluyen por el sector, con el fin de estimar cuál sería la cantidad de emisiones generadas para el periodo proyectado y se determinó el porcentaje faltante para alcanzar un punto equilibrado de la compensación.

Este modelo fue desarrollado partiendo de la población del año en estudio (451.212 habitantes), posteriormente se utilizaron tasas de crecimiento poblacional (0,0239 - (Findeter, 2016)) y de motocicletas (0,1 - (Findeter, 2016)) para estimar la cantidad de vehículos que existirían por persona durante el periodo de proyección.

En la modelación de datos en el software IVE, se obtuvo el dato promedio de emisión por motocicleta y con base en la proyección anual de la cantidad de motocicletas, se estimó el total de emisiones por parte de la afluencia vehicular.

La proyección del almacenamiento de carbono, se basa en el crecimiento anual del diámetro del tronco de los árboles, este dato se obtiene de revisión bibliográfica (UNAL, 2009) (Pineda, Valdez, & Pérez, 2016) y se proyecta durante los 10 años del modelo de compensación.

Se resalta que el valor de carbono almacenado es presentado en toneladas de dióxido de carbono equivalente, lo que representa la cantidad de contaminante que se fija en el arbolado, es decir, la proporción que se deja de emitir a la atmósfera.

Este resultado se logra multiplicando el valor obtenido de carbono almacenado en la tabla 8 por el factor que resulta de la división entre el peso atómico de una molécula de CO₂ y el peso específico del carbono, es decir: $44/12 = 3,66$ (IDEAM, 2011).

Seguido de esto, se halló la diferencia entre las emisiones anuales y el carbono almacenado (el cual se proyectó basándose en las tasas de crecimiento de las especies existentes en el separador vial) para determinar el porcentaje que hace falta por fijar en el arbolado urbano del sector.

Con el fin de corroborar la compensación individual de un árbol respecto de las emisiones de una motocicleta, se dividió el total de emisiones entre las motocicletas evaluadas en la muestra de población finita y, de la misma manera, se halló la cantidad total de carbono que puede ser almacenada por un solo individuo del arbolado.

Luego de obtener los datos individuales de emisiones atmosféricas por motocicleta y fijación de carbono por árbol, se procedió a realizar la proyección de las emisiones y fijaciones en un modelo que permitiera evidenciar la evaluación de la compensación, hasta que los individuos de *Brownea ariza* (Palo de cruz) alcanzaran una etapa adulta y pudieran ser sumados al potencial de almacenamiento.

3. Resultados y análisis de resultados

FASE I: Estimación del contenido de biomasa y carbono almacenados

La caracterización dasométrica del arbolado urbano del separador vial frente al estadio Macal se presenta en la tabla 4, esta se obtuvo de trabajo en campo y de revisión bibliográfica.

Tabla 4. Características dasométricas del arbolado					
Número	N° Referencia	Especie	Diámetro a la altura del pecho (cm)	Altura total (m)	Densidad de especie (g/cm³)
1	C5 – 22301	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	4,1380	1,962	0,54
2	C5 - 22302	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	7,3211	5,967	0,45
3	C5 – 22303	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	3,5014	2,801	No registra
4	C5 – 0090	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	12,7324	2,809	No aplica
5	C5 – 22304	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	4,1380	1,591	No registra
6	C5 – 0092	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	37,5605	8,382	0,45
7	C5 – 22305	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	64,6168	16,245	0,45
8	C5 – 22306	Trompillo (<i>Guarea trichilioides</i>)	28,6478	12,146	0,56

Tabla 4. Continuación

Número	N° Referencia	Especie	Diámetro a la altura del pecho (cm)	Altura total (m)	Densidad de especie (g/cm ³)
9	C5 – 0094	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	15,2788	4,961	No aplica
10	C5 – 22307	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	50,2928	18,189	0,45
11	C5 – 0095	Casco de vaca (<i>Bauhinia purpúrea</i>)	37,5605	6,769	0,65
12	C5 – 0096	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	10,1859	2,682	No aplica
13	C5 – 0097	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	3,5014	1,471	No registra
14	C5 – 22309	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	19,7352	7,047	0,45
15	C5 – 22310	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	5,4113	2,177	No registra
16	C5 – 00101	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	17,3478	4,143	No aplica
17	C5 – 22311	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	38,6746	15,163	0,45
18	C5 – 0103	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	14,0056	3,292	No aplica
19	C5 – 22312	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	5,8887	1,922	No registra

Tabla 4. Continuación					
Número	N° Referencia	Especie	Diámetro a la altura del pecho (cm)	Altura total (m)	Densidad de especie (g/cm³)
20	C5 – 0105	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	18,4619	4,518	No aplica
21	C5 – 0106	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	15,2788	5,083	No aplica
22	C5 – 0107	Trompillo (<i>Guarea trichilioides</i>)	34,3774	11,024	0,56
23	C5 – 0108	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	14,0056	3,545	No aplica
24	C5 – 22313	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	27,3746	10,162	0,54
25	C5 – 22314	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	14,0056	3,794	No aplica
26	C5 – 22315	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	43,2900	12,795	0,54
27	C5 – 22316	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	2,5465	2,365	0,54

Nota: Características dasométricas del arbolado urbano, por: (Navarro, 2019)

Se puede observar la predominancia de la Palma de manila (9), seguido de la Acacia forrajera (6), Palo de Cruz (5), Apamate (4), Trompillo (2) y finalmente Casco de Vaca (1). De la misma manera, se aprecia que las palmas fueron sembradas en una misma temporada, dado que sus características dasométricas no tienen mayor variación; caso similar sucede con cuatro de las acacias caracterizadas pues los datos de altura y DAP demuestran edades similares entre ellas.

Se resalta que las 8 especies de Palo de Cruz que no cumplen con los requisitos para ser consideradas en el almacenamiento de carbono (puesto que el diámetro del tronco no supera los 10 cm, lo que se

refiere a un árbol que tiene poco tiempo de ser sembrado), no cuentan con información de densidad, puesto que no han sido estudiadas en otras referencias bibliográficas, esto representaría que en un futuro, cuando se quiera evaluar el almacenamiento de carbono, se tendría que realizar un estudio donde se corten las partes del árbol y se analice su densidad en laboratorio o, en su defecto, asumir la densidad de la madera, según la familia procedente de la especie (IDEAM, 2011).

Según los datos obtenidos, se puede determinar, como un resultado preliminar, que las especies con mayor tiempo de siembra son: C5 – 22305 (*Leucaena leucocephala*), C5 – 22307 (*Leucaena leucocephala*) y C5 – 22315 (*Tabebuia rosea*), puesto que el diámetro a la altura del pecho (DAP) que estos tienen son los mayores de todo el separador vial. Basándose en las mediciones de esta característica dasométrica, también se evidencia que las especies de Palo de Cruz (*Brownea ariza*) tienen edades similares puesto que fueron sembradas en la misma temporada. Con el fin de ilustrar las especies mencionadas anteriormente, el anexo C contiene imágenes de algunos de los individuos que existen en el separador vial.

Como se puede observar, las especies del separador vial tienen rasgos morfológicos muy distintos una de las otras, lo que facilitó su identificación. Adicionalmente a la caracterización dasométrica, en la tabla 5, se presentan las características generales del arbolado como: estado, tipo de copa, hojas y altura de fustes.

Tabla 5. Identificación de especies y características dasométricas de los árboles que permiten determinar su morfología		
Identificación de especies		
		
Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)

Identificación de especies



Palma de manila (*Veitchia merrillii*)



Trompillo (*Guarea trichilioides*)



Casco de vaca (*Bauhinia purpúrea*)

Características dasométricas de los árboles que permiten determinar su morfología

No.	Especie	Tipo de copa	Hojas	Altura de fustes (m)
1	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	Aparasolada	Ovada	1,01
2	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Extendida	Lanceolada	0,502
3	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	Pendular	Lanceolada	0,20
4	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,514
5	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	Pendular	Lanceolada	0,30
6	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Extendida	Lanceolada	4,62
7	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Extendida	Lanceolada	2,98

Tabla 5. Continuación

Características dasométricas de los árboles que permiten determinar su morfología				
No.	Especie	Tipo de copa	Hojas	Altura de fustes (m)
8	Trompillo (<i>Guarea trichilioides</i>)	Irregular - columnar	Elíptica	0,60
9	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,923
10	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Extendida	Lanceolada	2,796
11	Casco de vaca (<i>Bauhinia purpúrea</i>)	Semi globosa	Bipartida	1,347
12	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,305
13	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	Pendular	Lanceolada	0,10
14	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Extendida	Lanceolada	4,728
15	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	Pendular	Lanceolada	0,10
16	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,716
17	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Extendida	Lanceolada	4,488
18	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,667
19	Palo de cruz (<i>Brownea ariza</i>)	Pendular	Lanceolada	0,20
20	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,692
21	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,675
22	Trompillo (<i>Guarea trichilioides</i>)	Irregular - columnar	Elíptica	1,745
23	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,703

Tabla 5. Continuación

Características dasométricas de los árboles que permiten determinar su morfología				
No.	Especie	Tipo de copa	Hojas	Altura de fustes (m)
24	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	Aparasolada	Ovada	5,239
25	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	Palmiforme	Subulada	1,564
26	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	Aparasolada	Ovada	1,585
27	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	Aparasolada	Ovada	1,654

Nota: Identificación y caracterización del arbolado urbano, por: (Navarro, 2019)

Este tipo de descripción complementaria a la estimación de biomasa aérea, permite evidenciar el patrón de crecimiento de los individuos que se desarrollan en el separador, por ejemplo, la mayoría de los representantes de la especie *Leucaena leucocephala* (Acacia forrajera) tienden a presentar un hábito de crecimiento extendido, razón por la cual deben tener constante monitoreo para evitar que sus ramas interfieran con el cableado eléctrico o con las rutas vehiculares.

De esta manera, la caracterización y descripción general de los árboles permite prevenir inconvenientes, establecer que individuos requieren de mayor cuidado y especial atención; seguido de esto, se procedió a calcular la biomasa aérea contenida en el arbolado urbano del separador vial.

A continuación, en la tabla 6, se muestran los datos necesarios para estimar la biomasa aérea en los árboles, la ecuación implementada fue la No. 2 de la tabla 2, ya que los datos de Villavicencio (altitud: 467, temperatura media 26 °C y precipitación: 3.856 mm al año (Findeter, 2016)) se ajustan a esta ecuación.

Tabla 6. Cálculo de biomasa aérea de las especies que tienen un DAP mayor a 10 cm				
Código	Especie	Diámetro (DAP) en (cm)	Densidad de especie (g/cm³)	Biomasa aérea en (kg/par)
C5 – 0092	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	37,5605	0,45	1025,03
C5 - 22305	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	64,6168	0,45	3554,66
C5 – 22306	Trompillo (<i>Guarea trichilioides</i>)	28,6478	0,56	585,28
C5 – 22307	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	50,2928	0,45	2033,98
C5 – 0095	Casco de vaca (<i>Bauhinia purpúrea</i>)	37,56058	0,65	1205,50
C5 – 22309	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	19,7352	0,45	214,29
C5 – 22311	Acacia forrajera (<i>Leucaena leucocephala</i>)	38,6746	0,45	1099,31
C5 – 0107	Trompillo (<i>Guarea trichilioides</i>)	34,3774	0,56	911,99
C5 – 22313	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	27,3746	0,54	515,40
C5 – 22315	Apamate (<i>Tabebuia rosea</i>)	43,29	0,54	1556,49

Nota: Árbol para el cálculo de almacenamiento de carbono, por: (Navarro, 2019)

En la zona de estudio se observa una predominancia de especies nativas, sin embargo, también se cuentan con especies introducidas como: Casco de Vaca (*Bauhinia purpúrea*) y Palma de Manila (*Veitchia merrillii*) (Prieto & Garzón, 2007). Con respecto a la primera especie mencionada se aprecia una mayor proporción de carbono almacenado en comparación con las demás especies, como se observa en la tabla 6, no obstante, a pesar de su contribución a la calidad del aire, no representa beneficios para la estructura ecológica de la ciudad, puesto que no genera oferta alimenticia llamativa para la fauna nativa (Molina & Vargas, 2007).

Además de que las especies introducidas no representan una fuente de alimento esencial para la fauna silvestre, se puede presentar competencia por nutrientes, la cual sucede en las raíces de cada árbol, reduciendo la disponibilidad de los mismos para las especies nativas y afectando su crecimiento y desarrollo (Molina & Vargas, 2007). Es por esto que los proyectos de restauración ecológica deben articularse con la academia para determinar las especies que tienen un gran potencial de fijación de carbono, y a su vez una función ecológica estratégica en el ecosistema local, sin que represente afectaciones a las instalaciones de obra civil (cableado, tubería, infraestructura, calles, andenes, etc).

En relación a la segunda especie introducida que se mencionó, se encontraron nueve palmas en el sector las cuales cumplen con el diámetro mínimo para estimar el almacenamiento de carbono; en la tabla 7 se presentan los datos requeridos para el cálculo de la biomasa aérea de las palmas, la ecuación para el cálculo de este dato se encuentra en la sección 2.1.2.1 del presente trabajo de investigación.

