



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de emisiones actuales de gases de efecto invernadero y escenarios de emisión por transporte multimodal en el eje ruta del sol

Juan Carlos Parra Duque

Universidad Nacional de Colombia
Facultad, de Ingeniería Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia

2017

ESTIMACIÓN DE EMISIONES ACTUALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y ESCENARIOS DE EMISIÓN POR TRANSPORTE MULTIMODAL EN EL EJE RUTA DEL SOL

JUAN CARLOS PARRA DUQUE

Tesis de maestría presentada como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Rodrigo Jiménez Pizarro, Ph.D.

Grupo de Investigación

Calidad del Aire

Línea de Investigación

Inventarios de Emisiones

Universidad Nacional de Colombia

Facultad, de Ingeniería Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2017

*A Eliana por enseñarme que, por más difícil
que parezcan las cosas, perseverar en el
intento hace que la recompensa final sea más
valiosa*

*A Mateo por ser la alegría, la felicidad y el
positivismo de la vida*

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr Rodrigo Jiménez, por su dirección en este proyecto, a todas aquellas personas, compañeros y amigos que colaboraron en la consecución y levantamiento de la información.

A las Ingenieras: Monica Cristancho y Liz Martinez quienes colaboraron activamente en la revisión de la información obtenida y los datos hallados

A mis padres que me acompañaron con su consejo y su ánimo para siempre perseverar

A Mary por ser mi compañera incondicional en estos años, a pesar de las dificultades y adversidades

A quienes nunca creyeron....

VII Estimación de emisiones actuales de gases de efecto invernadero y escenarios de
I emisión por transporte multimodal en el eje Ruta del Sol

Resumen

La Ruta del Sol concentra el 80% de la carga que se transporta entre el centro del país y la Costa Atlántica, la cual se mueve en camiones diésel que generan emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros contaminantes. Para realizar la estimación de estas emisiones, se realizó un inventario detallado del tráfico que circula por la vía para el año de referencia 2011. Estas se hicieron mediante la aplicación de un modelo simplificado de flujo de tráfico vehicular, alimentado con la mejor información disponible, incluyendo: datos del INVIAS, los estudios de tráfico de la Ruta del Sol, y datos obtenidos en pruebas de ruta.

La operación de transporte multimodal que requiere darse alrededor del eje Ruta del Sol, comprende los tres modos de transporte disponibles: Carretero, Fluvial y Férreo, permitirá reducciones importantes en las emisiones generadas por el modo carretero y un mejor aprovechamiento de la vía, para ello se ha estimado el tráfico tanto en el ferrocarril central, como en el Río Magdalena. Aquí se contemplan dos escenarios probables de operación multimodal en los cuales los modos alternos de transporte asumirían un tercio de la carga que actualmente se transporta por carretera. Los resultados muestran que el tráfico terrestre transporta alrededor de 45 Mton/año de carga y generan 1,1 Mton CO₂/año, y que en un escenario conservador de operación multimodal se transportarían 5,5 Mton/año de carga la reducción de emisiones sería del 13%; mientras que en un escenario optimista de 11 Mton/año de carga, la reducción llegaría al 41%

Palabras clave: (GEI – Ruta del Sol - Copert 4 – CO₂).

Abstract

Highway Ruta del Sol, keeps 80% of freight between Atlantic coast and center of country, this freight moves mainly in Heavy Duty Diesel Vehicles that generates greenhouse gases, between other contaminants. In order to estimate those emissions, a detailed traffic inventory in circulation through the Highway was made for the reference year 2011. This were made by a simplified traffic model with the best available information obtained from INVIAS, traffic studies for the Highway, and onboard data.

Multimodal transport operation, that is needed around the Ruta del Sol, comprehends three modes: Road, River and Train, will be reduce road emissions, and permits a better use of the Highway, for this, an estimation of traffic was made for train and river modes.

Two operation scenarios has been considered, results shown that road traffic transport 45 Mton/year of load, and generates 1.1 Mton CO₂/year, and in a moderate scenario, alternative modes would transport 5.5 Mton/year of load, with a reduction of 13% in CO₂ emissions, and in a optimistic scenario, with a transport 11 Mton/year of load, reduction will be of 41%

Keywords: GHG – Copert 4 – CO₂ - Highway Ruta del Sol)

Contenido

Introducción	19
1 El atraso en infraestructura.....	20
1.1 Ruta del Sol.....	23
1.2 Emisiones de gases de efecto invernadero, generados por el transporte	25
1.3 Mejora por transporte multimodal	26
1.4 El Río Magdalena.....	26
1.5 Ferrocarril central – Bogotá - La Dorada – Chiriguana – Santa Marta	28
1.6 Ejemplo / Beneficios del transporte multimodal	29
1.7 Cuantificación de emisiones.....	29
1.8 Escenarios de emisiones.....	30
1.9 Objetivos	30
2 Modelo conceptuales y matemáticos de actividad por modos de transporte ...	31
2.1 Modelo de emisiones	31
2.2 Modelo de tráfico vehicular terrestre.....	32
2.3 Modelo de tráfico férreo.....	34
2.4 Modelo de trafico fluvial.....	36
3 Estimación de factores de actividad.....	37
3.1 Modo Carretero	39
3.1.1 Cartilla de volúmenes de transito del Instituto Nacional de Vías 2011	39
3.1.2 •Estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles en el tramo vial Bogotá- Facatativá (Cundinamarca) – Universidad Nacional de Colombia.....	43
3.1.3 Estudio de Transito, Capacidad y Niveles de servicio – Diseños de las obras necesarios para la construcción del proyecto ruta del sol sector n° 1 Villeta – Guaduro – El Koran,.....	44
3.1.4 Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones .	53
3.2 Modo Fluvial.....	56
3.2.1 Características de las embarcaciones	57
3.2.2 Estudio de demanda del sistema fluvial del Rio Magdalena y evaluación beneficio costo de un esquema de reactivación de la navegación fluvial – Cormagdalena – Steer Davies Gleave 2014.....	58
3.3 Modo Férreo.....	60
4 Estimación de factores de emisión.....	63
4.1 Características de los combustibles en Colombia y factores de emisión	63
4.2 Modelo de emisiones – modo terrestre.....	64
4.2.1 Modelo IVE	65

4.2.2	Modelo de emisiones Copert 4	69
4.3	Modelo de emisiones – modo fluvial	72
4.4	Modelo de emisiones- modo férreo	73
5	Estimación de emisiones y escenarios de emisión.....	75
5.1	Escenarios de emisión	75
5.2	Modo terrestre	75
5.2.1	Calculo de emisiones por estaciones de conteo del INVIAS.....	76
5.3	Escenarios de estimación	83
5.3.1	Modo fluvial	84
5.3.2	Modo Férreo.....	85
5.4	Reducciones de emisiones esperadas.....	87
6	Análisis e interpretación de resultados.....	89
6.1	Modo terrestre	89
6.2	Modo Fluvial	91
6.3	Modo Férreo	92
6.4	Comparativo de emisiones entre los modos de carga	93
7	Conclusiones y Recomendaciones	95

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1: Transporte de carga según modo	21
Figura 1-2: Transporte de pasajeros según modo –.....	21
Figura 1-3: Movimiento de carga en Colombia por corredor logístico.....	22
Figura 1-4: Esquema de la ruta del sol	23
Figura 1-5: Altimetría ruta del sol	24
Figura 1-6: Relación de emisiones de CO2 vs velocidad promedio	25
Figura 1-7: Histórico de la profundidad del Rio Magdalena en los Puertos de: Calamar, Barrancabermeja y Puerto Salgar entre Oct 2011 y Oct 2017	27
Figura 2-1: Esquema de tráfico vehicular en el sector i- ésimo de una vía - Fuente: elaboración propia.....	33
Figura 2-2: Esquema de tráfico férreo en el sector k- ésimo de una vía - Fuente: R:M Lusby et al - 2016.....	34
Figura 2-3: Esquema de viaje para dos trenes viajando a estaciones opuestas-	35
Figura 2-4: Detalle de batimetría plano 12 c3 sector Magangué – Calamar – Fuente : Cormagdalena 2014	36
Figura 3-1: Esquema de información sobre los mapas de la vía –	40
Figura 3-2: Definición de categorías de vehículos para los datos de tráfico promedio diario. Fuente INVIAS.....	41
Figura 3-3: Trafico Promedio Diario 2011.	42
Figura 3-4: Volumen de tráfico vehicular por estaciones consideradas en este estudio	43
Figura 3-5: histograma de distribución año modelo automóviles ruta del sol – fuente UN 2013	44
Figura 3-6: Histograma de distribución kilómetros recorridos automóviles ruta del sol fuente UN 2013.....	44
Figura 3-7: Estaciones de aforo para el estudio HELIOS.....	45
Figura 3-8: Composición de la flota vehicular encuestada en el tramo de análisis –	46
Figura 3-9: Esquema de la matriz origen- destino –.....	47
Figura 3-10: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Cune –	47
Figura 3-11: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Rio Villeta–	48
Figura 3-12: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Intercambiador Villeta– 48	48
Figura 3-13: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Puerto Bogotá.....	49

Figura 3-14:	Volumen de TPD por sentido estación de conteo Caracolí–	49
Figura 3-15:	Volumen de TPD por sentido estación de conteo Shangai	50
Figura 3-16:	Año modelo camiones –	50
Figura 3-17:	Tipos de camión en circulación en el tramo de análisis	51
Figura 3-18:	Tipo de carga en el tramo de análisis	51
Figura 3-19:	Marcas de camiones en circulación en el tramo de análisis	52
Figura 3-20:	Datos de consumo de combustible reportados en tracto camión en la ruta Bogotá- Cartagena.....	53
Figura 3-21:	Remolcador típico en el Rio Magdalena	58
Figura 3-22:	Porcentaje de movilización de carga por el Rio Magdalena con respecto al porcentaje nacional	58
Figura 3-23:	Distribución de la carga por puertos en el área de influencia del Rio Magdalena	59
Figura 4-1:	Esquema del modelo IVE	65
Figura 4-2:	Pantalla del modelo IVE – variación de parámetros de gasolina	66
Figura 4-3:	Pantalla del modelo IVE- variación de parámetros para el diésel –	67
Figura 4-4:	Resultados de la variación de parámetros normalizados en la flota seleccionada modelo IVE- Combustible Gasolina	68
Figura 4-5:	Resultados de la variación de parámetros normalizados en la flota seleccionada modelo IVE- Combustible Diésel	69
Figura 4-6:	Esquema del modelo Copert 4	70
Figura 4-7:	pantalla del modelo Copert 4 – variación de las características del combustible gasolina.....	70
Figura 4-8:	Resultados de la variación de parámetros normalizados en la flota seleccionada modelo Copert IV- Combustible Gasolina.....	71
Figura 5-1:	Cantidad de carga estimada en circulación por la Ruta del Sol –	76
Figura 5-2:	Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los vehículos de pasajeros	77
Figura 5-3:	Emisión de CH4 en toneladas año emitidas por los vehículos de pasajeros	77
Figura 5-4:	Emisión de N2O en toneladas año emitidas por los vehículos de pasajeros	77
Figura 5-5:	Emisión de CO2 equivalente en toneladas por año emitidas por los vehículos de pasajeros	78
Figura 5-6:	Correlación de las estimaciones entre el modelo Copert 4 y el método estándar del IPCC – vehículos de pasajeros.....	78
Figura 5-7:	Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los camiones con carga	79
Figura 5-8::	Emisión de CH4 en toneladas año emitidas por los camiones de carga.	79
Figura 5-9:	Emisión de N2O en toneladas año emitidas por los camiones de carga.	79
Figura 5-10:	Emisión de CO2 equivalente en toneladas año emitidas por los camiones de carga	80
Figura 5-11:	Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los buses	80

Figura 5-12:	Emisión de CH ₄ en toneladas año emitidas por los buses.....	80
Figura 5-13:	Emisión de N ₂ O en toneladas año emitidas por los buses	81
Figura 5-14:	Emisión de CO ₂ equivalente en toneladas año emitidas por los buses .	81
Figura 5-15:	Emisión de CO ₂ en toneladas año emitidas por los camiones sin carga	82
Figura 5-16:	Emisión de CH ₄ en toneladas año emitidas por los camiones sin carga	82
Figura 5-17:	Emisión de N ₂ O en toneladas año emitidas por los camiones sin carga	82
Figura 5-18:	Emisión de CO ₂ equivalente en toneladas por año emitidas por los camiones sin carga	83
Figura 5-19:	Potencial de carga a ser movilizadada por el Rio Magdalena en el primer año de recuperación de navegabilidad	84
Figura 5-20:	Emisiones estimadas por escenarios para la operación entre Puerto Salgar y la Costa Atlántica	85
Figura 5-21:	Movimiento estimado de carga entre Zona Portuaria de Santa Marta y La Dorada para el primer año de operación	86
Figura 5-22:	Emisiones estimadas por escenarios para la operación entre Puerto Salgar y la ZPSM	86
Figura 5-23:	Emisiones totales para carga, en los escenarios planteados	87
Figura 6-1:	Total de emisiones estimadas por categoría de vehículos.....	89
Figura 6-2:	Localización de las estaciones Puerto Araujo – La Lizama	90
Figura 6-3:	Configuración típica de un convoy de carga en el Rio Magdalena –.....	92
Figura 6-4:	Vista del tren de carga existente, a la altura de Chiriguaná- Cesar.....	93

Lista de tablas

Tabla 1-1:	Documentos CONPES relacionados con la Ruta del Sol –	22
Tabla 1-2:	Niveles de servicio de tráfico vehicular	26
Tabla 1-3:	Sectores del ferrocarril central (ANI 2014)	28
Tabla 3-1:	Estaciones de conteo dentro del trazado de la Ruta del Sol – Fuente : INVIAS 2011	39
Tabla 3-2:	Matriz origen destino de los vehículos que circulan en el primer sector Ruta del Sol. Fuente; Estudio Helios	46
Tabla 3-3:	Consumo de combustible para vehículo C3 S3 en condiciones de vacío...54	
Tabla 3-4:	Consumo de combustible para vehículo C3 S3 en condiciones de 100% de carga	55
Tabla 3-5:	Consumo de combustible para vehículo C3 en condiciones de vacío	55
Tabla 3-6:	Consumo de combustible para vehículo C3 en condiciones de 100% de carga	56
Tabla 3-7:	Ejemplo de datos de navegación de un remolcador sobre el Río Magdalena.	56
Tabla 3-8:	Características típicas de los remolcadores en el Río Magdalena	57
Tabla 3-9:	Principales orígenes y destinos de carga con potencial de movilización vía fluvial 2011 (ton) –	60
Tabla 3-10:	Terminales férreos del ferrocarril central	60
Tabla 3-11:	Características técnicas locomotora PR22L – Caterpillar 2016	61
Tabla 4-1:	Propiedades de la gasolina comercializada en Colombia –	63
Tabla 4-2:	Propiedades del diésel comercializado en Colombia –	64
Tabla 4-3:	Factores de emisión para los combustibles colombianos –	64
Tabla 4-4:	variaciones posibles para el contenido de azufre en la gasolina modelo IVE.	66
Tabla 4-5:	Flota vehículos de prueba para evaluación modelo IVE.....	67
Tabla 4-6:	Combustible Diésel Vehículos pesados	68
Tabla 5-1:	Escenarios de carga para operación multimodal en el eje Ruta del Sol año 2032 – Elaboración propia	83
Tabla 6-1:	Resultados de emisiones en el sector Puerto Araujo – San Alberto.....	91

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
<i>A</i>	Actividad
<i>A'</i>	Tiempo de llegada ferreo
<i>D</i>	Tiempo de partida
<i>d</i>	Tiempo de parada en viaje férreo
<i>E</i>	Emisiones
<i>e</i>	Factor de emisión
<i>N</i>	Punto de entrada a tramo de análisis
<i>M₀</i>	Punto de salida del tramo de análisis
<i>Q</i>	Número de viajes entre estaciones férreas
<i>r</i>	Tiempo mínimo de viaje férreo
<i>t</i>	tiempo

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
τ	Tiempo de saturación

Subíndices

Subíndice	Término
<i>i</i>	Tramo punto de conteo carretero
<i>j</i>	Dirección de viaje

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ANI</i>	Agencia Nacional de Infraestructura
<i>CCI</i>	Cámara Colombiana de la Infraestructura
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>CONPES</i>	Consejo Nacional de Política Económica y Social
<i>COP 21</i>	XXI Conferencia Internacional sobre Cambio Climático -
<i>CORMAGDALENA</i>	Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena
<i>CPC</i>	Consejo Privado de Competitividad
<i>DANE</i>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
<i>DNP</i>	Departamento Nacional de Planeación

Abreviatura	Término
<i>EPA</i>	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos- sigla en inglés
<i>FENOCO</i>	Ferrocarriles del Norte de Colombia
<i>GEI</i>	Gases de Efecto Invernadero
<i>GM</i>	General Motors
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<i>INCO</i>	Instituto Nacional de Concesiones
<i>INVIAS</i>	Instituto Nacional de Vías
<i>IPCC</i>	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
<i>IVE</i>	International Vehicle Emission Model – sigla en inglés
<i>MINTRANSPORTE</i>	Ministerio de Transporte
<i>MIT</i>	Massachusetts Institute of Technology
<i>PIB</i>	Producto Interno Bruto
<i>RFF</i>	Racimos de fruta fresca
<i>TPD</i>	Tráfico promedio diario
<i>UNAL</i>	Universidad Nacional de Colombia
<i>UNFCCC</i>	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático – sigla en Inglés
<i>CAR</i>	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
<i>EEC</i>	Comunidad Económica Europea- Sigla en Inglés
<i>GPS</i>	Sistema de posicionamiento global- Sigla en Inglés
<i>MADS</i>	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

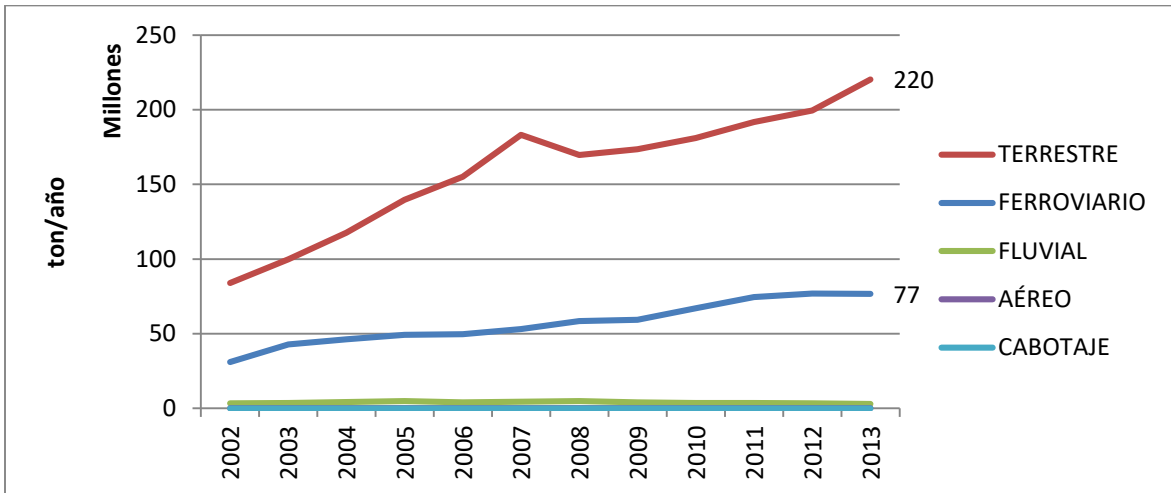
Introducción

La actividad transportadora de carga y pasajeros en Colombia se encuentra concentrada en el modo carretero, de forma tal que las opciones multimodales son restringidas o inexistentes en algunas regiones del país, De acuerdo a esta situación y dentro de las perspectivas de desarrollo económico en el corto y mediano plazo, es necesario generar las opciones de transporte fluvial y férreo que ser requieren para poder alcanzar las metas de crecimiento económico se requiere el cambio al modelo de transporte multimodal sobre el eje de la Ruta del Sol. En el presente documento se analizan los antecedentes y perspectivas de las condiciones de la infraestructura actual del eje Ruta del Sol –. Capítulo 1. Para poder determinar cuáles son las condiciones adecuadas de modelación requeridas se ha desarrollado un modelo teórico que permite la utilización adecuada de los datos disponibles en los modos: carretero fluvial y terrestre. - Capítulo 2. Con esta información disponible se realiza una estimación de los factores de actividad por cada uno de los modos de transporte haciendo uso de la mejor información disponible – Capítulo 3. Seguidamente se hace una selección del modelo de emisiones apropiado que permita empear las características específicas del combustible comercializado en Colombia – Capitulo 4, Con la información obtenida se hacen las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero en 2 escenarios posibles – Capitulo 5, y finalmente se realiza el correspondiente análisis de resultados – Capitulo 6 y las conclusiones y recomendaciones obtenidas – Capitulo 7

1 El atraso en infraestructura

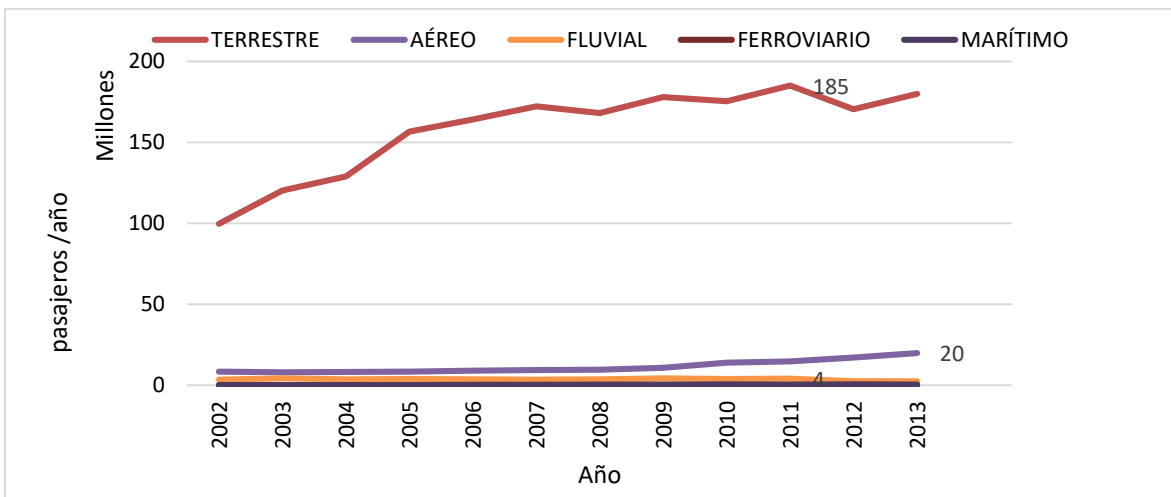
Colombia tiene un marcado atraso en desarrollos de infraestructura, en especial en temas de transporte, el cual obedece a la poca inversión del gobierno central, que entre los años 1993 y 2006 se ubicó por debajo del 1% del PIB (Acevedo et al 2009- Mintransporte 2011). Desde mediados de la primera década del 2000, el gobierno central ha identificado que los atrasos en este aspecto, son la principal razón por la cual el comercio y el desarrollo de las diferentes regiones productivas presentan dificultades en su crecimiento y expansión. Es así como a partir del documento Visión Colombia 2019 (DNP 2006), el gobierno estableció los primeros lineamientos hacia los cuales se debía encaminar el crecimiento económico del país, y con el que, por primera vez, traza unos lineamientos generales a largo plazo, más allá del horizonte tradicional de los periodos presidenciales de 4 años. El Ministerio de Transporte reporta un crecimiento sostenido en el transporte terrestre de carga y pasajeros, (figuras 1-1 y 1-2) el cual desde el año 2002 ha tenido un aumento promedio cercano al 10% lo que indica una preferencia por este modo de transporte en el país, mientras que el transporte ferroviario y fluvial está concentrado en transporte de mercancías no perecederas a granel, principalmente carbón e hidrocarburos, y es comparativamente pequeño (Mintransporte 2011), desaprovechando las posibilidades de reducciones de costos al igual que la disminución en la generación de emisiones contaminantes, lo cual hace que sea necesario establecer unos lineamientos para la mejora de la infraestructura vial intermodal del país para poder atender las necesidades de crecimiento.

Figura 1-1: Transporte de carga según modo

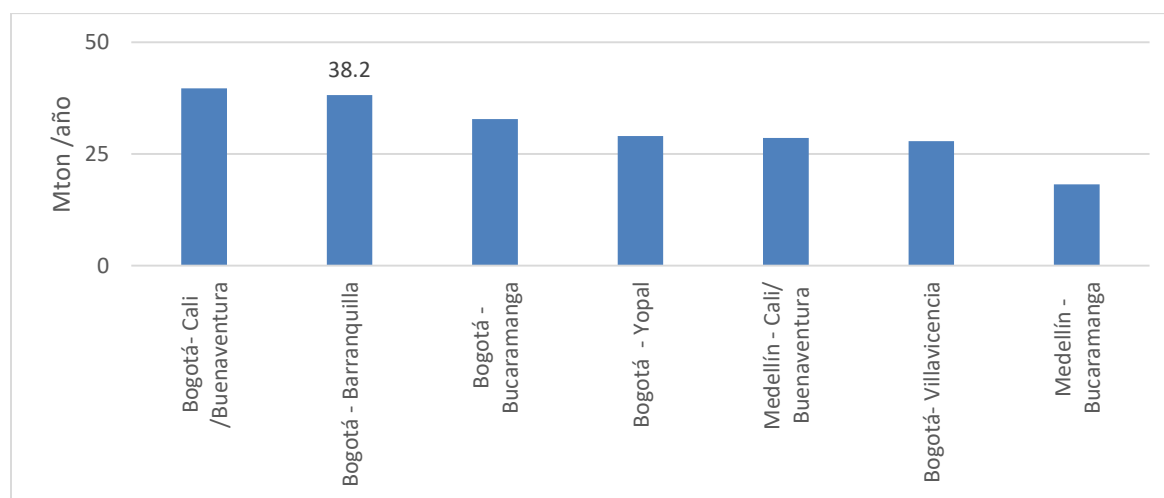


Fuente: MinTransporte 2014

Figura 1-2: Transporte de pasajeros según modo –



Fuente: MinTransporte 2014

Figura 1-3: Movimiento de carga en Colombia por corredor logístico

Fuente: Cámara de Comercio de Cali 2016

El gobierno espera incrementar el tamaño de la economía en 2,1 veces y alcanzar un nivel de inversión de 25% del PIB, (con respecto al año 2005), para lo cual estableció que deberían ser mejoradas las vías terrestres por las cuales se moviliza la carga entre los centros de producción del país y los puertos de la costa atlántica; al igual que la necesidad de integrar dentro de una única plataforma logística la navegabilidad de los ríos y la reactivación de los corredores férreos. Una serie sucesiva de documentos CONPES (Tabla 1-1) dieron vía libre a la implementación de dichos lineamientos, entre los cuales están:

Tabla 1-1: Documentos CONPES relacionados con la Ruta del Sol –

CONPES	TÍTULO	AÑO
3489	Política nacional logística	2008
3571	Importancia estratégica del proyecto vial Ruta del Sol	2010
3748	Importancia estratégica de la rehabilitación de los corredores férreos: La Dorada - Chiriguaná y Bogotá - Belencito	2013
3758	Plan para restablecer la navegabilidad del Río Magdalena	2013

Fuente: DNP

El desarrollo de estos lineamientos permitiría que el país incremente su capacidad de exportación y acceso a mercados internacionales, mediante una reducción significativa de los costos de fletes de carga, en especial porque gran parte de la

industria del país y la consecuente generación del PIB- se concentra en la Sabana de Bogotá y sus alrededores, 25% según el DANE.