Tabla 7. Cálculo de biomasa aérea para las palmas				
N° de referencia	Especie	Diámetro a la altura del pecho (DAP) en (cm)	Longitud del estipe en (cm)	Biomasa aérea (kg/par)
C5 - 0090	Palma de manila (<i>Veitchia merrillii</i>)	12,7324	151,4	7,14

Tabla 7. Continuación

N° de referencia	Especie	Diámetro a la altura del pecho (DAP) en (cm)	Longitud del estipe en (cm)	Biomasa aérea (kg/par)
C5 - 0094		15,2788	192,3	7,45
C5 - 0096		10,1859	130,5	6,95
C5 - 00101		17,3478	171,6	7,30
C5 - 0103		14,0056	166,7	7,26
C5 - 0105		18,4619	169,2	7,28
C5 - 0106		15,2788	167,5	7,27
C5 - 0108		14,0056	170,3	7,29
C5 - 22314		14,0056	156,4	7,18

Nota: Cálculo de biomasa para palmas, por: (Navarro, 2019)

Esta especie introducida no solo tiene baja interacción con la fauna nativa (Molina & Vargas, 2007), sino que también representa bajos niveles de fijación de carbono en comparación con las especies arbóreas, pues como se observa en los datos anteriormente expuestos, el almacenamiento de carbono es inferior a las especies arbóreas.

De hecho, aunque se sumara la biomasa aérea de todas las palmas del separador, esta cantidad no alcanzaría a la biomasa aérea de la especie arbórea más pequeña del área de estudio.

Finalmente, para obtener un dato consolidado de biomasa aérea en la tabla 8 se suman los dos resultados de biomasa, se expresan en toneladas/hectárea y se estima el contenido de carbono almacenado.

Tabla 8. Biomasa aérea total y estimación de carbono almacenado				
Biomasa árboles (kg/par)	Biomasa palmas (kg/par)	Biomasa aérea total (biomasa árboles + biomasa palmas) en (kg/par)	Biomasa aérea total (biomasa árboles + biomasa palmas) en (ton/Ha)	Carbono almacenado en (ton/Ha)
12.682,93	65,11	12.758,04	184,90	92,45

Nota: Cálculo general del contenido de carbono, por: (Navarro, 2019)

Como se puede apreciar, la biomasa aérea total de los árboles es superior al de las palmas; es por esto que las ecuaciones alométricas para estimar la cantidad de biomasa aérea en las palmas es diferente de los árboles (como se indica en la sección 2.1.2.1 del trabajo), dando como resultado un valor hasta 95% menor al de los árboles.

El porcentaje correspondiente al almacenamiento de carbono de las diferentes especies que se encuentran en el separador vial se presenta en la figura 3.

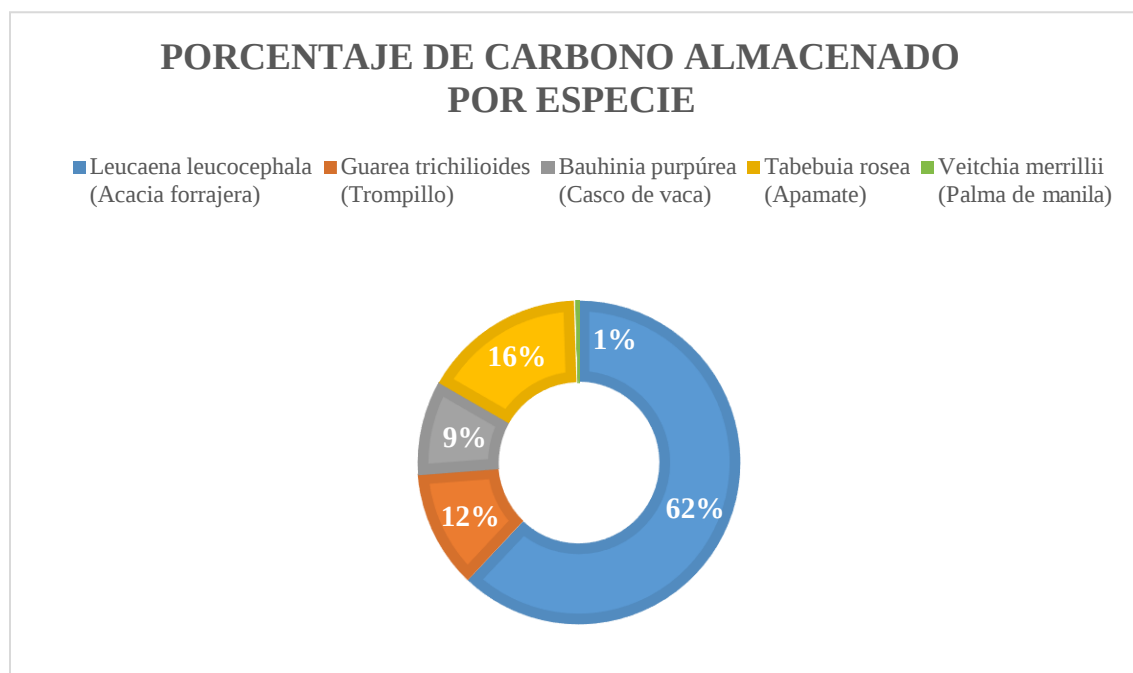


Figura 3. Porcentaje de carbono almacenado por especie (Navarro, 2019)

Leucaena leucocephala (Acacia Forrajera) es la especie que más contribuye en la totalidad de la fijación, sin embargo, esto se debe a que esta especie representa el 50% de los individuos arbóreos, ya que, si en teoría todas las especies tuvieran el mismo diámetro de tronco (es decir que tuvieran las mismas dimensiones), el orden de mayor a menor contribución sería: *Bauhinia purpúrea* (Casco de Vaca), *Guarea trichilioides* (Trompillo), *Tabebuia rosea* (Apamate), *Leucaena leucocephala* (Acacia Forrajera) y por último *Veitchia merrillii* (Palma de Manila).

El separador vial presenta en total 27 individuos de árboles, entre ellos, 18 son especies arbóreas (de las cuales solo 10 cumplen con las características para representar un almacenamiento considerable de carbono) y las 9 especies restantes son palmas, esto conlleva a que el total de carbono almacenado se represente en las 10 especies arbóreas que se tienen en el separador, puesto que las palmas, como se ha mencionado anteriormente, no pueden fijar la misma cantidad que los árboles (IDEAM, 2011).

La tasa de crecimiento de los árboles encontrados en el separador vial fue estimada por el volumen calculado para cada especie y el análisis multitemporal del tiempo transcurrido entre los periodos presentados en el anexo D, donde se evidencia la aparición de cada individuo del separador vial; para determinar la tasa de crecimiento, se calculó el incremento periódico anual (IMA) cuya respectiva ecuación se encuentra en el apartado 2.1.2.3 y los resultados se muestran en la siguiente gráfica:

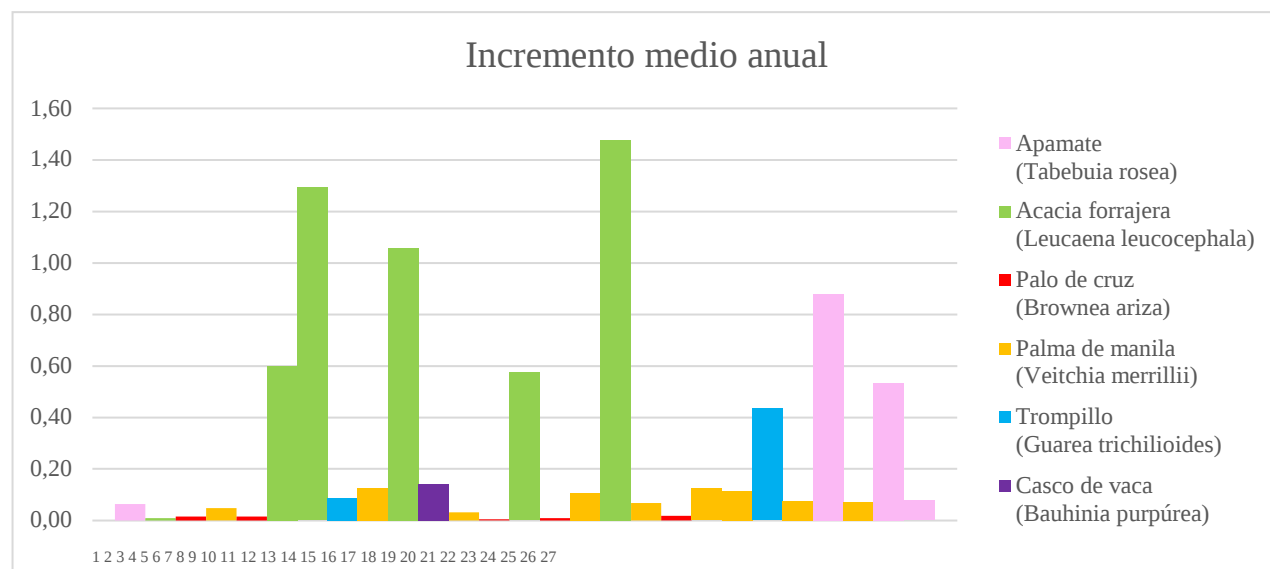


Figura 4. Incremento medio anual desde los primeros registros multitemporales de los árboles en la zona de estudio (Navarro, 2019)

Los datos registrados anteriormente, permiten diferenciar los árboles de mayor edad o que tienen más tiempo de plantación (acacias) de los que no (palo de cruz), de esta manera se puede esperar que estas especies de mayor edad, sean de las que más contribuyen a la compensación que realiza el separador vial.

Los registros encontrados revelan que *Leucaena leucocephala* (Acacia Forrajera) y *Bauhinia purpurea* (Casco de Vaca) son las especies más adultas del separador pues para el año 2005 ya contaban con un área basal considerable para un árbol de más de 4 años de edad, siguen las especies de Apamate con aproximadamente 13 años de registro, trompillo con aproximadamente 12, palmas con aproximadamente 9 y finalmente las recientes plantaciones de Palo de Cruz y un individuo de Apamate con aproximadamente 1 año de registro.

Las últimas dos especies mencionadas son aquellas que en la figura 4, no presentan mayores valores, puesto que, al tener poca edad, no han crecido lo suficiente para alcanzar altos valores en el incremento medio anual a diferencia de la Acacia Forrajera, que es la de mayor incremento y a su vez, la que representa mayor contribución a la fijación total del arbolado del separador vial, como se observa en la figura 3.

FASE II: Estimación de las emisiones de dióxido de carbono

Para caracterizar la ruta del flujo vehicular se tomaron coordenadas que describen ambos sentidos de la vía, para efectos de una mejor percepción de la georreferenciación, el mapa de las coordenadas se muestra en el anexo E.

El aforo vehicular de las motocicletas se realizó basándose en el análisis previo al desarrollo del proyecto de investigación, pues se evidenció que, en los horarios de salida de los colegios, cambio de turnos o descanso de trabajo, se genera el embotellamiento de la vía y, por ende, se concentran las fuentes móviles de emisión.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

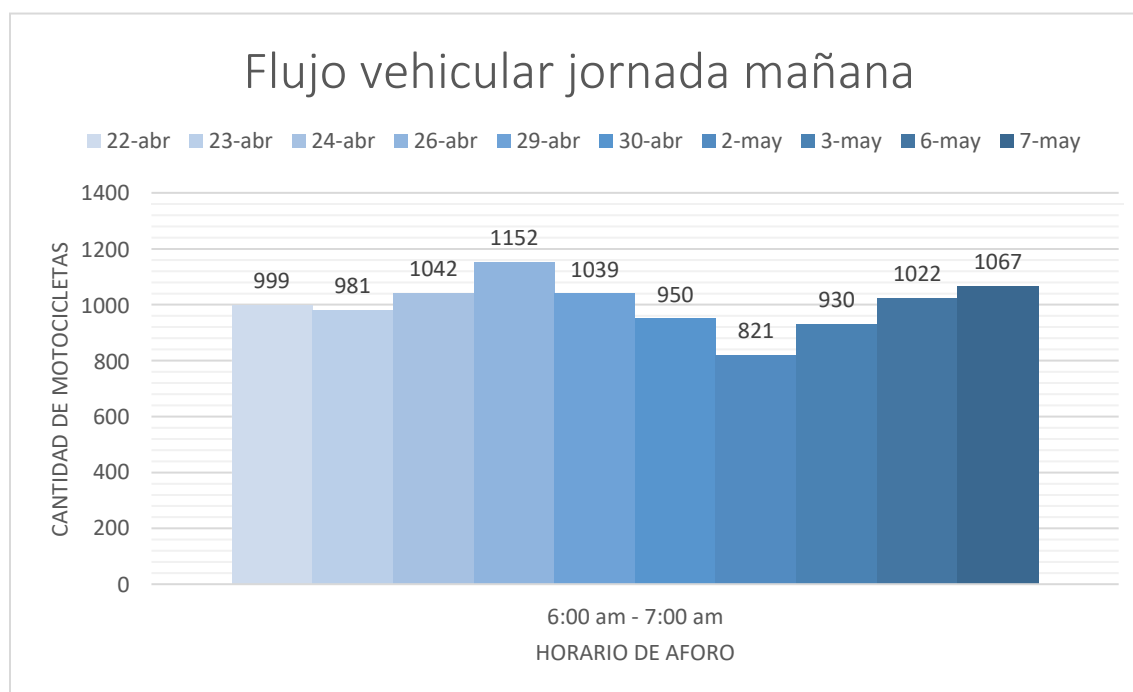


Figura 5. Flujo vehicular de motocicletas en el horario 6:00 a.m. – 7:00 a.m. (Navarro, 2019)