1.1 Ruta del Sol

La Ruta del Sol, es la vía en construcción más importante del país, la cual tendrá 1050 km de doble calzada, con 19 km de túneles; atraviesa 9 departamentos y 22 municipios. Permitirá la conexión entre Bogotá y La Ye de Ciénaga en un tiempo estimado de 10 horas para automóviles y 14 horas para vehículos de carga. Por esta vía actualmente se transporta cerca del 98% de la carga entre la Costa Atlántica y el centro del país (INCO 2012). Datos del Ministerio de Transporte muestran que esta vía, es actualmente una de las más transitadas con más de 3.000.000 de camiones año, y se espera que esta cifra aumente considerablemente una vez entre en total operación (Acevedo et al 2009)

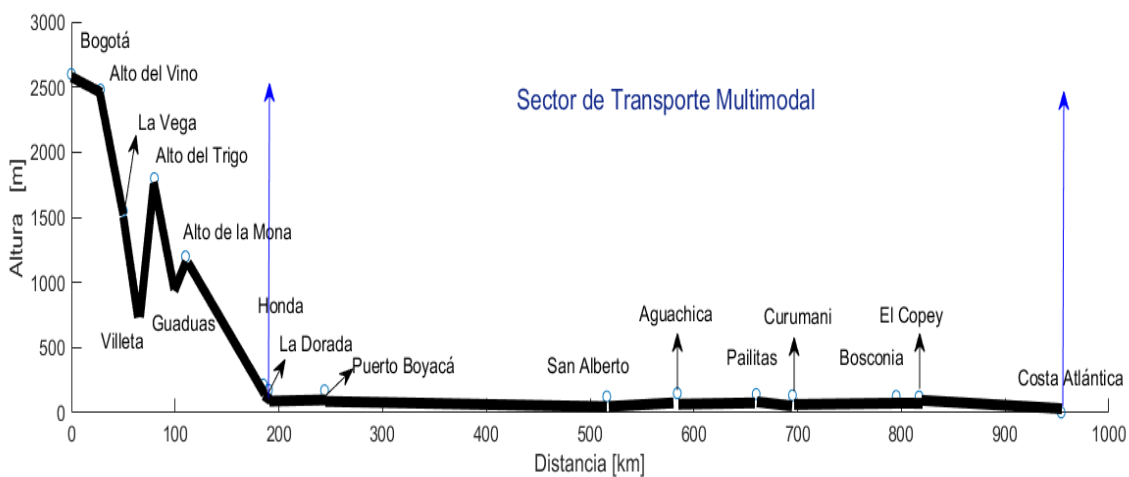
Figura 1-4: Esquema de la ruta del sol



Fuente: El Espectador 2012

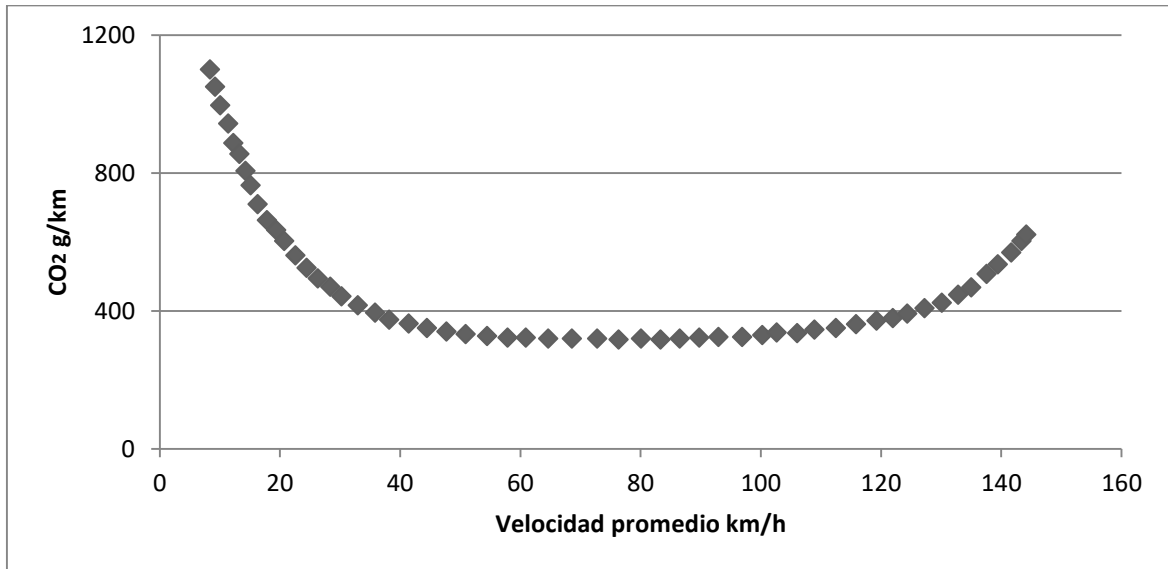
A pesar del alto volumen de tráfico actual y esperado, dentro de los estimados de desarrollo y utilización de la vía, no se han contemplado los escenarios de generación de emisiones contaminantes por fuentes móviles; más aún si se tiene en cuenta la variación en la altitud sobre el nivel del mar de la ruta, que va desde los 2600 m. en Bogotá, hasta los 0 m. en Santa Marta, no se cuentan con estimaciones o modelos de emisión que contemplen esa variación sobre el nivel del mar

Figura 1-5: Altimetría ruta del sol



Fuente: El Autor a partir de datos de INVIAS

La relación de velocidad del vehículo y la generación de CO₂ es del tipo cuadrático inversa, con un valor mínimo entre los 40 y 60 km/h, tal y como se muestra en la figura 1-5, de forma que la velocidad permitida en la vía influye directamente en la generación de emisiones.

Figura 1-6: Relación de emisiones de CO₂ vs velocidad promedio

Fuente: Barth M, Boriboonsomsin, K 2009

1.2 Emisiones de gases de efecto invernadero, generados por el transporte

Es claro que los vehículos de combustión interna, cualquiera que estos sean, son los principales generadores de gases de efecto invernadero – GEI-, desde el protocolo de Kyoto (UNFCCC 1998) se determinó que deberían realizarse acciones encaminadas a la reducción de emisiones provenientes de los vehículos, y recientemente, en la COP 21 en París, el gobierno nacional suscribió un compromiso para la reducción de emisiones, de las cuales, según el inventario de nacional de emisiones (IDEAM 2016) el transporte aporta cerca de 33 Mt CO₂/año, y dado que, en Colombia, el modelo de transporte de mercancías y bienes es casi que exclusivamente realizado por el modo carretero, entre la Costa Atlántica y el centro del país, resulta importante realizar una estimación detallada de las emisiones de GEI, generadas por esta actividad.

De acuerdo al Plan Estratégico Intermodal de Infraestructura de Transporte – PEIIT (MinTransporte 2013), dentro de la estimación de crecimiento económico normal, las vías que comunican el Centro del País con la Costa Atlántica, que para el año 2010, tienen un

nivel de servicio de tráfico vehicular categoría F (totalmente congestionado), se espera que mantengan el mismo nivel si no se implementa una estrategia de transporte multimodal, el desarrollo adecuado de esta estrategia permitiría tener niveles de ocupación categoría C, La Tabla 1-2 muestra los niveles de servicio de tráfico vehicular para una vía típica (CAL Y MAYOR, R. CARDENAS, J 1994)

Tabla 1-2: Niveles de servicio de tráfico vehicular

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	% RELACIÓN INTENSIDAD VEHICULAR / CAPACIDAD VÍA
A	Flujo Libre	0 - 30
B	Flujo estable y ligero	30 -50
C	Flujo estable y aceptable	50-70
D	Flujo pre-inestable/ tolerable	70-84
E	Flujo inestable - congestionado / intolerable	84-100
F	Flujo forzado - congestión total	> 100

1.3 Mejora por transporte multimodal

El PEIIT establece dentro de unos escenarios de crecimiento moderado, la necesidad de realizar operaciones de transporte multimodal, para atender tanto la demanda de bienes y servicios entre el centro del país y la costa atlántica, como también la necesidad de atender los compromisos comerciales adquiridos por el país, a través de los tratados de libre comercio que actualmente están en vigencia. Para ello plantea la necesidad de reactivar la navegabilidad por el Río Magdalena desde Puerto Salgar hasta Barranquilla, garantizando una profundidad mínima de 7 ft /2.1 m. (Cormagdalena 2014). y la reactivación del ferrocarril central, entre Bogotá y Santa Marta, con trenes adecuados para una mayor velocidad que puedan operar en trocha angosta, que es la trocha existente

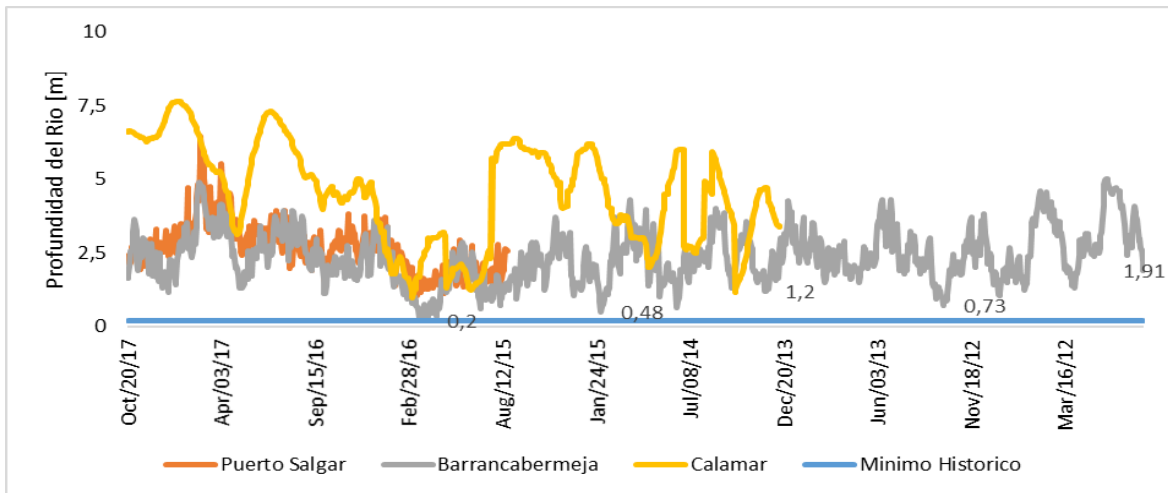
1.4 El Río Magdalena

Actualmente el Río es navegable para transporte de carga hacia la Costa Atlántica, desde Barrancabermeja, y es utilizado principalmente para el transporte de crudo y bunker entre las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena.

La capacidad estimada del Río para el transporte de mercancías, se estima en 550 millones de toneladas anuales (CORMAGDALENA 2014)., pero actualmente solo transporta alrededor de 2 millones, Esta capacidad también viene dada con un

menor número de vehículos que podrían transitar por la hidrovía, Por ejemplo: un remolcador con una configuración de 8 barcazas puede transportar en un solo viaje 7200 ton, lo que equivale a cerca de 180 tracto camiones para transportar la misma carga. Aunque estos beneficios solo son palpables para trayectos mayores a 500 km, dentro de la integración de los modos de transporte previstos por el gobierno, la utilización eficiente del Rio permitirá ampliar el tráfico de mercancías requerido por el país para alcanzar las metas de desarrollo previstas para el mediano plazo. Los indicadores de costos establecen que, una tonelada de carga transportada por el rio tiene un costo cercano a los U\$40, frente a U\$200 el costo que tiene la misma tonelada de carga transportada por carretera. (CORMAGDALENA 2014). Esta opción de transporte que actualmente se ve afectada por los efectos del Niño en los meses de Enero y Febrero cuando este fenómeno estacional se da, el resto del año permite una navegación adecuada- en el Anexo 2, se puede ver la figura A2_1 con los niveles históricos del Rio Magdalena desde el año 2011 y en los cuales se aprecia que aunque el fenómeno sí tiene efectos importantes, la navegación es realizable entre los puertos de Barrancabermeja - Cartagena y Barranquilla, en el resto del año.

Figura 1-7: Histórico de la profundidad del Rio Magdalena en los Puertos de: Calamar, Barrancabermeja y Puerto Salgar entre Oct 2011 y Oct 2017



Fuente: El Autor a partir de los datos de Cormagdalena

1.5 Ferrocarril central – Bogotá - La Dorada – Chiriguaná – Santa Marta

Al igual que la navegación por el Río Magdalena fue abandonada por los principales sectores de la economía, el tren fue abandonado hace más de 30 años como opción para el transporte de carga y pasajeros. Esta red se compone de los siguientes tramos:

Tabla 1-3: Sectores del ferrocarril central (ANI 2014)

TRAMO	LONGITUD [KM]	ESTADO
BOGOTÁ - LA DORADA	195	Rehabilitado
LA DORADA- BARRANCABERMEJA	244	Rehabilitado
BARRANCABERMEJA - CHIRIGUANÁ	280	Rehabilitado
CHIRIGUANÁ – CIÉNAGA	210	Operativo Concesionado
CIÉNAGA - SANTA MARTA	35	Operativo Concesionado

En el año 2012 el gobierno Colombiano suscribió un acuerdo de intención con el Reino Unido para la rehabilitación del corredor férreo, el cual presentó una serie de daños importantes durante el fuerte invierno presentado en el país en el año 2011, esta rehabilitación se culminó a mediados del año 2015, y para octubre de 2016, se realizó un recorrido de prueba entre el puerto de Santa Marta y La Dorada, bajo la operación de la firma Holdtrade Atlantico, filial de Holdtrade INC y Transnet, las dos firmas líderes en el mundo en fabricación y operación de trenes de trocha angosta. Esta prueba permitió establecer la continuidad de la línea férrea entre estas ciudades, al igual que demostrar la utilidad de la vía como una alternativa válida de transporte. (ANI 2016), pero esta fue realizada con locomotoras GR12 W con motor EMD de General Motors del año 1965 cuya velocidad máxima fue de 40 km/h. De acuerdo con las proyecciones de desarrollo del tren como opción de carga, se estima en 10 h, la realización del trayecto en mención, para lo cual las características de las locomotoras a usar serán bastante diferentes a las usadas en el recorrido de prueba, conforme a las informaciones de los posibles operadores de la vía y de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI.

La vía férrea actualmente está deshabilitada entre Bogotá y La Dorada, a partir de allí se encuentra en condiciones operativas, aunque actualmente se realiza el cambio de las vigas

de la vía en varios sectores, con el fin de poder operar un tren con mayor velocidad; en el primer semestre de 2017, el gobierno adjudicara a uno de los 4 proponentes actuales, la operación por concesión del tramo férreo entre La Dorada y Chiriguaná. El tramo entre Chiriguaná y Santa Marta, actualmente es operado por FENOCO, y en este sector se mueven en promedio 30 Millones de toneladas de carga anuales de carbón (La Republica – 21 enero 2017).

1.6 Ejemplo / Beneficios del transporte multimodal

Se considera que hay un modelo de transporte intermodal, cuando al transportar una mercancía o personas, se combinan al menos dos modos de transporte dentro de un mismo contrato, garantizando la mejor relación: costo –beneficio – tiempo. (ZARHUM D 2005) Un ejemplo bien desarrollado de un centro de transporte multimodal es la ciudad de Malmö -, puerto ubicado al sur – oeste de Suecia, sobre el Mar Báltico, y donde entre 2009 y 2012 se implementó un modelo de transporte multimodal para facilitar el acceso a los servicios portuarios desarrollaron un centro logístico de carga y servicios de transporte para integrar transporte carretero, marítimo y férreo, Este proyecto permitió reducir los tiempos de cargue y desplazamiento en aproximadamente un 15 %, el proyecto incluyo el establecimiento de un terminal multimodal que consistió de un terminal de ferries, junto con un terminal de contenedores y un terminal de trenes conectado con el sistema nacional de trenes de Suecia, disminuyendo de esta forma los tiempos de demora, la densidad de vehículos y reduciendo los niveles de servicio de las vías de acceso al terminal mediante un manejo integrado de la información y los servicios de transporte prestados por los diferentes operadores.(TEN-T EU 2009)

1.7 Cuantificación de emisiones

Para la cuantificación de emisiones en el eje Ruta del Sol se ha propuesto evaluar los diferentes modelos de emisiones aplicables para el caso de transporte terrestre, y que regularmente son usados en el país, como son: El modelo IVE y el modelo COPERT 4, para la selección adecuada del modelo de emisiones se realizara una comparación objetiva de las capacidades de cada modelo y la adecuación de estos a las condiciones de tráfico, combustibles y características de la flota en circulación

por la ruta del sol. Mientras que para los modos férreo y fluvial y dependiendo de la información obtenida se desarrollara el modelo estándar del IPCC o el modelo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) aplicables a cada modo.

1.8 Escenarios de emisiones

Se plantea el desarrollo de dos escenarios de emisiones: El establecimiento detallado de las emisiones para el año 2011, por la disponibilidad de la mayor cantidad de información para el modo carretero y una proyección moderada de emisiones para el año 2032, año en el que el gobierno nacional ha establecido que Colombia será uno de los tres países más competitivos de la región – (DNP 2006)

1.9 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo de tesis son:

- Establecer los valores de actividad detallados de la circulación de vehículos en el modo carretero por la ruta del sol, y por el Rio Magdalena
- Estimar la actividad esperada por el modo férreo a final del primer año de operación del modo de transporte férreo (2018)
- Hacer una estimación de las emisiones provenientes de los modos de transporte carretero (modelo COPERT 4), fluvial (modelo IPCC- 2006) al finalizar para el año 2011,
- Hacer una estimación de las emisiones provenientes del modo de transporte férreo al año 2018. (Modelo EPA – MIT)
- Realizar una estimación de las emisiones de los tres modos de transporte al año 2032
- Verificar la reducción de emisiones esperada por la implementación del transporte multimodal al año 2032

2 Modelo conceptuales y matemáticos de actividad por modos de transporte

2.1 Modelo de emisiones

Las emisiones de provenientes de una fuente, pueden determinarse mediante la expresión (Ecuación 2.1)

$$E_k = e_k * A_k \quad (2.1)$$

Donde

e_k = factor de emisión de la fuente k

$A_{i,k}$ = Actividad de la fuente k

Para el análisis de las emisiones provenientes de cada uno de los sectores de transporte considerados, se debe tener en cuenta las características particulares del tipo de vía: terrestre – fluvial – férrea.

Dado que el número de vehículos y la actividad de cada uno de estos varia a lo largo de los tramos de análisis, debe realizarse una división por sectores de las vías, de forma que la ecuación 2.1 debe escribirse como: (Ecuación 2.2)

$$E_{i,k} = e_{i,k} * A_{i,k} \quad (2.2)$$

$e_{i,k}$ = factor de emision de la fuente k – esima en el sector i

$A_{i,k}$ = Actividad de la fuente k – esima en el sector i

Para cada tipo de vehículo, se determinarán los factores de emisión adecuados, junto con la correspondiente actividad en cada uno de los tramos en los cuales debe segmentarse la vía para el análisis apropiado.

Por ello se requiere el establecimiento de un modelo conceptual de actividad que permita el uso de los datos disponibles de circulación de los vehículos:

- Autos y camiones en la ruta,
- Remolcadores y barcazas en el Río
- Trenes en el corredor férreo.

El modelo conceptual de tráfico permitirá el uso apropiado de alguno de los métodos de estimación de emisiones. Dado que no es posible adscribir el método de referencia del IPCC (2006) para la estimación de emisiones, debido a que el tráfico vehicular (en cada uno de los modos) no puede considerarse como un valor promedio a lo largo de la ruta por las variaciones en el flujo debido a las entradas y salidas que tiene la vía.

Una vez establecido el modelo matemático se procederá a la selección de los modelos de estimación de emisiones correspondiente a cada uno de los modos de transporte.

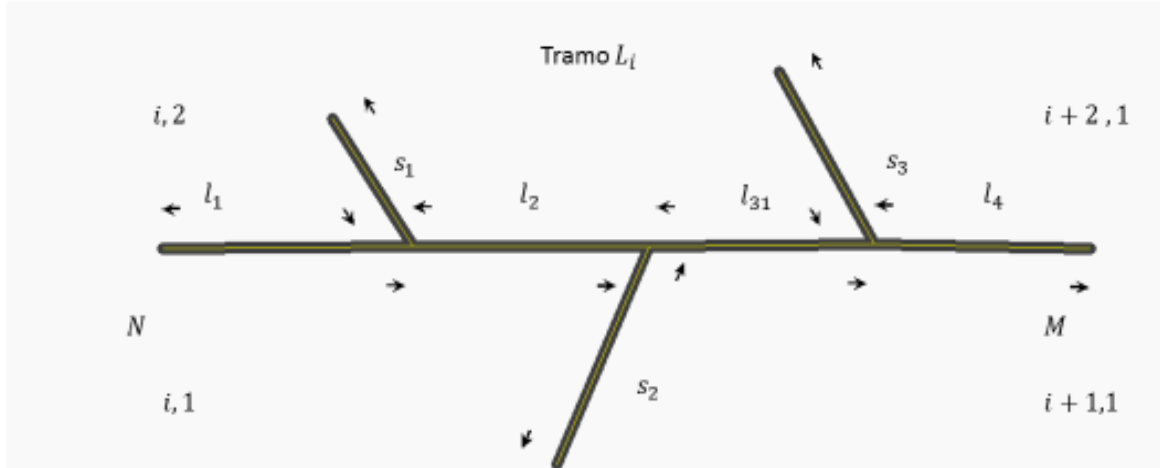
El desarrollo de este modelo se presenta a continuación:

2.2 Modelo de tráfico vehicular terrestre

De acuerdo con los datos de tráfico vehicular disponibles (INVIAS 2011, Consorcio Helios 2012) el número de vehículos que circulan por la Ruta del Sol, no es uniforme en términos de volúmenes de tráfico y composición vehicular en todos los sectores en que está dividida la ruta; de forma que tomar un valor promedio para la circulación generaría un error considerable.

Para la estimación adecuada del flujo vehicular en un sector *i-ésimo* de la ruta del sol se tiene a partir de la figura 2.1 que:

Figura 2-1: Esquema de tráfico vehicular en el sector i-ésimo de una vía -



Fuente: elaboración propia

Sean :

l_i = Tramo i-ésimo de análisis entre las estaciones de conteo

N: Punto de entrada del tramo i-ésimo

M: Punto de salida del tramo i-ésimo

Sea N_{ijk} donde k = categoría vehicular

i = tramo punto de conteo

j = dirección

$$N_{i,1,k} + N_{i,2,k} \tag{Ecuación 3}$$

$$L_i = \sum_s l_{i,s} \tag{Ecuación 4}$$

S= número de salida en el tramo i-ésimo

$$N_{i,1,k} = N_{i+1,1,k} + \sum_s M_{i,1,k,s} \tag{Ecuación 5}$$

$$E_{i,1,k} = l_k(i, 1) * A_{i,1,k} \tag{Ecuación 6}$$

A = Actividad [veh km]

$$A_{i,1,k} = N_{i,1,k} * L_i + \sum_s M_{i,1,k,s} * l_{i,s} \tag{Ecuación 7}$$

$$\Delta A_{i,1,k} = M_{i,1,k}^* * l_i^* \tag{Ecuación 8}$$

$$N_{i,1,k} + \sum_s M_{i,1,k,s} = N_{i+1,1,k} \tag{Ecuación 9}$$

Lo que indica que el tráfico de N vehículos en el sector i -ésimo permite estimar adecuadamente la actividad en dicho sector.

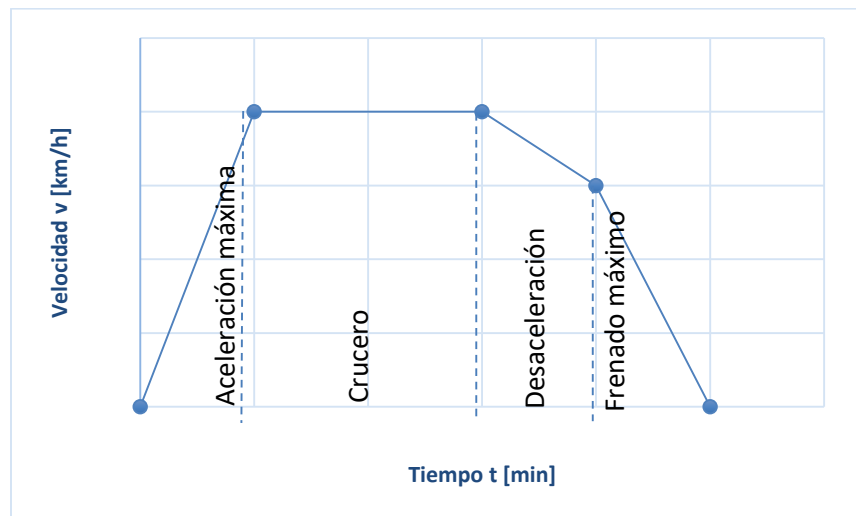
Esta definición de actividad será aplicable a a los modos de transporte terrestre y fluvial, dado que la hidrovía tiene las mismas características de tráfico de una vía terrestre

El modelo de tráfico es necesario para llevar a cabo la estimación adecuada de la actividad, debido a que, aunque los datos de conteo de las estaciones del Invias, a lo largo de la Ruta del Sol, cubren las principales entradas/ salidas de vehículos en los tramos en que está dividida, en algunos puntos existen conexiones con vías secundarias/ terciarias que no son contabilizados adecuadamente y que muestran variaciones del flujo de vehículos que deben ser definidos matemáticamente.

2.3 Modelo de tráfico férreo

El modelo a considerar se ha establecido de a partir de la condición de uso mínimo de combustible, de forma que se supondrá que la relación velocidad – tiempo es como se muestra en la figura 2-2

Figura 2-2: Esquema de tráfico férreo en el sector k -ésimo de una vía -



Fuente: R:M Lusby et al - 2016

Sea para un tren viajando en una dirección dada:

Q número de viajes consecutivos entre estaciones

$$Q = 1,2 \dots n$$

$$r_q = \text{tiempo minimo de viaje}$$

$$d_q = \text{tiempo de parada entre viajes}$$

$$D_q = \text{tiempo de partida}$$

$$A'_q = \text{Tiempo de llegada}$$

$$S_q = \text{Tiempo suplementario}$$

El valor mínimo de consumo de combustible, será una función $\min f(D, A, S)$

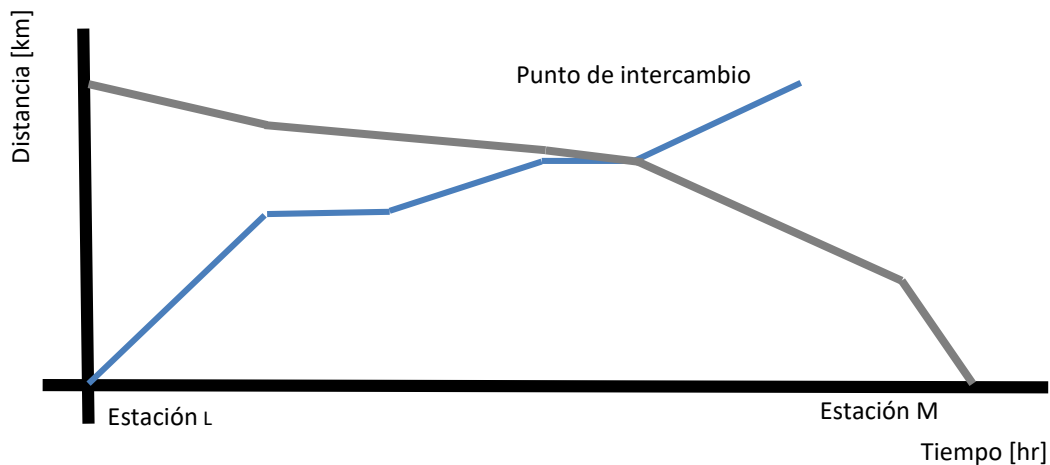
Este valor mínimo se da cuando:

$$A'_q - D_q = r_q + s_q \tag{Ecuación 10}$$

$$D_{q+1} - A'_q = d_q \tag{Ecuación 11}$$

Para dos trenes viajando entre dos estaciones, uno en el sentido l-m y el otro en el sentido m-l, figura 2.3 se tiene que:

Figura 2-3: Esquema de viaje para dos trenes viajando a estaciones opuestas-



Fuente: elaboración propia

$$A_{q(lm)} - D_{q(lm)} = \tau_{q(lm)} \tag{Ecuación 12}$$

$$A_{q(ml)} - D_{q(ml)} = \tau_{q(ml)} \tag{Ecuación 13}$$

El momento de saturación de la vía se da cuando

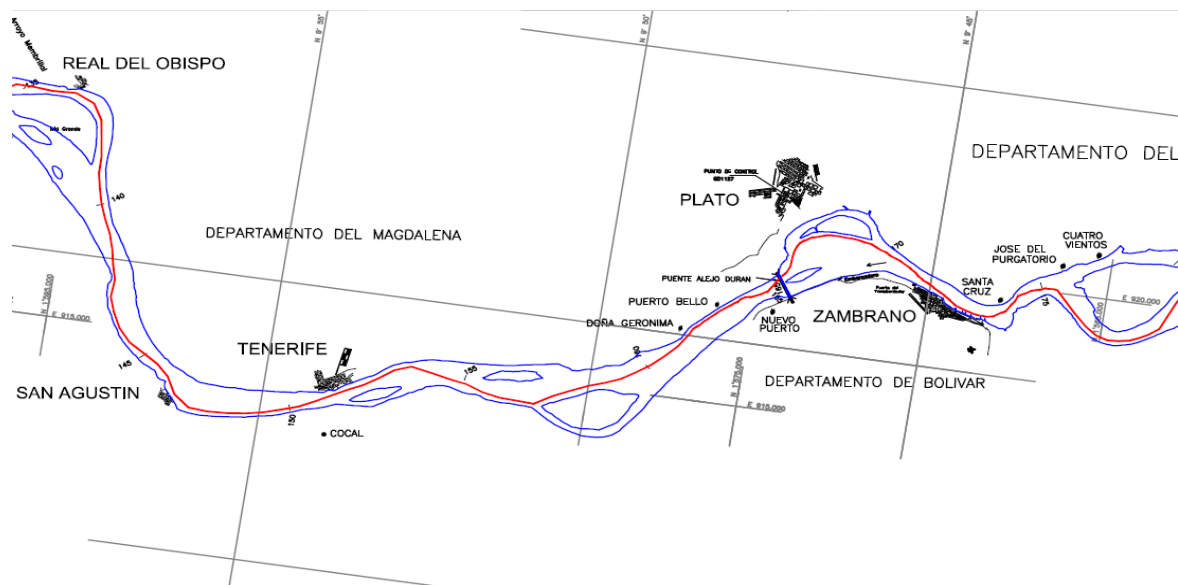
$$\tau_{q(lm)} = \tau_{q(ml)}$$

Ecuación 14

2.4 Modelo de trafico fluvial

De acuerdo a las características de navegabilidad del Río Magdalena, este puede ser visto como una vía terrestre de doble calzada, de forma tal que, el modelo terrestre desarrollado, es aplicable al modelo fluvial. La figura 2.4 muestra un sector típico de tránsito de las embarcaciones por el Río Magdalena