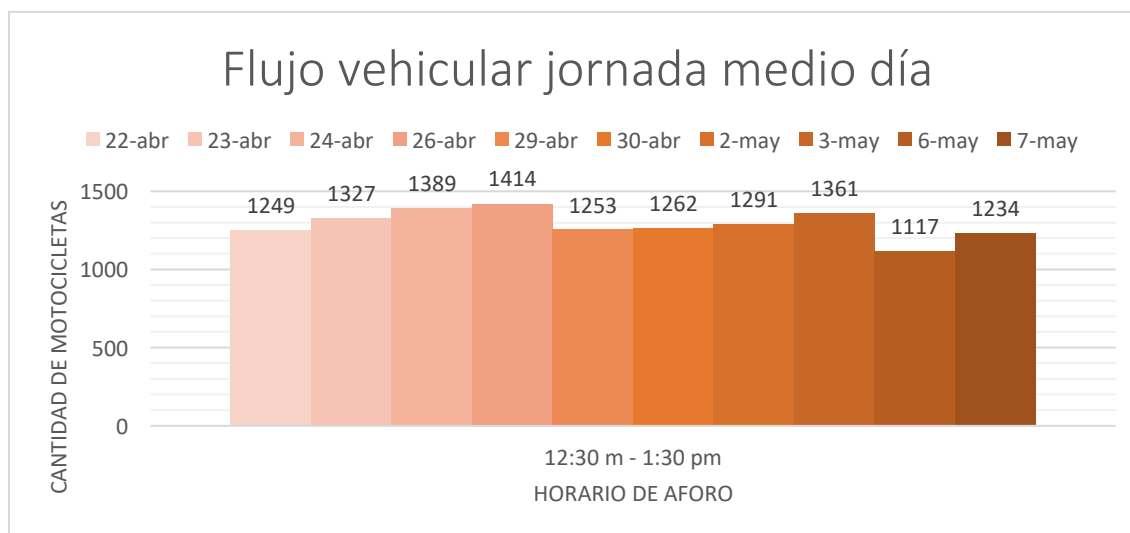


Figura 6. Flujo vehicular de motocicletas en el horario 12:30 m – 1:30 p.m. (Navarro, 2019)

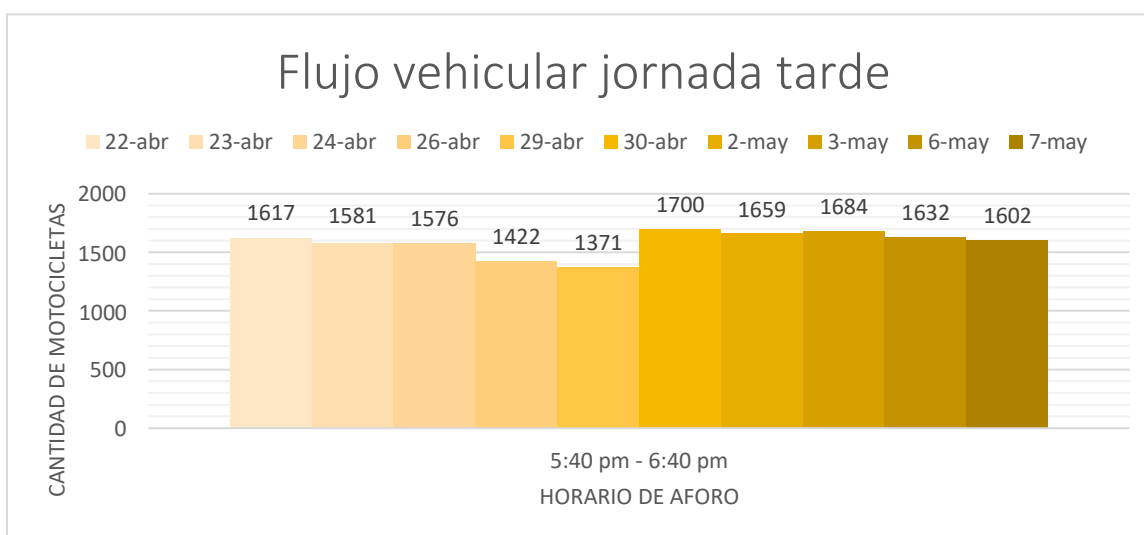


Figura 7. Flujo vehicular de motocicletas en el horario 5:40 p.m. – 6:40 p.m. (Navarro, 2019)

La caracterización de las motocicletas se realizó en el horario de mayor congestión (figura 7), este aumento en el flujo se vincula a que es el horario de salida de oficinas y colegios, es el lapso que se tiene para el cambio de turno de las personas que trabajan en seguridad, son horarios donde se inicia el reparto de los domicilios de comidas rápidas (durante el aforo se observaron diferentes tipos de estas motocicletas), entre otras situaciones que contribuyen al aumento del tráfico (Rodríguez & Cano, 2018).

El seguimiento de la movilidad en la zona de estudio se realizó durante 10 días entre semana (es decir de lunes a viernes), puesto que los fines de semana no presentaban altas movilidades. Para el conteo de ambos sentidos de la vía fue necesario recurrir a recursos audiovisuales suministrados por el conjunto “Portal de Canaima” donde se filmaba una zona de la vía.

Una vez obtenido el dato de mayor flujo, se procedió seleccionar una muestra poblacional para población finita, la cual se presenta en la tabla 9 para realizar la caracterización de los vehículos por medio de encuestas y medios audiovisuales.

Los datos empleados para obtener el tamaño de muestra se presentan en el anexo F.

<i>Tabla 9 Muestra para población finita</i>		
Horario	Flujo vehicular promedio	Tamaño de muestra
6:00 AM – 7:00 AM	1000	278
12:30 M – 1:30 PM	1290	296
5:40 PM – 6:40 PM	1584	309

Nota: Selección del tamaño de muestra para el aforo vehicular, por: (Navarro, 2019)

El tamaño de muestra que se seleccionó fue en el horario de 5:40 pm – 6:40 pm, puesto que este horario fue el que más presentó afluencia vehicular, lo que genera una mayor variación en el tipo de motocicletas que transitan y las dinámicas de conducción que allí suceden.

En este orden de ideas, inicialmente se procedió a muestrear 309 motocicletas, sin embargo, conforme se registraban los datos en la gráfica, se observó un patrón en el comportamiento de las motocicletas categorizadas por los grupos de cilindraje (livianas: de 100 a 125 cc, medianas: 125 a 150 cc y pesadas: mayores a 150 cc) dónde se presentaba un incremento en la velocidad al inicio del recorrido hasta llegar a un punto máximo y luego se presentaba un descenso en la velocidad hasta alcanzar el semáforo y detenerse, este comportamiento se presenta en la siguiente gráfica:

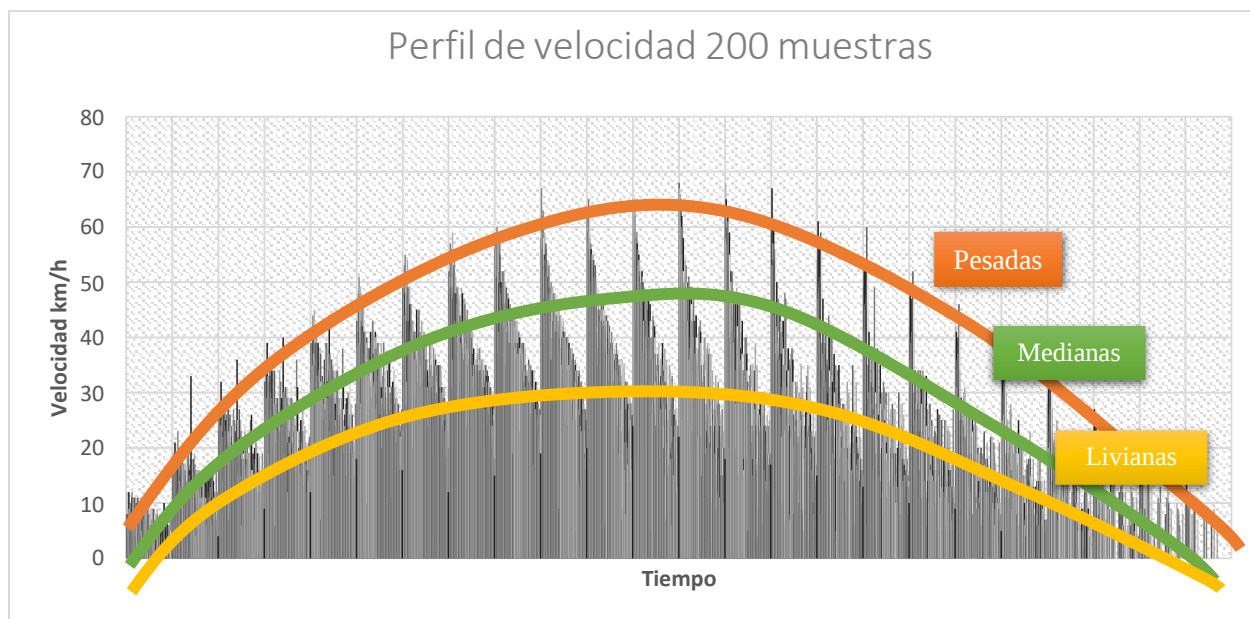


Figura 8. Comportamiento de conducción en categorías liviana, mediana y pesada (Navarro, 2019)

Como se puede observar, la dinámica del flujo en la gráfica, se comporta de manera simétrica, es por esto que, al llegar a las 200 motos registradas, no se demostró mayor variación entre las mediciones de datos, así que se continuó la estimación con la información obtenida en este punto.

El aforo vehicular evidenció predominancia en vehículos con cilindrajes de 100 a 125 cc, esto, según los propietarios, se debe que son motos que rinden en kilometraje con menos combustible, son más económicas para su adquisición y algunos prefieren motos de pequeñas dimensiones para maniobrar en trancones, la distribución de los grupos de motocicletas registradas, categorizadas por cilindraje se muestra en el anexo E.

Dentro de este grupo de motocicletas, hay tres referencias de las que se encontró mayor cantidad circulando: BWS de Yamaha (21), Best de Suzuki (18) y Agility de Auteco (17). Esta preferencia

se relaciona a que son motos livianas, de pequeñas dimensiones, automáticas (semiautomática en el caso de la Best) y son más fáciles de conducir por su sistema de aceleración que aquellas con caja de cambios.

A continuación, la figura 9 presenta las diferentes tipologías de las motocicletas registradas, así como la velocidad promedio empleada para realizar el recorrido.

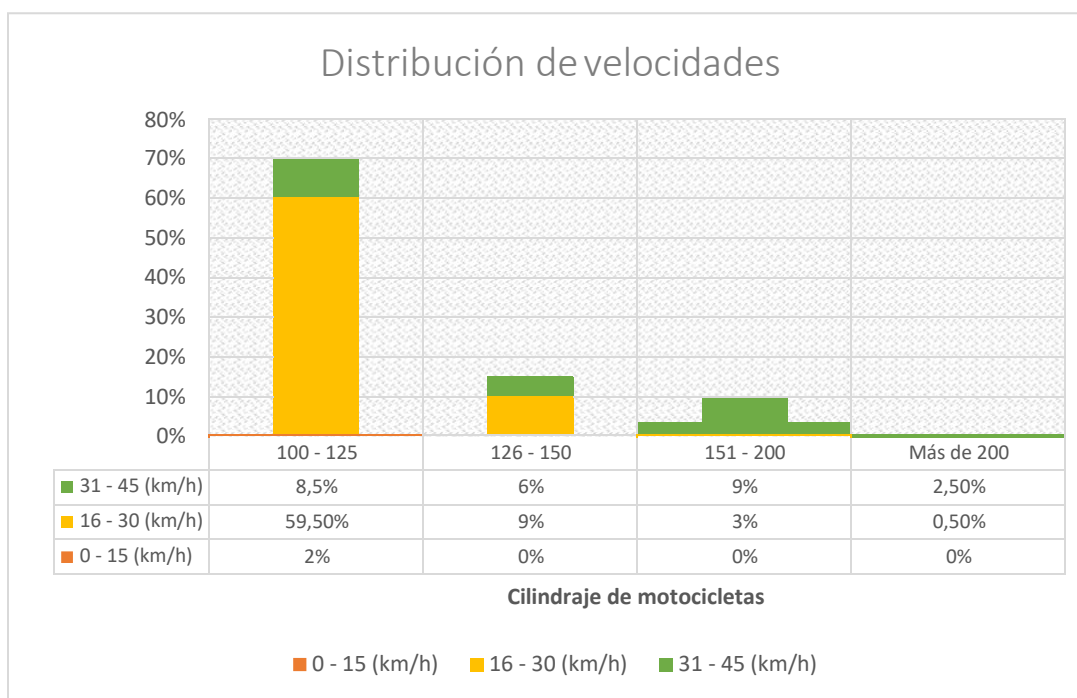


Figura 9. Distribución de velocidades (Navarro, 2019)

Las emisiones atmosféricas se encuentran ligadas a los patrones de conducción y estos, a su vez, están restringidos por los semáforos al final de la ruta, esto genera que, las motocicletas presenten en general un perfil de velocidad en forma de n, donde al inicio del recorrido pueden avanzar de manera constante alcanzando el punto más alto de velocidad y después, reducen la velocidad para detener el vehículo en el semáforo.

Las dinámicas de los flujos en ambos sentidos constan de tres vías que direccionan la afluencia hacia la ruta estudiada, para efectos de representar gráficamente la descripción que se dará a continuación, en la figura 10 se presenta establecen las rutas y puntos mencionados.

La primer dinámica inicia en el punto A₁, dónde la afluencia transita hacia el semáforo A, el cual se encuentra en rojo, el segundo flujo procede del punto A₂ hacia el semáforo que aún se encuentra en rojo, de manera que cuando el punto A₃ inicia su tránsito, el semáforo da luz verde, sin embargo, la ruta se encuentra congestionada y llena de vehículos lo que obstaculiza el paso de las motocicletas hasta el semáforo, ocasionando que cuando estas llegan al semáforo, ya se encuentra en rojo nuevamente. De la misma manera sucede en la segunda dinámica.