Figura 2-4: Detalle de batimetría plano 12 c3 sector Magangué – Calamar –



Fuente: Cormagdalena 2014

3 Estimación de factores de actividad

El cálculo de las emisiones requiere recopilar la información necesaria para estimar:

- El factor de actividad por cada uno de los vehículos y modo de transporte
 - km/año – para el caso de los camiones-
 - t/año - para el caso de los remolcadores y trenes
- El número de vehículos en el trayecto de análisis
- La segmentación por año modelo, marca, tamaño del motor, y kilometraje recorrido
- La velocidad promedio en el trayecto
- El consumo de combustible

En el modo de transporte carretero, la información de los flujos de tráfico se obtuvo de: Cartilla de volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías – 2011. Que contiene la información del tráfico promedio diario en todas las vías del país, junto con la estadística correspondiente y en donde se identificaron las estaciones de conteo que corresponden al trazado de la ruta del sol.

Estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles en el tramo vial Bogotá-Facatativá (Cundinamarca) – Universidad Nacional de Colombia 2013 – donde se estableció la edad promedio y el kilometraje de los vehículos – principalmente automóviles que circulan por el primer tramo de la Ruta del Sol

Estudio de Transito, Capacidad y Niveles de servicio – Diseños de las obras necesarios para la construcción del proyecto ruta del sol sector n° 1 Villeta – Guaduro – El Koran, donde se encuentra la información de

- Matriz origen destino de los vehículos en el primer sector
 - Conteos de tráfico semanales

- Volumen de tráfico en ambos sentidos
 - Composición de la flota vehicular: Autos, Camiones, Buses, Taxis
 - Discriminación de la flota de camiones por: año modelo, tipo de camión, tipo de carga, marca de camión

Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones – Universidad Nacional Sede Medellín- este documento contiene la información de consumo de combustible para vehículos de carga tipo C5 – S3 y tipo C3, que son los más comunes en la Ruta.

Para el modo de transporte fluvial la información de los flujos de tráfico se obtuvo de:

Exact Earth proporcionó los datos de tráfico de los remolcadores y barcazas en el Rio, durante el mes de Julio de 2016,

Estudio de demanda del sistema fluvial del Rio Magdalena y evaluación beneficio costo de un esquema de reactivación de la navegación fluvial – Cormagdalena – Steer Davies Gleave que contiene las matrices origen destino de la carga actual en el Rio Magdalena, al igual que los estimados de carga y puntos de reactivación de puertos y terminales.

Finalmente, en el modo de transporte férreo, la información de los flujos de tráfico se obtuvo de:

- Datos públicos de la ANI, sobre la reactivación del ferrocarril central y la prueba de operación realizada en octubre de 2016
- Entrevistas realizadas al personal del Ministerio de Transporte y al presidente de Holdtrade Atlantico

En cada uno de los modos de transporte se detalla a continuación la información disponible para la estimación de las emisiones.

3.1 Modo Carretero

3.1.1 Cartilla de volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías 2011

Periódicamente el Instituto Nacional de Vías, genera la información de tráfico sobre todas las rutas del país; allí se encuentran los volúmenes de tránsito discriminados por Automóviles, Buses y Camiones, estos últimos están divididos de acuerdo a las categorías determinadas por el INVIAS para el pago de peajes. La tabla 3.1 muestra las estaciones de conteo establecidas dentro de la ruta del sol, de acuerdo a las divisiones territoriales del INVIAS.

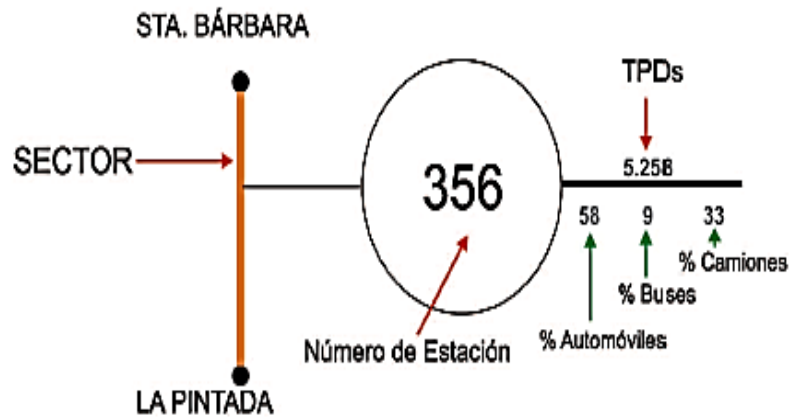
Tabla 3-1: Estaciones de conteo dentro del trazado de la Ruta del Sol – Fuente : INVIAS 2011

Territorial	Estación N°	Sector	Latitud N	Longitud W
Magdalena	560	La gran vía - La Ye	11°00'24"	74°14' 48"
	563	Aracataca - La Gran Vía	10°35'28"	74°11'06"
	1213	Variante de Aracataca - La Gran Vía	10°35'20"	74°10'06"
	564	Fundación - Aracataca	10°31'02"	74°11'32"
Cesar	566	Si Dios Quiere - Fundación	10°18'0"	74°3'0"
	571	Bosconia - Si Dios Quiere	9°58'34"	73°53'25"
	695	Cuatro Vientos - Bosconia	9°58'34"	73°53'25"
	625	Cruce La Sierra - Cuatro Vientos	9°22'16"	73°31'58"
	676	San Roque - Cruce la Sierra	9°17'16"	73°30'40"
	595	Pailitas - San Roque	8°57'35"	73°37'30"
	596	El Burro - Pailitas	8°53'00"	73°40'00"
	597	La Mata - El Burro	8°36'31"	73°38'08"
Ocaña	216	Te de Aguachica - La Mata	8°18'24"	73°36'55"
	211	Aguaclara - Aguachica	8°19'4"	73°35'8"
	210	Morrison - Aguaclara	8°04'55"	73°33'11"
	214	San Martin - Morrison	7°59'53"	73°30'39"
Santander	627	San Alberto - San Martin	7°45'33"	73°23'35"
	886	Veinte de Julio - San Alberto	7°38' 46"	73°31'46"
	1140	La Lizama - Veinte de Julio	7°07'10"	73°36'44"

	1113	Puerto Araujo - La Lizama	6°31'03"	74°06'35"
	1159	Puerto Serviez - Puerto Araujo	6°14'02"	74°31'17"
Tolima	738	Puerto Boyacá - Puerto Serviez	5°58'17"	74°34'01"
	1067	Dos Y Medio - Puerto Boyacá	5°56'21"	74°34'14"
	957	Caño Alegre - Dos y Medio	5°56'49"	74°34'6"
	413	La Dorada - Caño Alegre	5°27'14"	74°39'53"
	370	Guarino - Honda	5°20'40"	74°44'07"
		Puerto Bogotá - Honda	5°12'25"	74°44'12"
Cundinamarca	48	Villeta – Puerto Bogotá	5°12'00"	74°44'00"

Cada una de estas estaciones trae la información simplificada del tráfico que circula por el sector de análisis, la figura 3.1 muestra la información contenida en cada uno de los puntos.

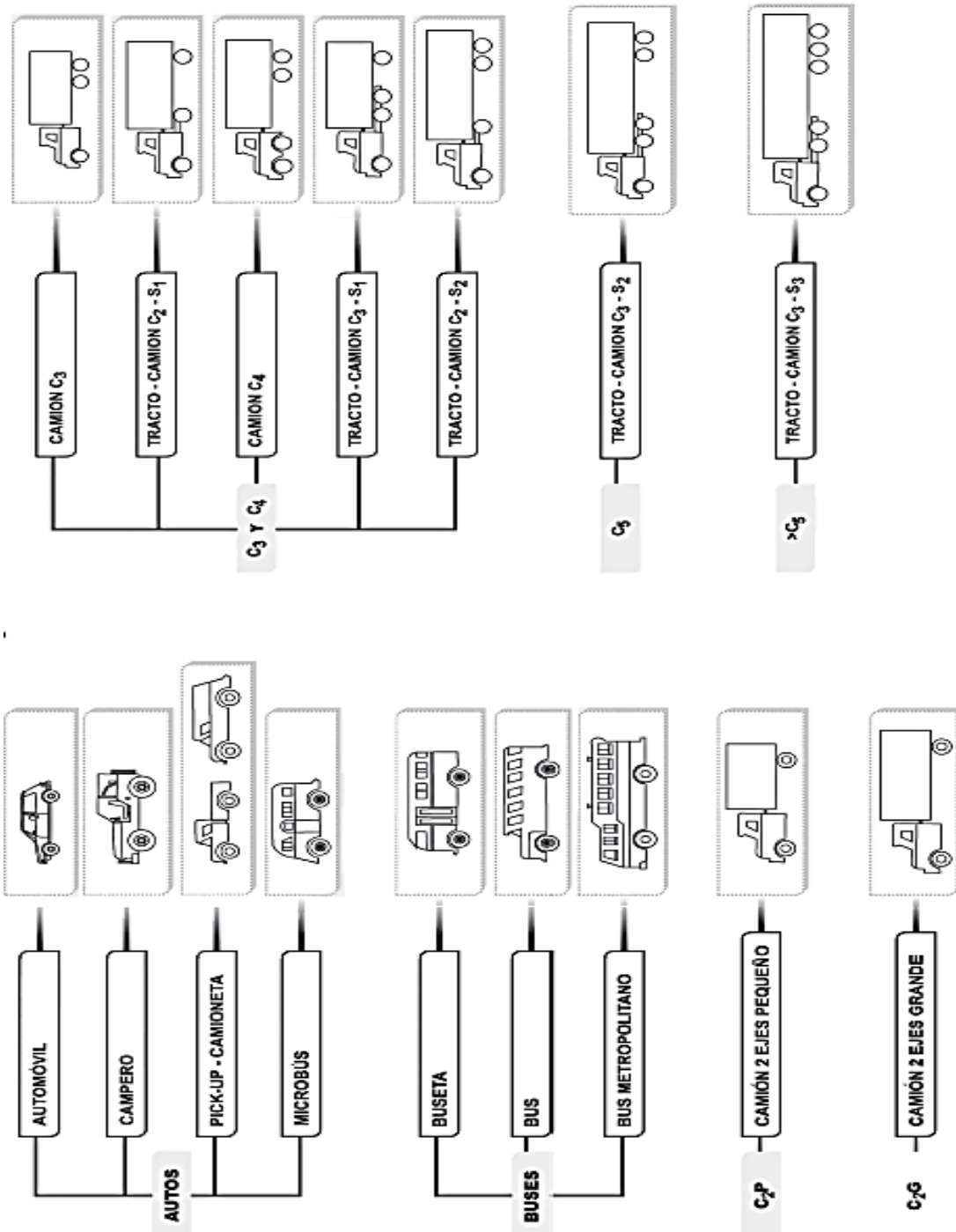
Figura 3-1: Esquema de información sobre los mapas de la vía –



Fuente: Invías 2011

Este volumen de tráfico trae la información del Tráfico Promedio Diario – TPD, el cual corresponde al punto de mayor volumen de vehículos, establecido durante las campañas de conteo anuales que realiza el INVIAS para control y estadística del tráfico, dicha información está dividida de acuerdo a las categorías vehiculares del Ministerio de Transporte, las cuales se muestran en la figura 3.2.

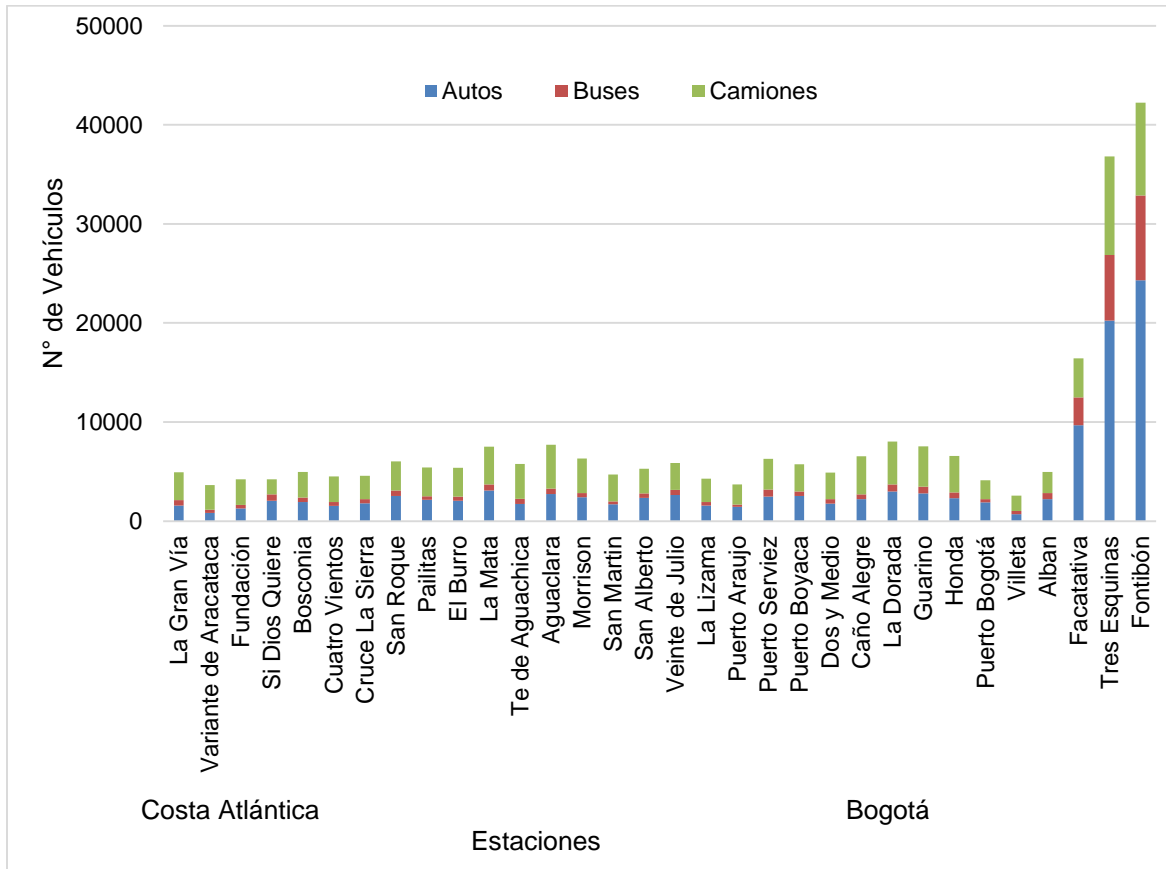
Figura 3-2: Definición de categorías de vehículos para los datos de tráfico promedio diario.



Fuente INVIAS

El volumen de tráfico promedio diario vehicular para el año 2011 por estaciones de conteo, se muestra en la figura 3.3.

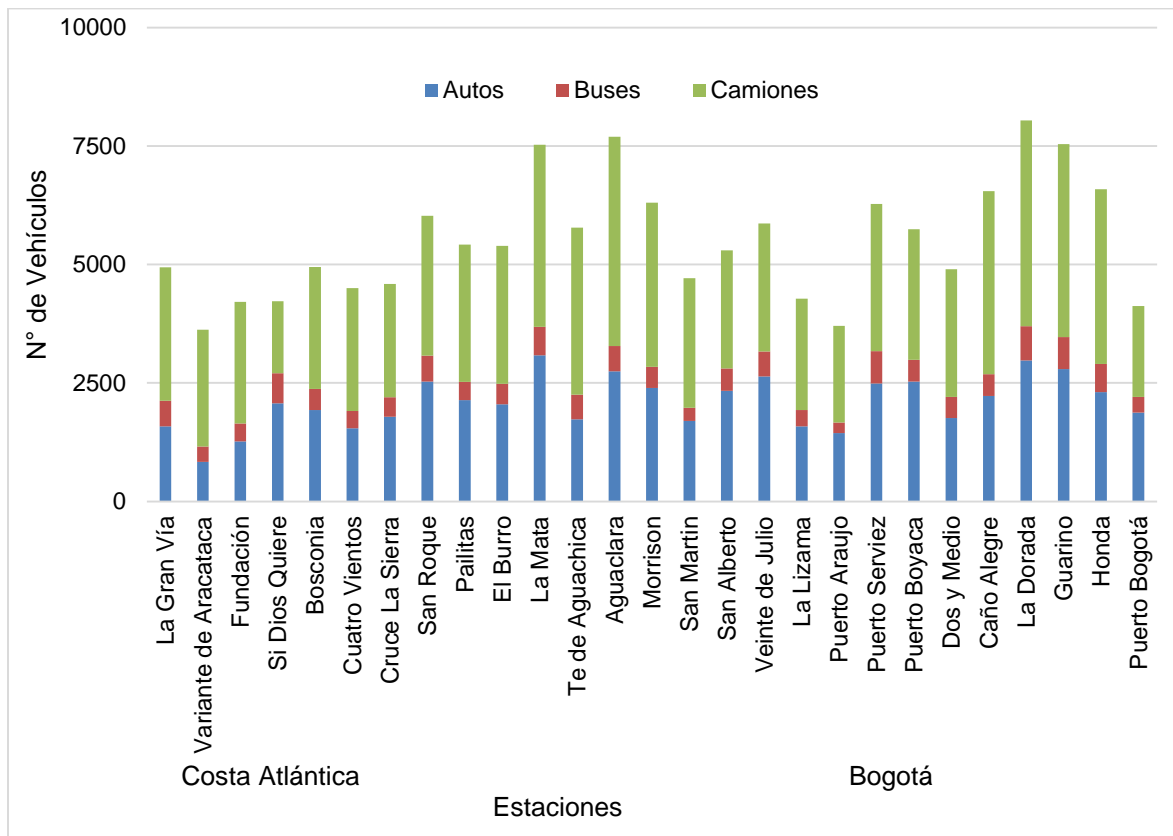
Figura 3-3: Trafico Promedio Diario 2011.



Fuente: El Autor a partir de los datos de INVIAS 2011

De estos datos se puede apreciar que las estaciones cercanas a Bogotá tienen un volumen de vehículos mucho mayor que el resto de la ruta, el cual puede asociarse a tráfico regular de la ciudad, por el efecto del desplazamiento de las industrias a los municipios cercanos; lo que algunos autores llaman la gran Bogotá –(ACEVEDO et al. 2009). De acuerdo a las categorías de la gráfica, las tres primeras estaciones cercanas a Bogotá, manejan 12, 18 y 9 veces más tráfico que en el resto de la ruta. A partir de los datos del estudio de tráfico de HELIOS, se ha determinado que el tráfico que efectivamente circula a lo largo de la Ruta del Sol, debe ser considerado a partir de la estación de Puerto Bogotá; la figura 3- 4 muestra el volumen de tráfico por estaciones a considerar en este estudio.

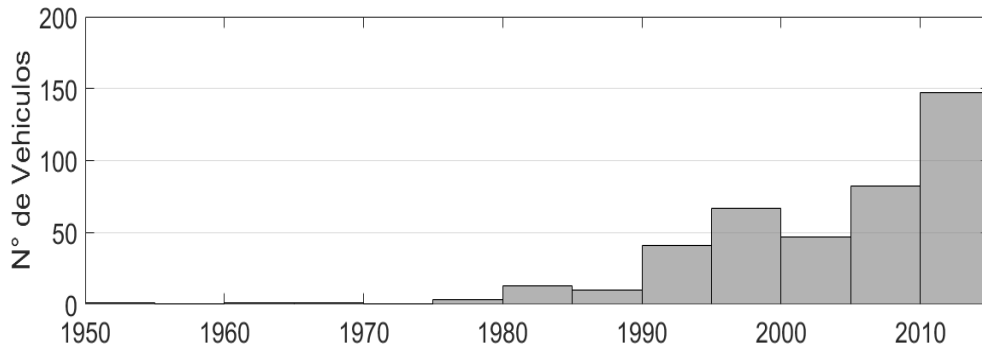
Figura 3-4: Volumen de tráfico vehicular por estaciones consideradas en este estudio



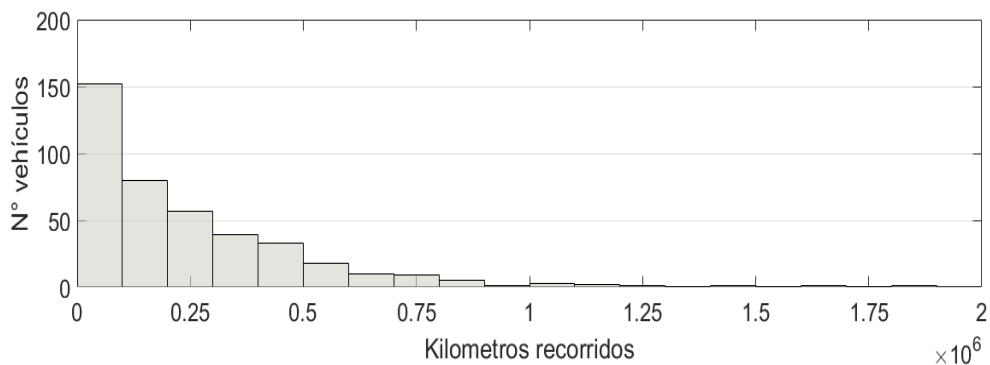
Fuente: El Autor a partir de los datos de INVIAS 2011

3.1.2 •Estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles en el tramo vial Bogotá- Facatativá (Cundinamarca) – Universidad Nacional de Colombia

A partir del estudio en mención, realizado en el año 2013, se determinó la edad promedio de los vehículos en el primer sector de la Ruta del Sol, en el tramo comprendido entre Fontibón y Mosquera, al igual que en los municipios de Villeta y La Vega, este estudio contabilizó los vehículos en circulación por la ruta nacional 50, e indicó que la mayor parte de los vehículos son año modelo 2008 con un kilometraje promedio de 244.000 km

Figura 3-5: histograma de distribución año modelo automóviles ruta del sol –

Fuente UNAL 2013

Figura 3-6: Histograma de distribución kilómetros recorridos automóviles ruta del sol

Fuente UNAL 2013

3.1.3 Estudio de Transito, Capacidad y Niveles de servicio – Diseños de las obras necesarios para la construcción del proyecto ruta del sol sector n° 1 Villeta – Guaduro – El Koran,

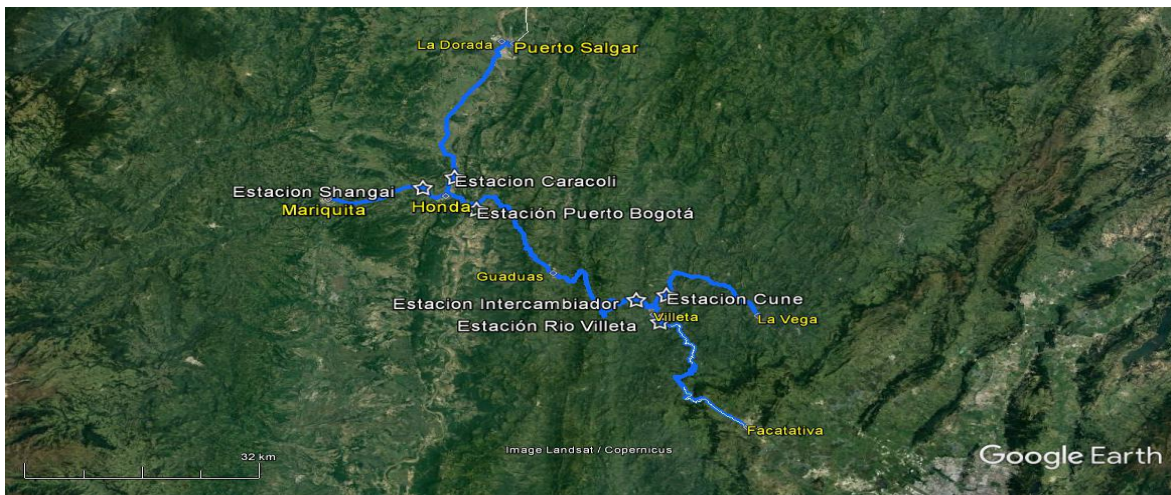
Este estudio realizado para el diseño de la vía Ruta del Sol en el año 2010, contiene la información detallada de tráfico vehicular, que circulaba en ese momento entre Villeta y

Honda, para determinar la capacidad requerida por la vía nueva, en el primer sector de la Ruta del Sol, Para ello se realizaron los aforos vehiculares requeridos en las entradas y salidas de los siguientes municipios

- Estación No 1 CUNE La Vega – Villeta
- Estación No 2 RIO VILLETA Sasaima – Villeta
- Estación No 3 INTERCAMBIADOR Villeta – Guaduas
- Estación No 4 PUERTO BOGOTÁ Guaduas – Honda
- Estación No 5 SHANGAI Mariquita – Honda
- Estación No 6 CARACOLÍ La Dorada – Honda

Dichos aforos se realizaron durante 7 días – 24 horas, en dos épocas diferentes del año, para establecer la variabilidad del tráfico, la figura 3.7 muestra la localización de las estaciones de aforo establecidas entre los municipios de Facatativá – La Vega y Mariquita – Puerto Salgar

Figura 3-7: Estaciones de aforo para el estudio HELIOS



Fuente: Datos Estudio HELIOS – Google Earth

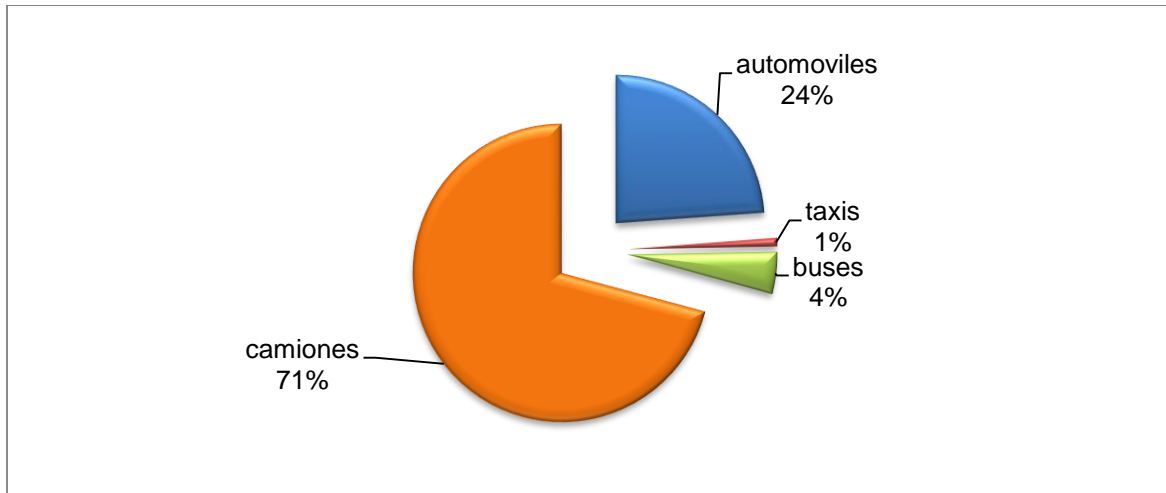
Durante los conteos se realizó una encuesta detallada de las características específicas de los vehículos en circulación por la ruta (Figura 3-8), principalmente camiones, los cuales son los que más ocuparán la vía. La información incluye: la matriz origen- destino en la que se evidencia, que el 80% de los vehículos en circulación por la ruta viajan entre Bogotá

y la Costa Atlántica; (Tabla 3-2 – Figura 3-9) y el tráfico promedio diario (TPD) en ambos sentidos (Figuras 3-10 a 3-15), el cual está distribuido equitativamente; también detalla:

Año modelo de los camiones	Figura 3-16
Tipos de camión	Figura 3-17
Tipo de carga	Figura 3-18
Marca de los camiones	Figura 3-19

A partir de esta información es posible establecer que el 30% de los camiones que circula por la ruta, son tracto camiones, categoría C5 – C5> y que estos son principalmente marca Kenworth; Chevrolet e International. Con estos datos y la edad promedio de los camiones, se puede establecer que, los motores con que están equipados estos vehículos son con regulación de emisiones EPA 98.