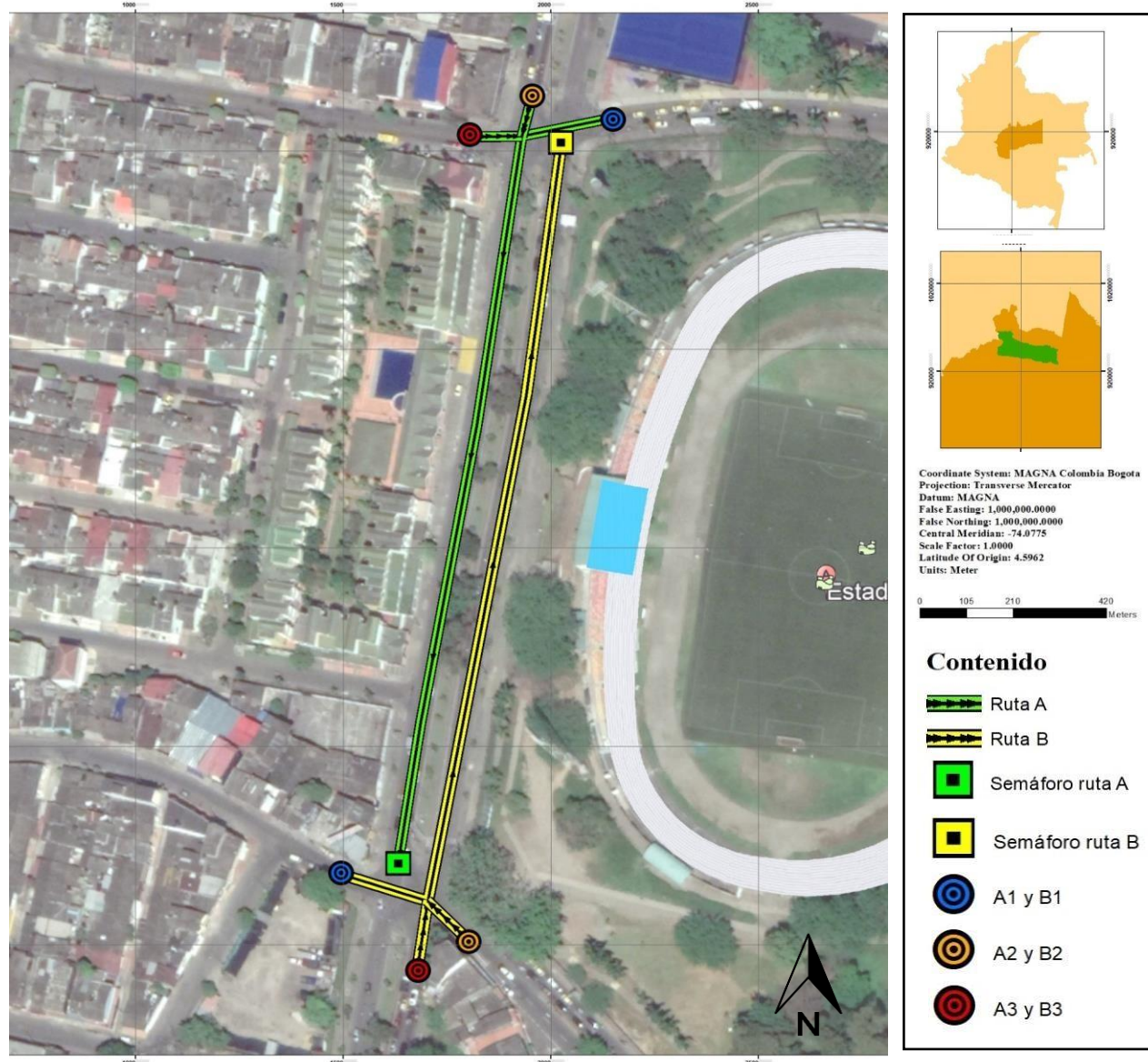


Figura 10. Rutas de flujo en la zona de estudio (Navarro, 2019)

De manera que, estas dinámicas de flujo controlan y regulan las velocidades y desplazamiento de las motocicletas, impidiendo que atraviesen la ruta en un solo arranque (lo cual genera mayores

emisiones atmosféricas), causando el embotellamiento del tráfico en las horas pico y creando una mayor incidencia de las emisiones atmosféricas.

Partiendo de este control en el desplazamiento, se pudieron registrar altas velocidades por parte de las motocicletas que se encontraban esperando el inicio del flujo en el punto A₁ y B₁ puesto que, los vehículos estacionados en este punto tenían la ruta despejada para poder acelerar y lograr altas velocidades; velocidades medias para aquellas en los puntos A₂ y B₂ que ya se encontraban con una obstrucción media para su aceleración y velocidades bajas o constantemente baja para los puntos A₃ y B₃ los cuales debían realizar un tránsito lento.

Teniendo en cuenta que el recorrido tiende a ser uniforme, puesto que existe un semáforo al final del trayecto. En la figura 11 se expresan las velocidades máximas que se registraron en el aforo.

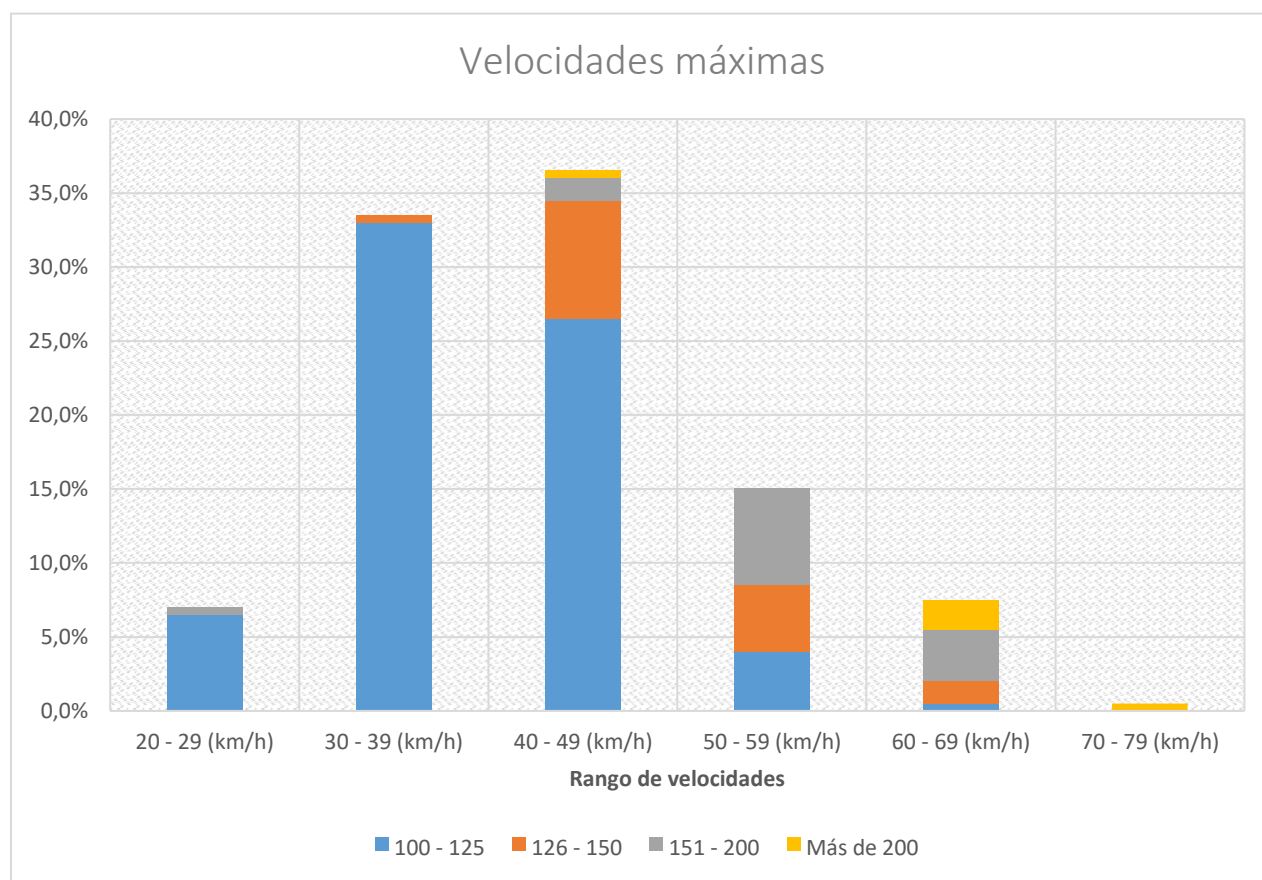


Figura 11. Velocidades máximas de las motocicletas evaluadas (Navarro, 2019)

Se aprecia un patrón de velocidades caracterizado por el cilindraje del vehículo, así pues, motocicletas de bajos cilindrajes tuvieron una velocidad máxima entre 20 y 45 km/h y las motocicletas de altos cilindrajes punto máximos entre 45 y 70 km/h.

Esta marcada diferencia se atribuye a que las motos con cilindraje más alto tienen la facilidad de alcanzar velocidades muy altas en pocos segundos, mientras que las motocicletas con cilindrajes bajos, requieren de mayor tiempo y distancia para alcanzar altas velocidades.

Los perfiles de velocidad, como se observa en la figura 8, corroboran las dinámicas de tránsito que existen en este horario, puesto que el patrón o la dinámica simétrica de la gráfica, significa una disminución de la velocidad como consecuencia del embotellamiento.

Luego de realizar el aforo vehicular y obtener las características de la afluencia de motocicletas, se procedió a ingresar los datos en el software IVE. En la tabla 10 se presentan la información registrada en el modelo.

Las emisiones también dependen de las características tecnológicas de los vehículos como tipo de combustible, clasificación del motor (2 tiempos o 4 tiempos), si tiene o no sistema de mezcla de aire-combustible para el motor (carburador) y si cuenta con sistema de reducción de emisiones (catalizador) (tabla 3).

Esta información fue recolectada mediante encuestas a los conductores que transitaron por la ruta, de manera general, las motocicletas abordadas de 4 tiempos cumplían con los estándares normativos en cuanto a la composición de su sistema para el control de gases, puesto que, de manera contraria, no podrían transitar por la ciudad; sin embargo, se halló una motocicleta de 2 tiempos la cual no reunía los requisitos del control de expulsión de gases, esto se debe a que era un modelo ensamblado hace más de 13 años (Carballos, 2002).

Tabla 10. Información de entrada para el modelo IVE

Características ambientales		
Altitud: 428 m.s.n.m	Humedad relativa: 77%	Temperatura media: 25,5 °C

Tabla 10. Continuación			
Características del combustible			
Gasolina con contenido moderado azufre (300ppm), bajo contenido de benceno (0,50%) y 1% de contenido de compuestos oxigenados			
Patrones de conducción			
Velocidad media: 26,32 km/h	Aceleración media: 0,2648 m/seg ²	VSP: 80,33	Rangos de estrés de motor: Bin 19 (-1,6 a 3,1), Bin 39 (3,1 a 7,8) y Bin 59 (7,8 a 12,6)

Nota: Características adicionales para el modelo internacional IVE, por: (Navarro, 2019)

Los datos que se registraron en el modelo IVE, pretendían evaluar las emisiones en tres escenarios diferentes: estrés de motor bajo, estrés de motor medio y estrés de motor alto; puesto que las emisiones se ven influenciadas altamente por la aceleración, velocidad, paradas y otras características de los patrones de conducción (ISSRC, 2008), sin embargo, la variación entre estos tres valores no representó mayor relevancia, puesto que el recorrido no fue lo suficientemente extenso como para generar cambios drásticos en la dinámica de conducción.

La tabla 11 presenta los resultados obtenidos en la estimación de los factores de emisión para las motocicletas que usan gasolina combustible, pues es el combustible que emplean las motocicletas a las que se les aplicó la muestra poblacional.

Tabla 11 Factores de emisión para escenarios de estrés bajo, medio y alto		
Estrés de motor bajo	Estrés de motor medio	Estrés de motor alto
10,74 kg de CO ₂	10,42 kg de CO ₂	10,64 kg de CO ₂

Nota: Datos de factor de emisión según estrés de motor, por: (Navarro, 2019)

Como se puede observar, el factor de emisión en estrés bajo de motor es el más alto de los tres, esto hace referencia a bajas velocidades y pocos o leves cambios en la fuerza y potencia del motor, lo que se asume como arranques del vehículo, que conlleva a mayores emisiones atmosféricas que cuando el vehículo se encuentra en marcha rápida (ISSRC, 2008)

Finalmente, para relacionar los factores de emisión con la cantidad diaria de emisiones de dióxido de carbono, se emplea la ecuación presentada en el apartado 2.2.5, de la cual se muestran los resultados en la tabla 12.

Tabla 12 Emisión diaria de CO₂ por parte de la afluencia vehicular			
	Factor de emisión (g de CO₂)	Cantidad diaria de emisión (g/día)	Cantidad diaria de emisión (Ton/día)
Estrés de motor bajo	10.740	494.040	0,49
Estrés de motor medio	10.420	479.320	0,48
Estrés de motor alto	10.640	489.440	0,49
Promedio (Ton/día)			0,49
Emisión por motocicleta (Ton/día)			0,002438

Nota: Cálculo de emisión por motocicleta, por: (Navarro, 2019)

La cantidad diaria de emisión es el resultado de la multiplicación entre el factor de emisión (en g de CO₂), el total de kilómetros recorridos en el trayecto y el total de motocicletas evaluadas; seguido de esto, se dividió el resultado final entre el número de motos, con el fin de obtener la emisión diaria que estas generan y así poder evaluar las emisiones diarias que realiza todo el grupo de la afluencia vehicular que se observó en el aforo.