Figura 3-8: Composición de la flota vehicular encuestada en el tramo de análisis –

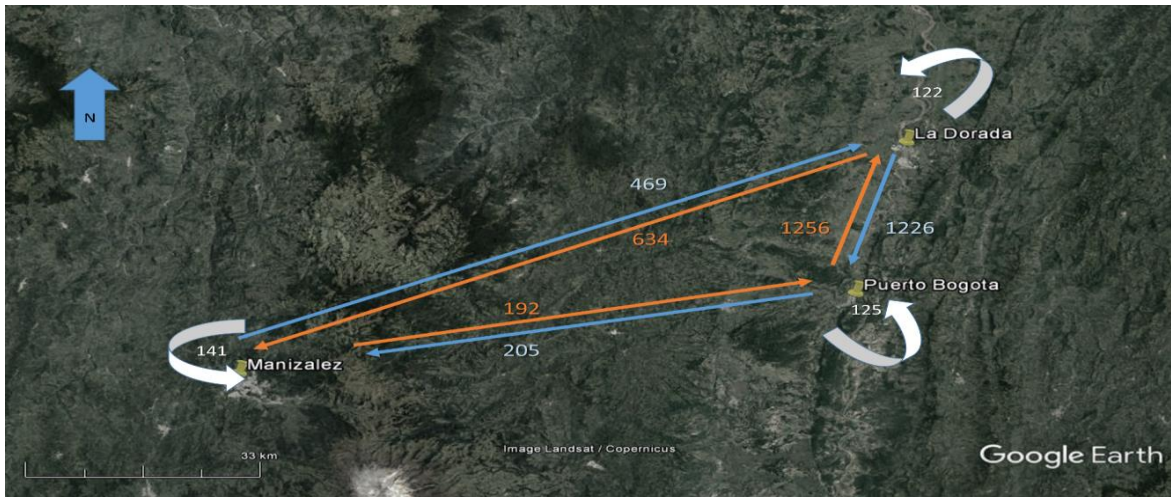


Fuente: Estudio Helios

Tabla 3-2: Matriz origen destino de los vehículos que circulan en el primer sector Ruta del Sol. Fuente; Estudio Helios

	A La Dorada	A Manizales	A Puerto Bogotá	general
De La Dorada	122	634	1226	1982
	6%	32%	62%	100%
De Manizales	469	141	192	802
	58%	17%	24%	100%
De Puerto Bogotá	1256	205	125	1586
	80%	13%	8%	100%

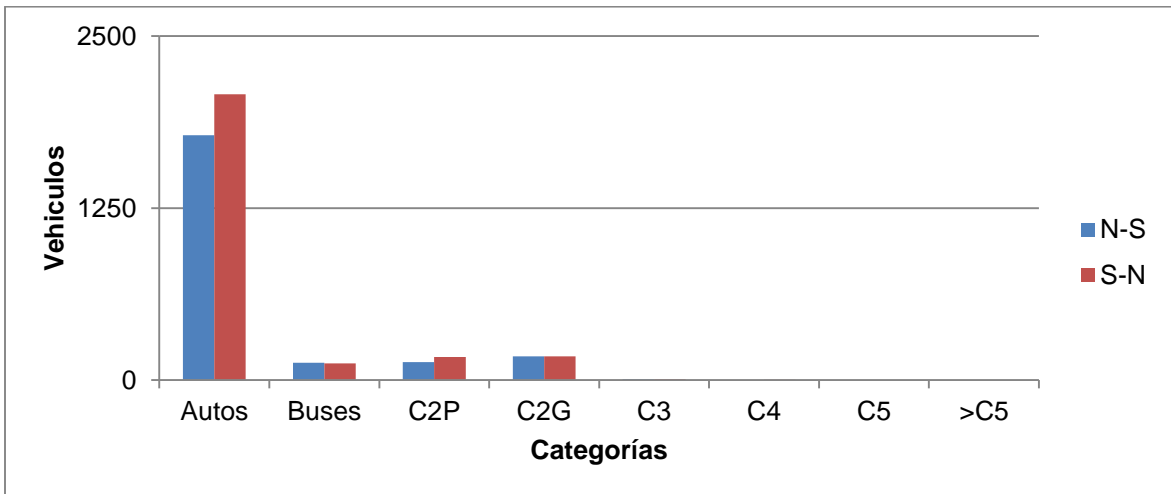
Figura 3-9: Esquema de la matriz origen- destino –



Fuente: Imagen Google Earth – a partir de los datos del Estudio Helios

De estos datos es posible concluir que el 80% del tráfico en estos puntos de información sigue hacia la Costa Atlántica

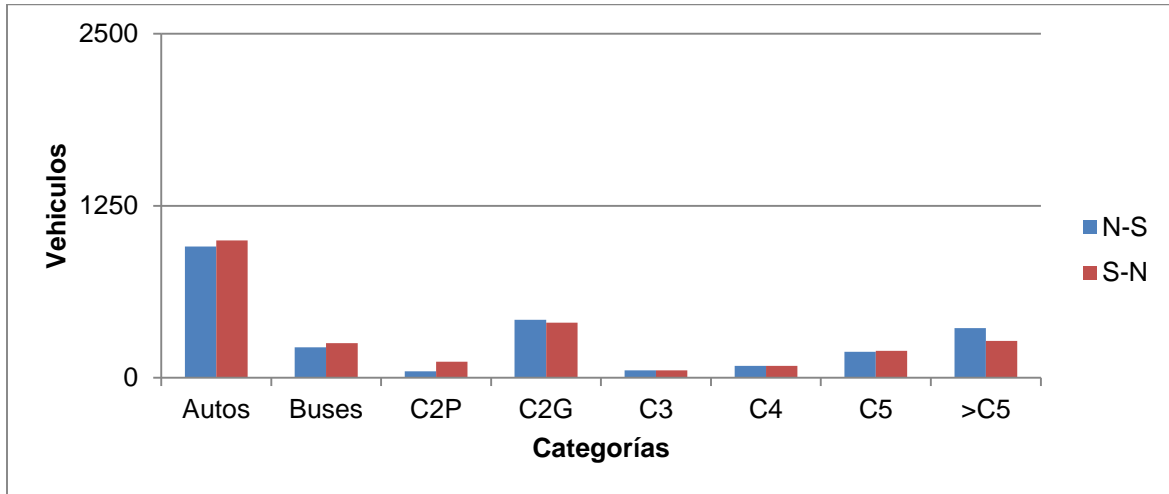
Figura 3-10: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Cune –



Fuente: Estudio Helios

La Estación Cune (La Vega – Villeta) contabiliza el movimiento de los vehículos de Bogotá por la calle 80, y muestra un alto tráfico de autos y pocos camiones, el cual es consistente con la preferencia de los conductores de estos últimos para salir de Bogotá, por la ruta nacional 50 de la calle 13

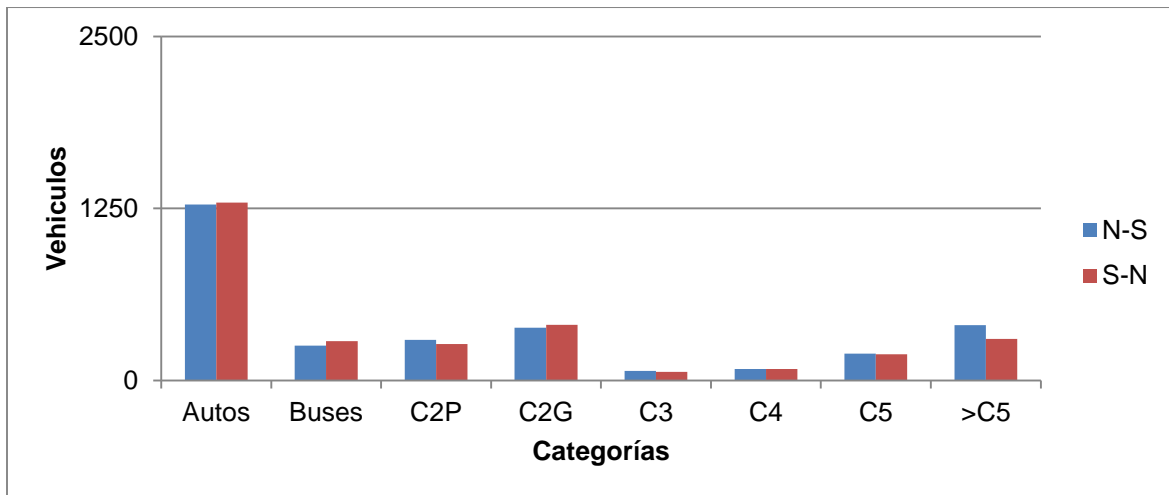
Figura 3-11: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Rio Villeta–



Fuente: Estudio Helios

La Estación Rio Villeta (Sasaima – Villeta), contabiliza el movimiento de los vehículos de Bogotá por la calle 13 y muestra un menor número de automóviles y un mayor número de camiones en especial del tipo C2G, C5 y > C5.

Figura 3-12: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Intercambiador Villeta–

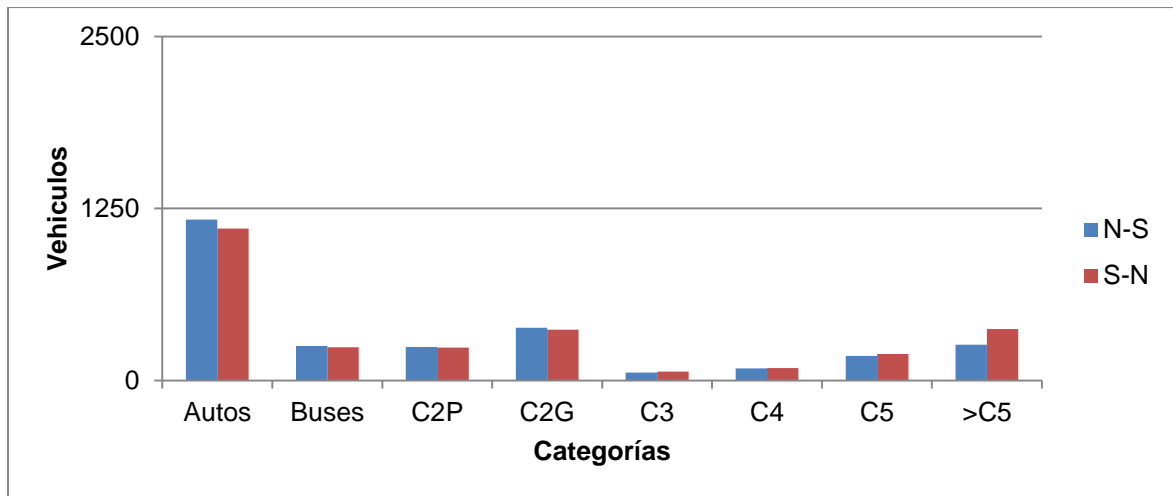


Fuente: Estudio Helios

Esta estación contabiliza el número de vehículos combinados que circulan desde y hacia Bogotá, aquí se puede observar que el número de autos es el promedio de las dos estaciones anteriores y que los camiones son aproximadamente la suma de las dos

estaciones, lo que indica que por la Ruta La Vega – Villeta, un importante porcentaje de vehículos se queda en esta región.

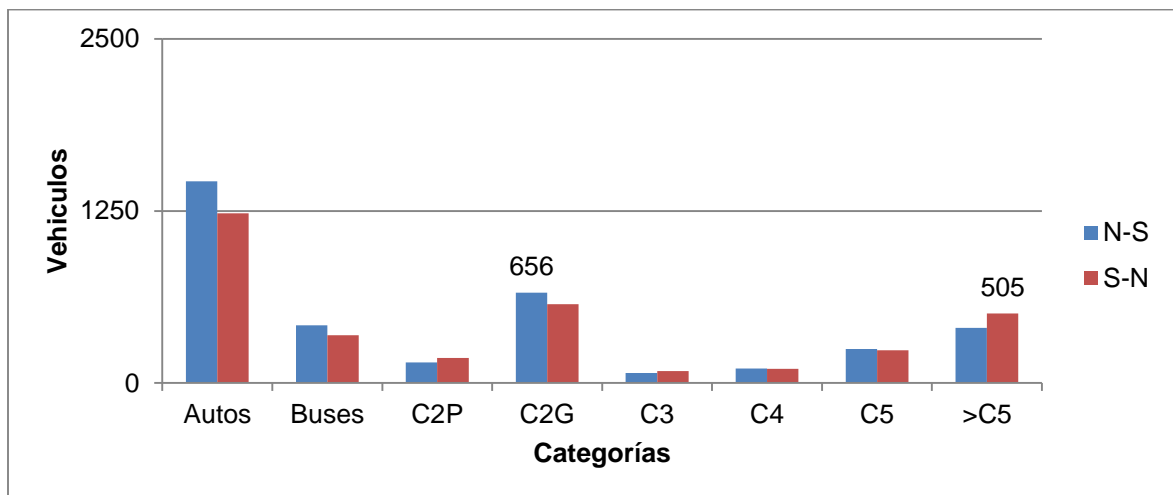
Figura 3-13: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Puerto Bogotá



Fuente: Estudio Helios

Los resultados de esta estación, son similares a la estación Intercambiador, y como es de esperarse la variación es poca debido a que, entre estos dos puntos de conteo, no hay un ningún polo atractor de carga y/o turismo que hagan que los vehículos se desvíen de la ruta