FASE III: Análisis de la relación entre la cantidad de emisiones por parte de la afluencia vehicular de dióxido de carbono y la proporción almacenada por los árboles del separador vial

Previo a realizar la proyección de la compensación, se establece la relación de emisión por moto y de almacenamiento por especie arbórea, estos resultados se presentan en la tabla 13.

Tabla 13 Datos de CO₂ por unidad de emisión y almacenamiento		
Año		2019
Emisiones por motocicleta	Ton/año	0,88
Carbono almacenado por árbol	Ton de CO ₂ equivalente	33,72
Carbono almacenado por palma	Ton de CO ₂ equivalente	0,192

Nota: Comparativo de almacenamiento y emisión por unidad evaluada, por: (Navarro, 2019)

De manera general las emisiones correspondientes a una motocicleta que recorre la ruta estudiada, no representan mayor impacto a la calidad del aire, pues estas emisiones corresponden al 2,64% del almacenamiento total de carbono en uno de los árboles del separador como se detalla en la tabla 13, es decir, si la compensación se escala a 1-árbol:1-motocicleta, se podría decir que cada árbol tiene la capacidad de regular las emisiones de 379 motocicletas aproximadamente.

Por otra parte, si se hace un énfasis en el almacenamiento de carbono que realizan las palmas de la zona de estudio, se obtiene que la cantidad de emisiones anuales que realiza una motocicleta supera hasta en 4 veces la capacidad de almacenamiento que tiene una sola de las palmas de la zona de estudio; sin embargo, cuando se analizan todas las palmas frente a las emisiones anuales de una motocicleta, se obtiene que los 9 individuos pueden almacenar el CO₂ emitido por 2 motocicletas.

La relación de la compensación del arbolado urbano en el separador vial frente al estadio Macal respecto de las emisiones de las motocicletas que transitan por el sector, se representa en la figura 12 iniciando por el nivel de compensación actual, seguido por la proyección de las emisiones de motocicletas y almacenamiento de los árboles existentes, suponiendo un crecimiento constante en la población y en la adquisición de motocicletas (Findeter, 2016).

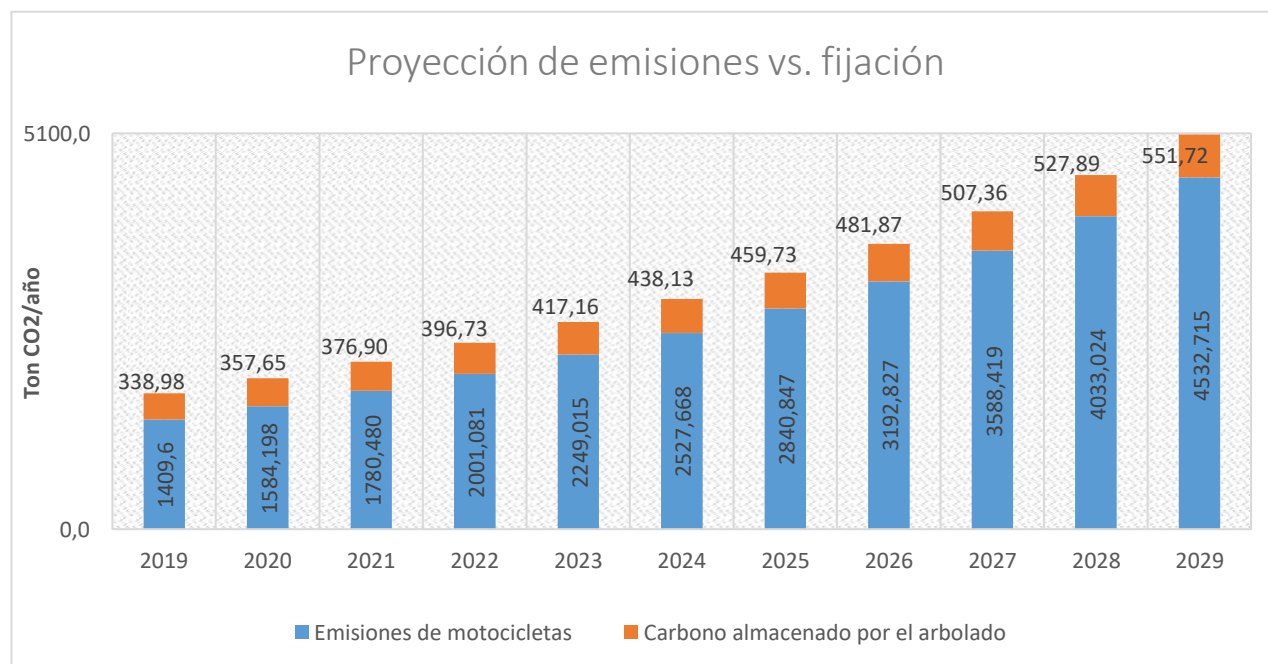


Figura 12. Proyección de las emisiones atmosféricas por parte de las motocicletas vs fijación realizada por el arbolado urbano existente en el separador vial (Navarro, 2019)

La proyección de la compensación que realiza el arbolado urbano del separador vial frente al estadio macal respecto de las emisiones de CO₂ que realizan las motocicletas que transitan por el sector. Este es un modelo de compensación que parte de un aumento constante en la adquisición de motocicletas por parte de los habitantes de Villavicencio y un crecimiento constante de 1 cm en el diámetro del tronco de los árboles evaluados inicialmente bibliográfica (UNAL, 2009) (Pineda, Valdez, & Pérez, 2016).

A pesar que se enfatiza la compensación en solo 10 individuos, en la zona de estudio existen 8 árboles de la especie Palo de Cruz (*Brownea ariza*) que no cuentan con el diámetro suficiente para ser considerados dentro del estudio, esto significa que son especies de poca edad, que aún no tienen gran potencial de almacenamiento de carbono, sin embargo, cuando estos crezcan y se desarrollen, la fijación de carbono tendrá un aumento significativo; a diferencia de las palmas que se encuentran en el separador, dado que no aportan en gran medida a la retención del carbono.

Se espera que la especie Palo de Cruz aporte a la compensación en un periodo de tiempo a largo plazo, debido a que es una especie cuya tasa de crecimiento es lenta, sin embargo, puede alcanzar un DAP de 40 cm y altura de 10 m (EIA, 2016), esto representa que puede incluso llegar a almacenar

mayor cantidad de carbono que las especies con DAP superior a 10 cm existentes en el separador vial de la zona de estudio.

Teniendo en cuenta la información de la figura 12, se establece la diferencia de carbono que se tiene en el año base y en cada año de proyección, con el fin de obtener un dato tangible del porcentaje de carbono que no se está almacenando en el separador vial y que por el contrario queda libre en la atmósfera; este porcentaje se presenta en la figura 13 y se denomina como déficit de compensación.

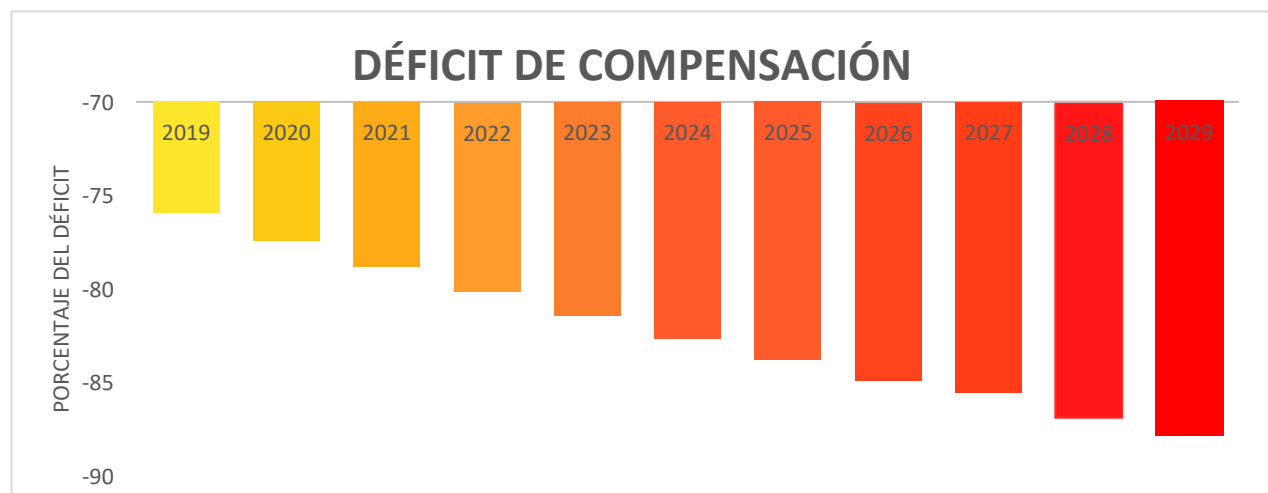


Figura 13. Déficit de compensación (Navarro, 2019)

Las emisiones atmosféricas superan hasta 4 veces el almacenamiento de carbono en el año base y hasta 8 en el año último año de la proyección de las emisiones vs fijación, este hecho permite ver que, a pesar de las proyecciones de fijación de carbono, el aumento del flujo vehicular tiene una dinámica más rápida y por esta razón demanda más sumideros, o menor afluencia.

Se puede considerar contribuir a la demanda de sumideros, pues el separador vial tiene un espacio considerable dónde podrían ser sembrados, por lo menos, dos individuos de la especie *Guarea trichilioides* (Trompillo) ya que si se comparan las especies encontradas en el separador urbano con un DAP mínimo de 10 cm el orden de biomasa aérea de la más alta a la más baja sería: Casco de Vaca (53,41 kg/par), Trompillo (50,01 kg/par), Apamate (49,22 kg/par) y Acacia Forrajera (45,42 kg/par).

A pesar que la especie Casco de Vaca es la que mayor biomasa presenta, esta especie no es nativa y por tanto, no representa beneficios para la estructura ecológica del ecosistema; por el contrario, la especie Trompillo representa un aumento considerable para la fijación de las emisiones de CO₂

provenientes de la afluencia de motocicletas que transita por esta ruta, puesto que, como se detalla en los resultados de la figura 13, la fijación actual de carbono no compensa el nivel de emisiones atmosféricas que se realizan en el sector.

4. Discusión de resultados

Dentro del marco comparativo de la metodología para estimar la fijación de carbono se revisó el trabajo investigativo – Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco - en el cual se encontró un factor adicional que, por cuestiones de localización y dinámicas en el servicio público de aseo, no se pudo determinar en el presente trabajo de investigación.

Este factor se refiere a la hojarasca producida por los árboles estudiados, el aporte de biomasa que tiene este residuo del árbol puede contribuir a un leve aumento del contenido de carbono; sin embargo, es un factor susceptible de considerarse como fuente de fijación o emisión, puesto que de esto depende la disposición final que se le dé a la hojarasca como residuo del arbolado.

Los resultados de la investigación en el bosque primario del resguardo indígena Piapoco fueron asociados con los datos suministrados en el informe – Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenada en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia - dónde se establece que, entre las regiones Andina, Orinoquia y Amazonía no se presentan variaciones significativas en el contenido de biomasa, estableciendo un rango de 89,95 a 95,63 t/ha⁻¹, así pues, situaron los resultados dentro del rango establecido; de la misma manera se ubica el resultado del contenido de biomasa del presente trabajo de investigación (92,45 t/ha⁻¹) dentro de este rango.

Seguido de la estimación de la fijación, se procedió a caracterizar y estimar las emisiones atmosféricas realizadas por las motocicletas que transitaron por la zona de estudio durante un determinado periodo de tiempo. Estos datos se relacionan con el estudio – Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia - se hace énfasis en las diferencias que se encontraron de la revisión bibliográfica.

Inicialmente se detalla que, para el municipio de Envigado, se presentan mayores índices de afluencia vehicular al medio día, mientras que, el presente trabajo de investigación muestra mayor incidencia en la jornada de la tarde; esto puede asimilarse al nivel de interacción ciudadana que tiene Villavicencio, pues la diferencia en pobladores es más del 50% lo que supone mayores dinámicas en la movilidad, además de la ubicación escolar de la zona de estudio.

La diferencia en el horario de mayor emisión, también puede asimilarse al alcance de ambos proyectos, pues la estimación realizada en el municipio de Envigado abarcó toda la zona urbana, mientras que en la estimación que se realizó en este trabajo fue para un tramo de una de las rutas principales de la ciudad.

También se destaca un factor importante que evidencia un estado similar en ambas regiones, pues el estudio de Envigado caracterizó el parque automotor de manera general, donde se obtuvo que el 50,7% de las categorías vehiculares, eran motocicletas, superando autos, camiones, taxis y buses, lo que, al igual que en la ciudad de Villavicencio, significa un mayor número de motocicletas por persona que automóviles.

De la misma manera, en el presente trabajo de investigación se corrobora la necesidad de generar acciones para regular el aumento de las motocicletas que transitan por la ciudad, pues se evidencia que los niveles de contaminación no tienen punto de equilibrio con los diferentes sumideros de carbono que existen en la ciudad (arbolado urbano en separadores viales, parques, jardines y demás).

5. Conclusiones

Los resultados del presente trabajo de investigación permitieron evaluar el estado de compensación que tiene el arbolado urbano del separador vial, el cual corresponde a una fijación de 338,98 Ton de CO₂/año, este dato hace referencia al total de carbono que han almacenado las especies durante todo el tiempo que llevan sembradas en el separador, por lo cual, para doblar la cantidad de carbono almacenado, se tendría que disponer de 19 individuos exactamente iguales (algunos con más de 15 años de edad).

Con respecto a las emisiones atmosféricas de las motocicletas, en solo el primer año de proyección con 1.409 Ton de CO₂/año supera en 76% a la cantidad fijada por el arbolado urbano del separador vial; por lo que se establece el déficit de compensación que tiene la zona.

Los resultados obtenidos en el contenido de biomasa del arbolado urbano existente en el separador vial frente al estadio Macal de Villavicencio, indican un almacenamiento de 92,45ton/ha, lo que sitúa las especies arbóreas dentro del rango establecido por el IDEAM. De esta manera se representa que, a pesar de tener pocas especies de árboles en espacios urbanos, el almacenamiento de carbono es similar al de grandes bosques en zonas rurales y, por ende, se revela la importancia de contar con espacios destinados a siembra de especies arbóreas que no solo brinden este servicio de fijación, sino que también representen un beneficio para la estructura ecológica de la zona.

Por otra parte, el arbolado urbano existente en el separador vial cuenta con especies de diferentes dimensiones dasométricas, esto representa que son especies de varios años de siembra (*Leucaena leucocephala* (Acacia Forrajera), *Tabebuia rosea* (Apamate) y *Guarea trichilioides* (Trompillo)), así como unas con pocos años de siembra (*Brownea ariza* (Palo de Cruz)), lo que significa que al transcurrir del tiempo se han aprovechado espacios verdes disponibles para plantar vegetación, estos perfiles de crecimiento pueden apreciarse específicamente en la figura 4 del incremento medio anual de las especies.

Además, el separador contribuye a la rehabilitación ecológica y el esquema ecológico del sector, pues más del 50% de las especies son de carácter nativo, esto brinda servicios ecosistémicos no solo a las personas que habitan alrededor, sino también a la fauna nativa que pueda encontrarse (se debe tener en cuenta que especies como el mono ardilla y el tucán aracarí, son normalmente vistas en ambientes urbanos).

Por otra parte, las dinámicas vehiculares obedecen a los horarios de entrada/salida de trabajo y estudio, pues el flujo vehicular es más alto en estos horarios y la zona de estudio, al ser un punto clave en la comunicación entre rutas, barrios y vías, debe garantizar sistemas controlados de flujo, es por esto que los semáforos detienen la mayor cantidad de vehículos y da paso paulatinamente a cada uno de los sentidos.

La relación de emisiones atmosféricas no presenta mayores diferencias entre tránsito rápido o tránsito lento (tabla 11) puesto que son pocas las veces que las motocicletas logran alcanzar niveles superiores a 59 km/h y, por lo regular, estas velocidades se atribuyen a motocicletas con altos cilindrajes, esto permite tener un índice de emisión más uniforme a todo tipo de motos que circulan por la vía.

Teniendo en cuenta los índices de emisión se pudo hacer la proyección de emisiones para determinar el grado de compensación, el cual se aprecia en un nivel inferior puesto que el separador vial tiene ocho especies con poco tiempo de siembra, por tanto, cuando estas tengan mayor edad, van a aportar en gran medida a la fijación de las emisiones atmosféricas; adicionalmente en las aceras de peatones existen algunos árboles y a pesar que no fueron incluidos en el estudio (puesto que no se encontraban en el separador vial) también contribuyen al almacenamiento de carbono de la ruta estudiada.

De esta manera, el resultado de este modelo permite apreciar la diferencia entre emisiones y fijaciones de las cuales tan solo en el año base, el primer parámetro mencionado es hasta 4 veces más grande que el segundo. Esta baja compensación se debe a que los sumideros de carbono se ven reflejados en 10 de los 27 individuos del separador, reduciendo de esta manera el potencial de almacenamiento de carbono que puede tener este sector de la vía.

El potencial de fijación de carbono en el separador vial no es proporcional a la dimensión de este mismo, es decir, considerando que el separador tiene 230 metros de largo y 3 de ancho, la cantidad de almacenamiento tendría que ser mayor; la causa principal se atribuye a las nueve palmas que se encuentran allí, pues a pesar de contribuir a la retención de aguas lluvia, la prevención de la erosión y el embellecimiento del lugar, no representan una base fundamental de la estructura ecológica del lugar.

Esto se debe a que, al ser especies introducidas, no presentan fuentes de alimento para las especies nativas y pueden competir por nutrientes con las especies nativas; adicionalmente su potencial de almacenamiento de carbono no se considera de mayor contribución en la compensación estimada

del presente trabajo de investigación, pues las emisiones generadas por una motocicleta supera hasta en cuatro veces el almacenamiento de una palma.

6. Recomendaciones

Con el fin de optimizar la captación, fijación y posterior almacenamiento de carbono en las especies del arbolado urbano del separador vial, así como de aumentar el potencial de compensación que este tiene, se recomienda evaluar la capacidad de las especies presentadas en este trabajo de investigación y otras especies nativas de las que se tengan referencias, para establecer y definir aquellas idóneas para mitigar las consecuencias de las emisiones atmosféricas.

Dentro de este mismo contexto, se recomienda remover las especies de palma que existen en el sector y ser reemplazadas con especies que contengan altos índices de almacenamiento, por ejemplo, si se escogiera una especie del presente proyecto de investigación, sería el Trompillo o Apamate, puesto que la Acacia Forrajera por su dinámica de crecimiento puede obstruir cableados de luz, postes e infraestructuras aledañas.

Adicionalmente, es de gran importancia que se generen acciones y proyectos que logren reducir las emisiones atmosféricas, en este caso, con la disminución del tránsito de las motocicletas cuyo combustible proviene de derivados del petróleo.

Una medida que contribuiría a la reducción de las emisiones podría lograrse con la adquisición de motocicletas eléctricas por parte de los usuarios y la instalación de puntos de recargo de las mismas e implementación de días libres de tránsito vehicular.

También fomentar e incentivar el uso de la bicicleta como medio de transporte cuando la situación amerite, ya que la vía cuenta con la bici ruta correspondiente que permite el tránsito seguro de los ciclistas.

Cuando se habla de incentivos, se refiere (generalmente) a beneficios económicos, como por ejemplo reducción en las tarifas de buses y taxis para estudiantes que necesiten movilizarse por esta ruta, ya que, como se mencionó en el análisis del aforo vehicular, este horario es bastante transitado por estudiantes.

7. Referencias

- Arango, J. H. (Mayo de 2009). Calidad de los combustibles en Colombia. *REDALYC*, 10. Obtenido de Universidad de Los Andes: <https://www.redalyc.org/pdf/1210/121013257013.pdf>
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass And Biomass Change of Tropical Forests: a Primer*. Urbana, Illinois, USA: FAO FORESTRY PAPER.
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forest current status and future challenges. *Science Direct*, 9.
- Cagua, T. A. (2017). El cambio climático y sus implicaciones en la salud humana. *Ambiente y desarrollo*. Universidad Pontificia Javeriana, 12.
- Canales, C. P. (Noviembre de 2002). *Beneficios del arbolado urbano*. Obtenido de DIGITAL.CSIC: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios%20del%20arbolado%20urbano.pdf>
- Carballos, L. (Julio de 2002). *Efecto del Contenido de Azúfre de las Gasolinas Colombianas en los Convertidores Catalíticos para Automóviles*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: http://bdigital.unal.edu.co/43138/36/9587012070_Parte%206.pdf
- Davis, N., He, K., & Others, J. L. (2010). Estimating Emissions from Sources of Air Pollution. *ScienceDirect*, 13.
- Díaz, M. A. (Enero de 2013). *Universidad Libre*. Obtenido de Facultad de Ingeniería: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10750/PROPUESTA%20METODOLOGICA%20PARA%20LA%20CUANTIFICACION%20FORESTAL%20EN%20ZONA%20URBANA.pdf?sequence=1>
- EIA. (2016). *Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburrá*. Obtenido de Grupo de Investigación Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio SITE: <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/>
- Findeter. (2016). *Plan de acción de Villavicencio*. Obtenido de Financiera del desarrollo: <https://www.findeter.gov.co/documentos/202183/villavicencio/>
- Franklin, J., Díaz, J. M., Syphard, A. D., & Regan, H. M. (2016). Global change and terrestrial plant community dynamics. *PNAS*, 10.
- Galindo, A. S., & Uribe, B. R. (2012). La vegetación como parte de la sustentabilidad urbana: beneficios, problemáticas y soluciones, para el Valle de Toluca. *REDALYC*, 12.
- Gómez, J. A. (2006). *Prevención y control de emisiones contaminantes generadas por motocicletas matriculadas en municipios de la jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Obtenido

de Universidad de Antioquia:
http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/Vol1n1/PL_V1_N1_63_EMISIONES%20MOTOS.pdf

IDEAM. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Protocolo+para+la+estimaci%C3%B3n+nacional+y+subnacional_1.pdf/11c9d26b-5a03-4d13-957e-0bcc1af8f108

IDEAM. (2012). *INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO - COLOMBIA*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

IDEAM. (2018). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Características climatológicas de ciudad principales y municipios turísticos: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

ISSRC. (May de 2008). *IVE Model Users Manual*. Obtenido de ISSRC International Sustainable Systems Research: <http://www.issrc.org/ive/downloads/manuals/UsersManual.pdf>

IDEAM. (2011). *Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenada en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022167/EstimacionCarbono2005.pdf>

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. *SCIELO*, 14.

MINAM. (2013). *Lineamientos para la Compensación Ambiental en el marco del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental*. Obtenido de Ministerio del Ambiente : <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/Lineamientos-de-Compensacion-Ambiental-170915.pdf>

MINAMBIENTE. (Septiembre de 2011). *Dirección de asuntos Económicos, Sociales y Ambientales Multilaterales*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo y Desarrollo Sostenible: http://www.minambiente.gov.co/images/asuntos-internacionales/pdf/eventos/270911_pres_antecedentes_rio_20_diesa.pdf

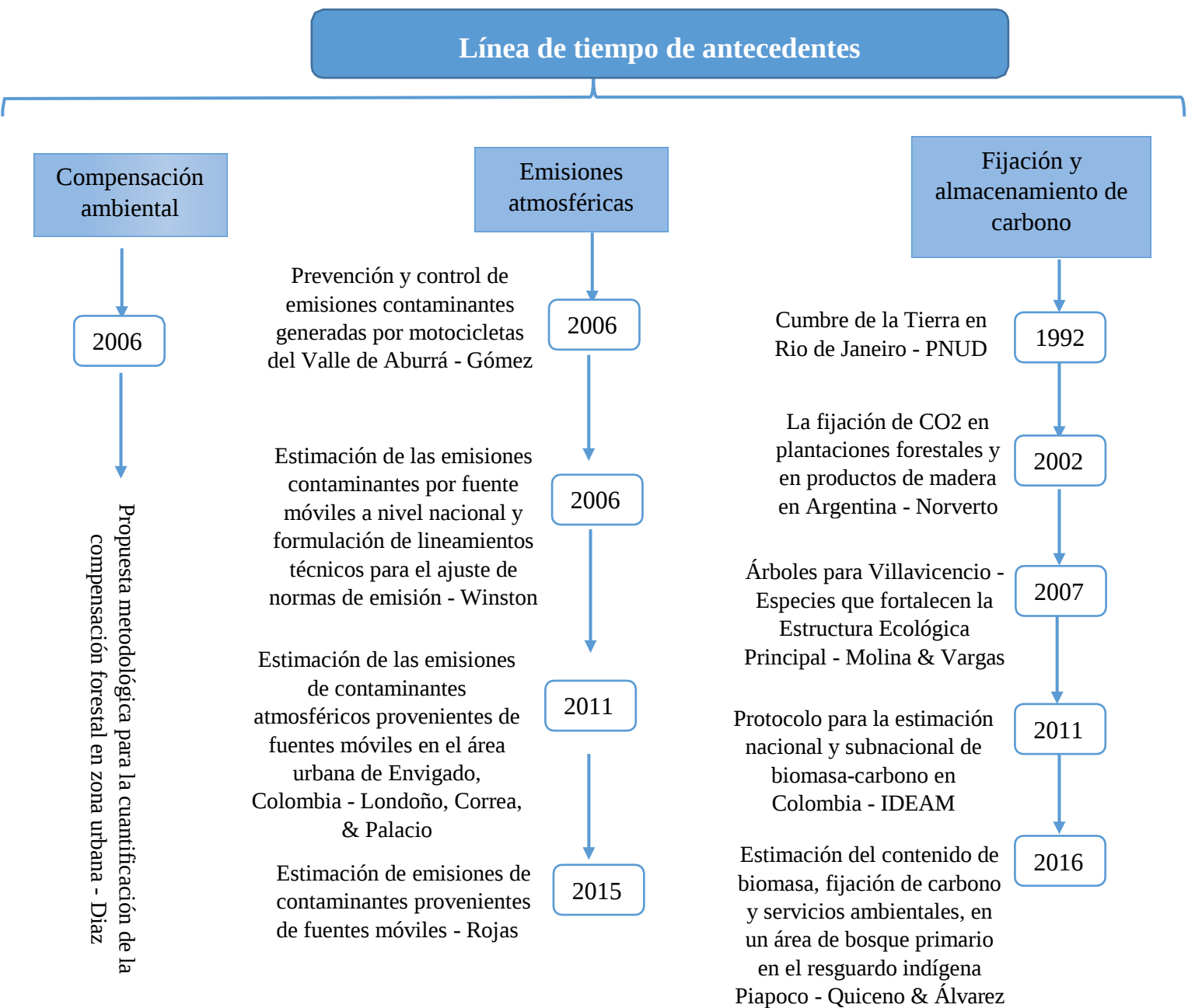
- Molina, L. F., & Vargas, B. (2007). *Árboles para Villavicencio - Especies que fortalecen la Estructura Ecológica Principal*. Obtenido de Universidad Antonio Nariño: https://www.researchgate.net/publication/274388624_Arboles_para_Villavicencio_Especies_que_fortalecen_la_Estructura_Ecologica_Principal
- Morales, A. (2008). *Árboles del Bosque Seco Tropical en el área del Parque Recreativo y Zoológico Piscilago*. Nilo: Universidad Autónoma de Colombia.
- Norverto, C. A. (2002). La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de madera en Argentina. *Food and Agriculture Organization of the united Nations*, 8.
- Pabón, C. D. (2011). *Modelo de gestión urbano para las áreas de expansión de la ciudad de Villavicencio*. Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana.
- Pineda, E., Valdez, J., & Pérez, C. (Agosto de 2016). *Crecimiento en diámetro y fenología de Tabebuia rosea (Bertol.) DC. en Costa Grande, Guerrero, México*. Obtenido de SCIELO: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662016000400019
- PNUD. (1992). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Obtenido de Declaración de río: <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/declaracic3b3n-de-río-1992.pdf>
- Prieto, L. F., & Garzón, B. V. (2007). *Árboles para Villavicencio*. Obtenido de Universidad Antonio Nariño: https://www.researchgate.net/publication/274388624_Arboles_para_Villavicencio_Especies_que_fortalecen_la_Estructura_Ecologica_Principal
- Quiceno, N., & Álvarez, G. T. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Scielo*, 32.
- Rodríguez, S., & Cano, A. (2018). *INFLUENCIA DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA PESADA EN LA CONGESTIÓN VIAL DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Rojas, A. (2015). *Estimación de emisiones de contaminantes provenientes de fuente móviles en la jurisdicción CAR*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/52666/7/AuraRojas.2015.pdf>
- Torres, J. J. (2017). Carbono aéreo almacenado en tres bosques del Jardín Botánico del Pacífico, Chocó, Colombia. *Scielo*, 10.
- Torres, M., & Salazar, K. P. (2010). *Tamaño de una muestra para una investigación de mercado*. Obtenido de Universidad Rafael Landívar:

http://moodlelandivar.url.edu.gt/url/oa/fi/ProbabilidadEstadistica/URL_02_BAS02%20DETERMINACION%20TAMA%C3%91O%20MUESTRA.pdf

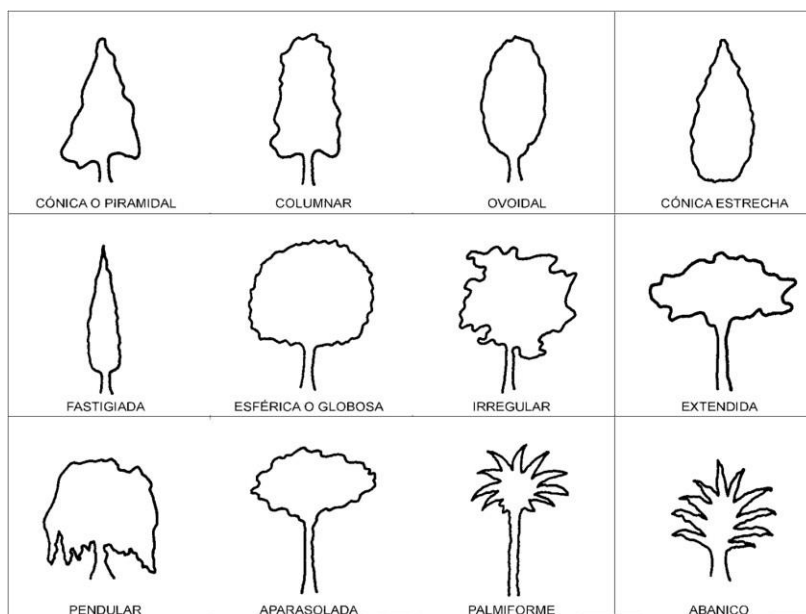
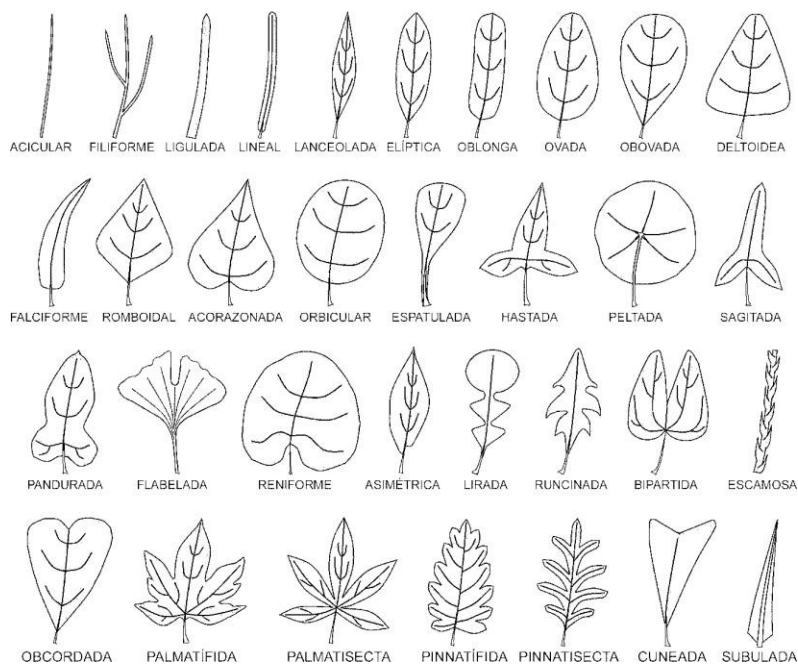
Winston, P. C. (2006). *Estimación de las emisiones contaminantes por fuente móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión*. Obtenido de Universidad De La Salle:
<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14781/00798220.pdf?sequence=1>

8. Apéndices

Anexo A. Línea de tiempo de los antecedentes utilizados en el trabajo de investigación (Navarro, 2019)



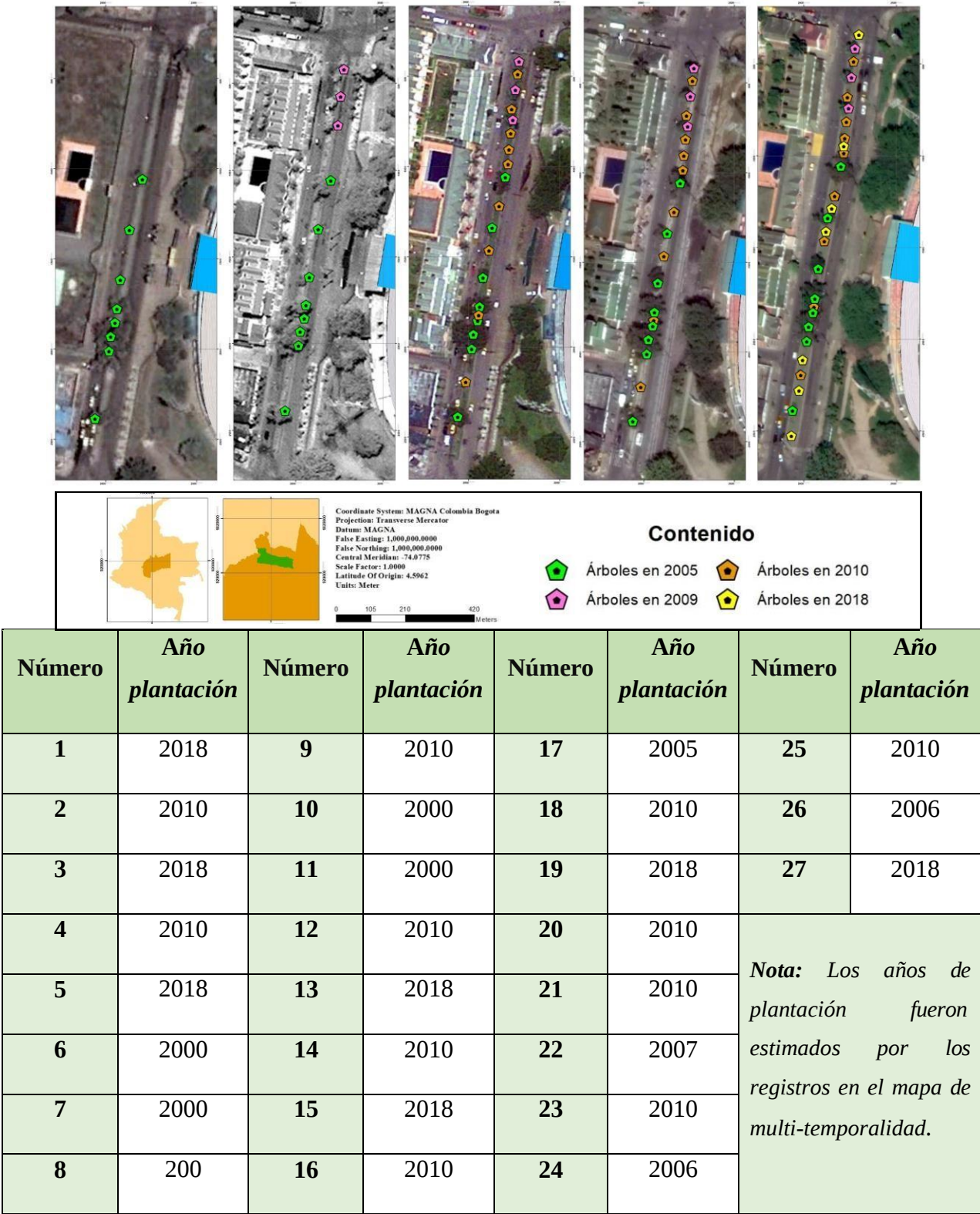
Anexo B. Imágenes descriptivas para la caracterización morfológica del tipo de hoja y tipo de copa (*Morales, 2008*)

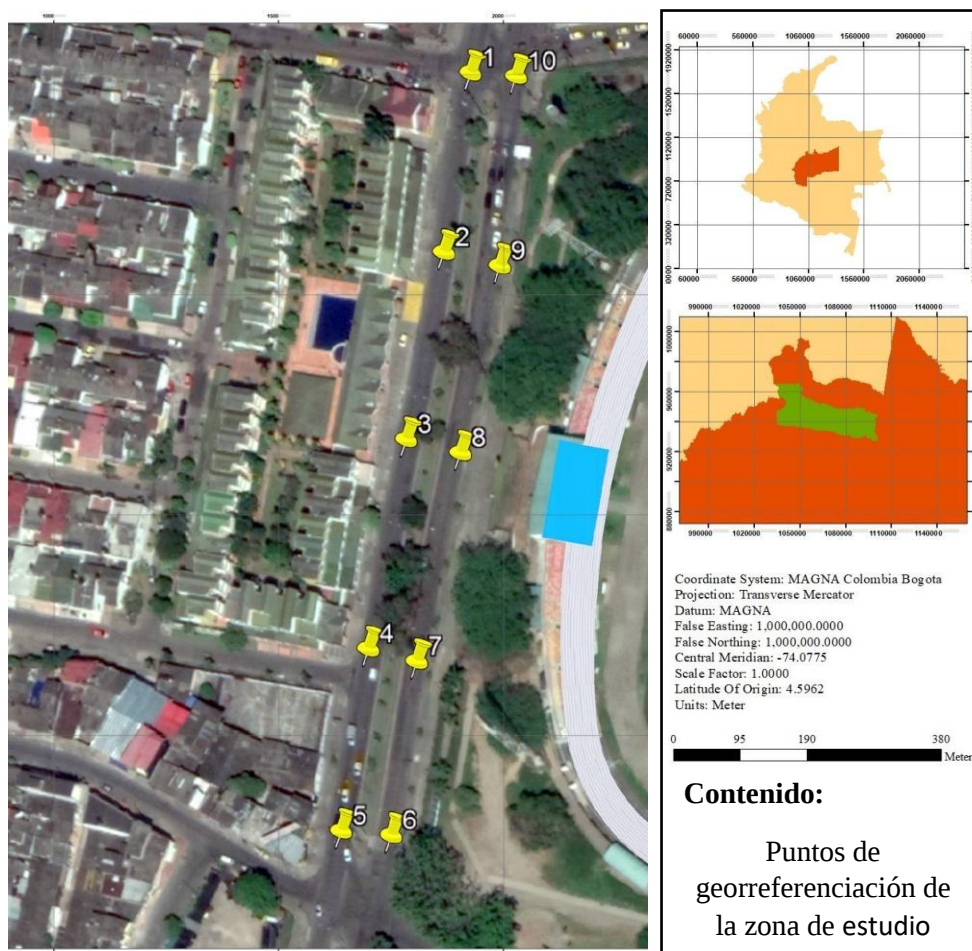


Anexo C. Imágenes de los árboles más representativos de la zona de estudio (Navarro, 2019)

		
<i>Tabebuia rosea</i>	<i>Veitchia merrillii</i>	<i>Leucaena leucocephala</i>
		
<i>Bauhinia purpurea</i>	<i>Bauhinia purpurea</i>	<i>Brownea ariza</i>

Anexo D. Multi-temporalidad del arbolado urbano en el separador vial frente al estadio MACAL de Villavicencio (Navarro, 2019)



Anexo E. Mapa de los puntos de georreferenciación de la ruta de estudio (Navarro, 2019)

1. Latitud: 4°8'27.84" N – Longitud: 73°37'15.98" O

2. Latitud: 4°8'26.18" N – Longitud: 73°37'16.22" O

3. Latitud: 4°8'24.44" N – Longitud: 73°37'16.57" O

4. Latitud: 4°8'22.49" N – Longitud: 73°37'16.91" O

5. Latitud: 4°8'20.81" N – Longitud: 73°37'17.15" O

6. Latitud: 4°8'20.77" N – Longitud: 73°37'16.70" O

7. Latitud: 4°8'22.38" N – Longitud: 73°37'16.47" O

8. Latitud: 4°8'24.31" N – Longitud: 73°37'16.07" O

9. Latitud: 4°8'26.05" N – Longitud: 73°37'15.71" O

10. Latitud: 4°8'27.81" N – Longitud: 73°37'15.56" O

Anexo F. Cálculo del tamaño de muestra (Torres & Salazar, 2010)

El cálculo de la muestra para una población finita, parte de la ecuación (Torres & Salazar, 2010)

$$\text{Tamaño muestra} = \frac{N * Z * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z * p * q}$$

Donde:

N = Tamaño de la población o universo; Z = Parámetro estadístico que depende de N; e = Error de estimación máximo aceptado; p = Probabilidad de que ocurra el evento esperado y q = Probabilidad que no ocurra

Se asignan los valores:

Tamaño de muestra para seis de la mañana	
N	1000
Z	1,96
p	50%
q	50%
e	5%

Tamaño de muestra para el medio día	
N	1290
Z	1,96
p	50%
q	50%
e	5%

Tamaño de muestra para cinco de la tarde	
N	1584
Z	1,96
p	50%
q	50%
e	5%

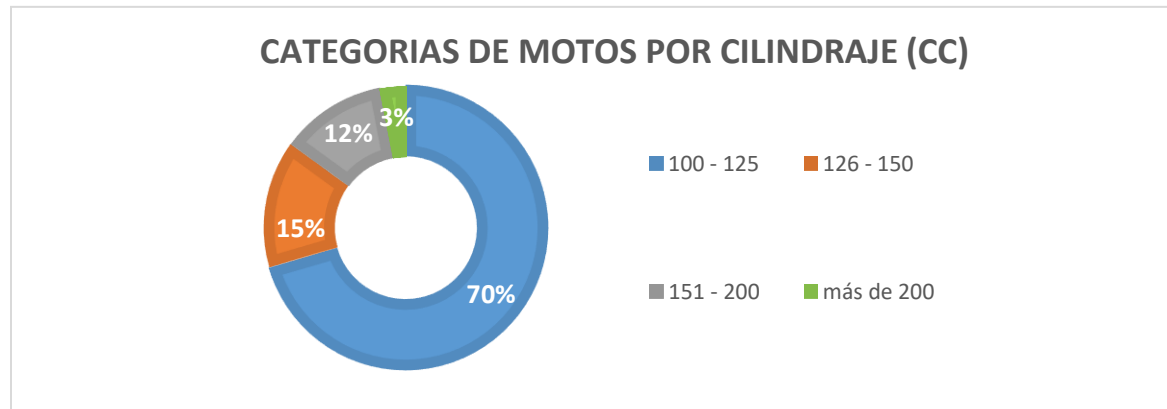
Para obtener el dato Z, se parte del nivel de confianza:

Nivel de confianza	Z _{alfa}	Nivel de confianza	Z _{alfa}
99,7%	3	96%	2,05
99%	2,58	95%	1,96
98%	2,33	90%	1,645

Nota: Valores para obtener el dato Z, por: (Torres & Salazar, 2010)

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Anexo G. Caracterización de motocicletas y velocidades (Navarro, 2019)



Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Auteco	Platino	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	16,90	28	52	0,139
TVS	TVS Sport	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	17,16	28	62	0,099
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	18,25	28	46	0,121
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	19,57	35	42	0,218
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	21,78	35	33	0,269
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	19,65	38	43	0,233
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	21,14	38	38	0,263

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	21,76	38	41	0,196
Hero Motor	Eco deluxe	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	24,45	38	42	0,198
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	22,39	39	40	0,208
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	25,71	39	38	0,241
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	24,60	40	41	0,230
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	25,43	41	40	0,278
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	26,61	41	44	0,227
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	25,58	43	38	0,292
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	28,05	43	33	0,286
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	29,86	46	38	0,285
Auteco	Victory One	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	27,42	47	40	0,299
Suzuki	AX (2 tiempos)	Pt: SmIEng : Lt : 2Cyc FI : None : None: >50 K km	100	29,32	48	38	0,285
Auteco	Boxer	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	100	34,58	55	36	0,332
Auteco	UNI - K	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	15,40	28	49	0,147
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	19,61	28	47	0,136
Auteco	UNI - K	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	19,22	30	50	0,133
Auteco	Activ	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	16,05	32	48	0,168
Suzuki	Hayate	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	22,82	40	40	0,215
Honda	Navi	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	24,86	40	41	0,230

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
AKT	Special	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	31,59	47	43	0,233
Auteco	Activ	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	110	35,25	55	35	0,349
Suzuki	Viva R Cool	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	115	19,61	36	46	0,181
Yamaha	Next	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	115	21,58	36	49	0,181
Suzuki	Viva R Cool	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	115	22,07	36	38	0,227
Yamaha	Crypton	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	115	30,90	48	38	0,285
Yamaha	Crypton	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	115	24,22	49	40	0,333
Suzuki	Hayate	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	115	29,60	49	45	0,265
Suzuki	Best	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	13,63	24	65	0,098
AKT	SL	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	14,00	25	59	0,085
Auteco	Discover	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	15,83	27	48	0,150
Suzuki	Best	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	16,37	27	43	0,155
Auteco	Jetix	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	16,67	28	53	0,136
Auteco	Jetix	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	15,17	29	65	0,120
Yamaha	BWS	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	17,48	29	58	0,125
Yamaha	BWS	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,65	29	52	0,128
Auteco	Agility	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	15,95	30	49	0,159
Suzuki	Best	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	15,55	31	62	0,125
Suzuki	Best	Pt: SmiEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,00	31	42	0,179

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,05	31	52	0,160
Suzuki	GS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,11	31	49	0,170
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	19,23	31	50	0,156
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	17,45	32	49	0,164
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,52	32	57	0,141
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,78	32	47	0,165
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	19,39	32	45	0,185
AKT	Dynamic R	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	19,57	32	45	0,191
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,09	32	56	0,119
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,09	33	53	0,152
AKT	EVO	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,09	33	41	0,183
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,00	34	45	0,148
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,10	34	53	0,168
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	19,86	34	49	0,153
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,30	34	45	0,198
AKT	Flex	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,38	34	59	0,122
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,35	34	48	0,174
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	15,67	35	59	0,132
AKT	SL	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	18,43	35	49	0,176
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	19,65	35	52	0,182

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,57	35	51	0,163
AKT	EVO NE	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,67	35	46	0,205
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,87	35	49	0,187
Auteco	Twist	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,50	35	41	0,217
AKT	EVO	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,48	35	42	0,179
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,52	35	38	0,212
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,79	35	43	0,168
AKT	TTR	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	19,70	36	50	0,156
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,05	36	55	0,157
AKT	NKD	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,10	36	49	0,187
Honda	Click	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	23,52	36	52	0,155
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	23,71	36	42	0,231
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,95	37	45	0,216
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	23,06	37	40	0,222
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	25,13	37	33	0,269
Suzuki	VIVA	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,48	38	56	0,154
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,09	38	51	0,174
Suzuki	VIVA	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,46	38	46	0,211
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,00	38	38	0,227
AKT	Flex	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	20,17	39	46	0,199

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,55	39	44	0,227
Suzuki	GS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,47	39	38	0,227
Auteco	Activ	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,75	39	60	0,167
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,90	39	52	0,171
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	23,09	39	57	0,161
AKT	Special	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	24,50	39	42	0,205
Auteco	Jetix	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	25,33	39	44	0,208
AKT	NKD	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	25,94	39	40	0,229
AKT	NKD	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,33	39	40	0,257
Suzuki	Viva	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,62	39	40	0,250
Yamaha	BWS X	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,05	40	48	0,214
Yamaha	XTZ	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	24,71	40	39	0,235
AKT	NKD	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	25,40	40	40	0,271
Auteco	Twist	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,45	40	37	0,233
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,63	40	42	0,231
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	27,48	40	46	0,211
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	21,35	41	35	0,294
AKT	Dynamic R	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,40	41	39	0,285
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	23,20	41	38	0,256
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,41	41	49	0,215

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,55	41	38	0,234
AKT	NKD	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	27,78	41	41	0,217
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	24,19	42	46	0,205
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	27,19	42	46	0,223
Suzuki	GS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	27,04	43	38	0,278
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	27,85	43	40	0,236
AKT	Flex	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	28,70	43	40	0,236
Honda	BIZ	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	29,50	43	38	0,263
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,11	43	43	0,220
AKT	NKD	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	22,39	44	46	0,248
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	25,00	44	33	0,345
Auteco	Agility RS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	26,63	44	39	0,264
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	28,77	44	42	0,238
Yamaha	YBR	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	28,26	45	38	0,278
AKT	Dynamic R	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	28,61	45	34	0,294
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	30,25	46	38	0,300
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	30,86	46	41	0,291
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,71	46	38	0,270
AKT	TTR	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,91	46	40	0,264
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	30,25	47	38	0,300

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
AKT	Special	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	29,14	48	39	0,285
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	29,77	48	40	0,292
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	30,60	48	33	0,320
Yamaha	BWS	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	27,90	49	38	0,344
Yamaha	YBR	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	28,26	49	43	0,258
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	28,63	49	34	0,310
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,04	49	35	0,333
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,33	49	38	0,336
Auteco	Twist	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,36	49	35	0,333
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	32,86	50	34	0,327
Auteco	Agility	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	32,50	51	35	0,341
Yamaha	XTZ	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	29,33	52	35	0,389
Suzuki	Best	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	31,18	53	36	0,363
Yamaha	XTZ	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	33,33	53	35	0,389
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	32,41	59	33	0,421
Auteco	Fly	Pt: SmIEng : Lt : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	125	34,83	60	34	0,425
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	135	36,54	63	30	0,500
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	22,14	37	35	0,238
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	24,11	40	38	0,227
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	23,95	41	59	0,188

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
AKT	EVO R3	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	28,79	43	42	0,258
AKT	RTX	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	30,00	43	39	0,235
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	25,41	44	38	0,307
Honda	Invicta	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	26,44	44	40	0,236
Suzuki	Gixxer	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	28,78	44	40	0,257
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	25,00	45	39	0,256
Honda	CBF	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	26,71	45	35	0,286
Yamaha	FZ - S	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	27,00	46	46	0,236
Honda	Invicta	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	28,70	47	39	0,285
Yamaha	FZ - S	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	29,16	47	44	0,265
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	30,05	47	46	0,242
Yamaha	FZ - S	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	28,40	48	40	0,257
Suzuki	Gixxer	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	29,65	48	40	0,319
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	30,52	48	34	0,327
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	30,17	50	37	0,330
Honda	XR	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	27,56	52	36	0,340
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	31,83	52	37	0,375
Auteco	Discover 150F	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	37,38	54	38	0,314
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	34,05	55	34	0,392
Yamaha	FZ - S	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	32,36	56	48	0,284

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
AKT	RTX	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	35,30	57	32	0,443
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	36,36	57	36	0,378
Yamaha	FZ	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	34,83	58	37	0,420
Yamaha	FZ - S	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	35,46	61	34	0,425
Yamaha	FZ - S	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	150	32,95	67	29	0,584
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	17,09	28	43	0,168
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	21,79	40	40	0,250
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	28,38	45	40	0,250
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	30,33	49	39	0,278
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	34,79	51	33	0,337
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	31,36	53	35	0,357
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	31,96	53	36	0,347
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	34,27	53	38	0,307
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	29,79	54	37	0,360
Auteco	GT	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	33,46	55	32	0,382
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	35,75	57	34	0,384
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	39,08	61	30	0,500
Auteco	Discover	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	37,61	63	32	0,469
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	41,45	65	32	0,530
Auteco	DTS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	180	38,43	66	32	0,521

Estimación de la compensación de CO₂ respecto a las emisiones vehiculares

Caracterización de las motocicletas							
Marca de la moto	Referencia	Tecnología para la ficha Flota	cc	Velocidad Promedio en (km/h)	Punto más alto de velocidad (km/h)	Duración recorrido (seg)	Aceleración (m/seg ²)
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	30,43	50	37	0,308
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	32,33	51	29	0,450
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	33,05	53	35	0,333
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	32,33	54	36	0,340
TVS	Apache	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	35,24	59	34	0,400
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	37,54	59	31	0,484
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	36,08	60	32	0,443
Auteco	NS	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	38,63	65	30	0,528
KTM	Duke	Pt: SmIEng : Md : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	200	42,13	67	33	0,497
Yamaha	FZ25	Pt: SmIEng : Hv : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	250	24,00	49	41	0,264
Honda	CBR	Pt: SmIEng : Hv : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	250	42,25	63	38	0,373
Yamaha	FZ 25	Pt: SmIEng : Hv : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	250	40,83	68	30	0,556
Honda	XRE	Pt: SmIEng : Hv : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	300	37,79	66	30	0,546
Suzuki	GS	Pt: SmIEng : Hv : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	500	40,88	68	35	0,444
Auteco	Kawasaki Z900	Pt: SmIEng : Hv : 4Cyc Carb : Catalyst : None: >50 K km	1000	42,05	72	21	0,754

Nota: Resultados del aforo vehicular y la caracterización de las motocicletas que transitaron por la hora de mayor afluencia seleccionada, por: (Navarro, 2019)