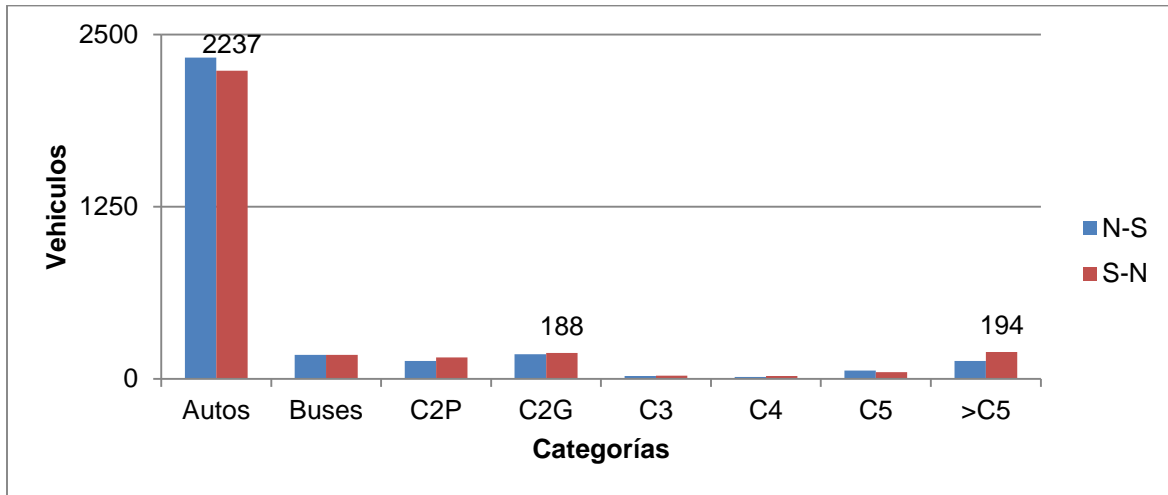
Figura 3-14: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Caracolí-



Fuente: Estudio Helios

Esta estación contabiliza el flujo de vehículos entre La Dorada y Honda, e indica que el flujo de total de camiones es mayor que el número de autos en este tramo, camiones, como es de esperarse dado que deben continuar el tránsito desde y hacia la Costa Atlántica

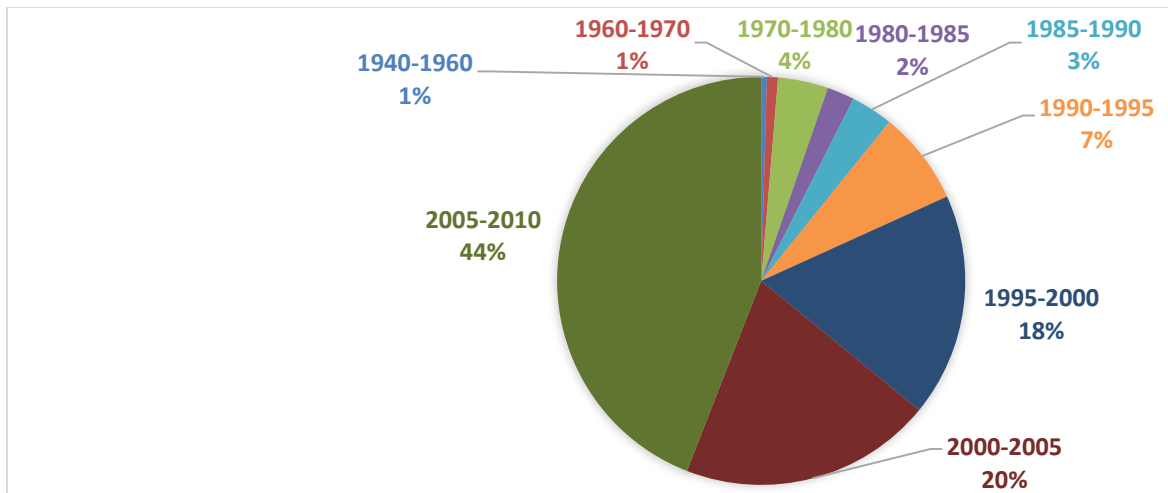
Figura 3-15: Volumen de TPD por sentido estación de conteo Shangai



Fuente: Estudio Helios

La estación Shanghai – Mariquita- Honda, muestra un alto flujo de autos y un bajo flujo de camiones lo cual indica que los viajes realizados son principalmente por motivos diferentes a trabajo y/o transporte de carga. Esta es la conexión a la zona cafetera

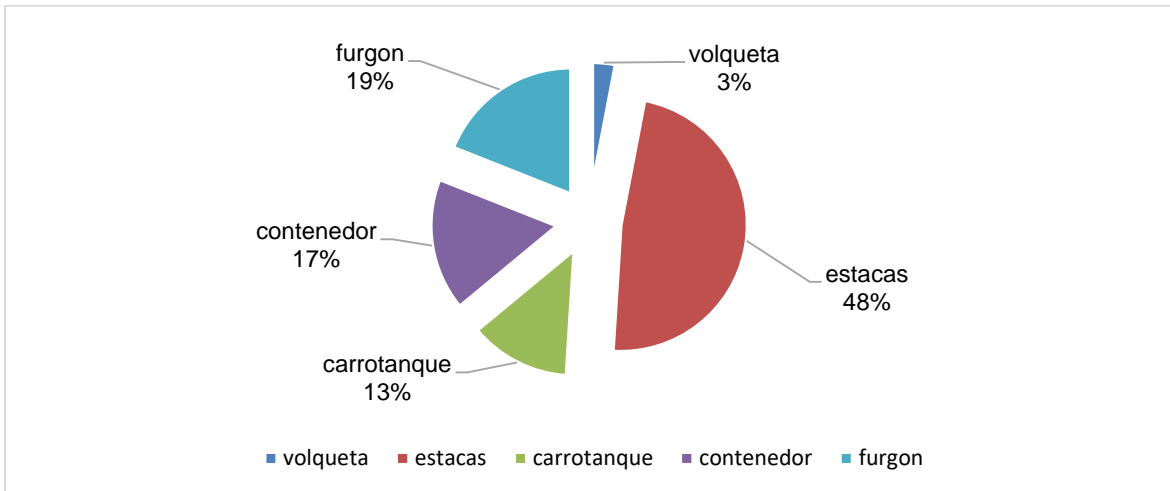
Figura 3-16: Año modelo camiones –



Fuente: Estudio Helios

La mayor proporción de camiones (44%), de acuerdo a esta encuesta son año modelo 2005 a 2010, lo que significa que la flota de camiones, para el momento de este estudio tenía en promedio 2.5 años, seguido por vehículos año modelo 2000 a 205(20%) y vehículos año modelo 1995 – 2000(18%).

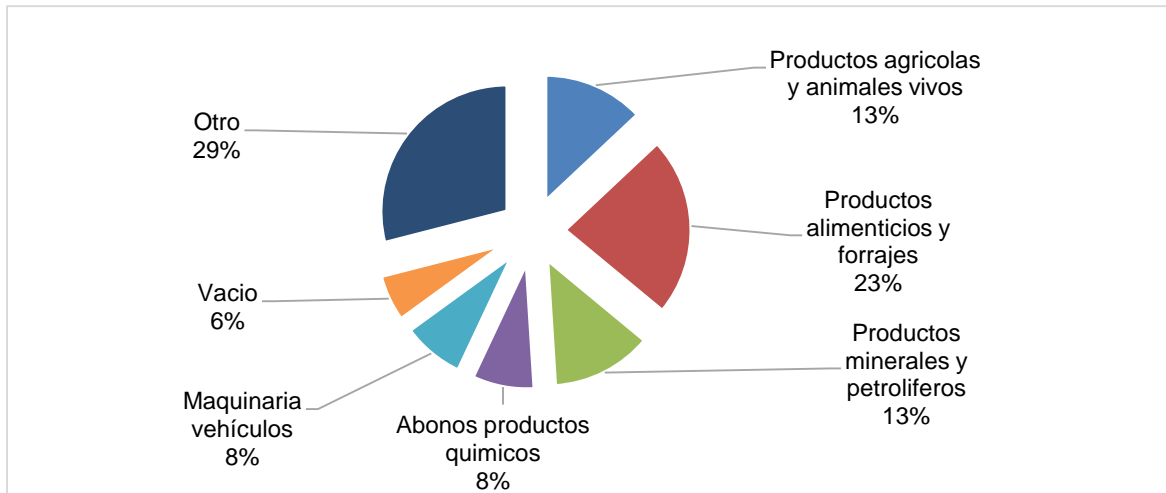
Figura 3-17: Tipos de camión en circulación en el tramo de análisis



Fuente: Estudio Helios

La figura 3-17 que muestra la preferencia de vehículos de carga de tipo estacas (48%), indica que la carga es suelta y mayormente a granel, seguida por el tipo furgón (19%) que se usa para carga delicada, y que puede afectarse por efectos del clima: lluvia, viento, sol, etc., y finalmente los vehículos de tipo contenedor, que son usados para el transporte de mercancías desde y hacia las zonas portuarias.

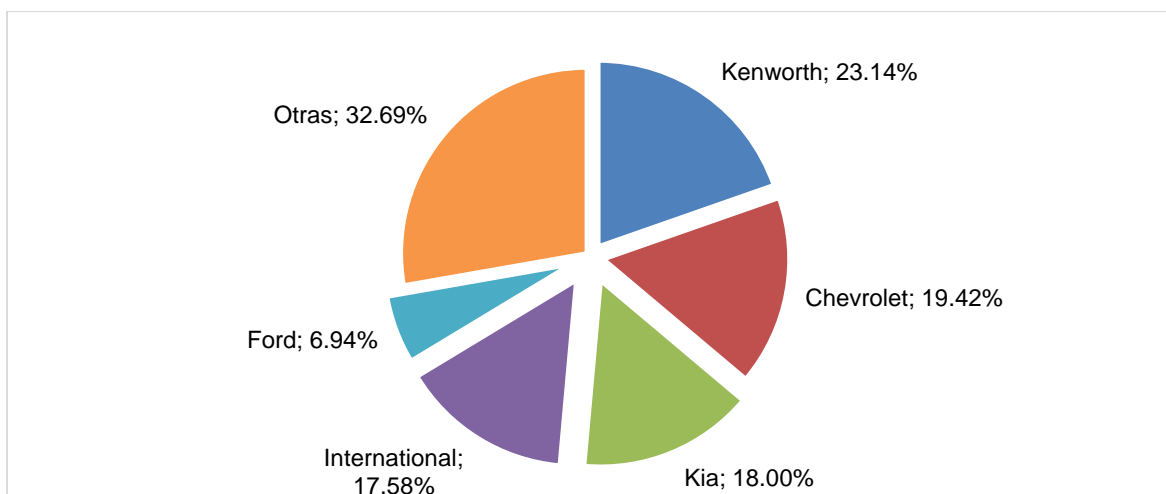
Figura 3-18: Tipo de carga en el tramo de análisis



Fuente: Estudio Helios

La figura 3-18 muestra que los dos tipos de carga principales: Productos agrícolas (13%) y Productos alimenticios (23%) coincide con los tipos de vehículos de estacas, usualmente empleados para este transporte

Figura 3-19: Marcas de camiones en circulación en el tramo de análisis



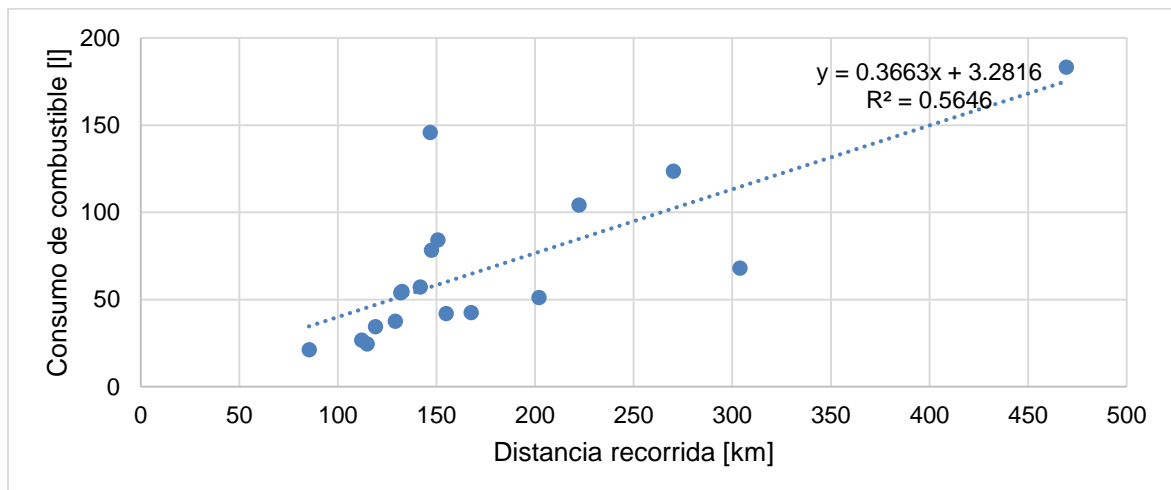
Fuente: Estudio Helios

Esta figura muestra que los dos tipos principales de vehículos clase C5 y > C5 son de marcas International y Kenworth, los cuales típicamente están equipados con motores Cummins del tipo ISX – ISC, categoría de emisiones EPA 98.

3.1.4 Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones

Los datos que se tienen para la estimación del consumo de combustible en camiones para Colombia son bastante irregulares; dependen de: tipo de carga transportada, las condiciones particulares de la ruta, modo de operación del vehículo por parte del conductor, estado mecánico del vehículo, etc. Por medio de encuestas desarrolladas durante el presente trabajo, los valores de consumo que reportan las empresas de carga consultadas, que cubren la ruta Bogotá- Barranquilla, varían entre 0.52 y 0.41 l/km (FL 2015 – LATEC 2015), mientras que los datos obtenidos de la información de viaje de un vehículo tracto camión en la ruta Bogotá – Cartagena, con un dispositivo de captura de datos muestran valores de consumo que varían entre 0.24 y 0.99 l/km sin ninguna tendencia que permita establecer valores de consumo adecuados, la figura 3-20 muestra los datos obtenidos en ruta.

Figura 3-20: Datos de consumo de combustible reportados en tracto camión en la ruta Bogotá- Cartagena



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de GPS

Por otro lado, la UPME, en su informe de proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia, (2010) reporta que para los tractocamiones el consumo promedio está en 0,43 l/km; de tal forma que elegir un valor promedio de consumo a partir de la información recolectada no es viable, debido a las incertidumbres en la obtención de los datos.

La Universidad Nacional sede Medellín, realizó una investigación (POSADA 2012), para establecer el consumo de combustible en vehículos de carga, en diferentes condiciones de pendiente en vías de Colombia; este estudio empleó dos tipos de vehículos típicos empleados para el transporte de carga: un tractocamión categoría C5- S3, y un dobletrque categoría C3, en configuraciones de 0%, 50% y 100% carga. Esta investigación fue realizada con el rigor científico requerido para poder obtener datos adecuados que reflejen el consumo real de un vehículo de carga dentro de una operación típica.

Los valores de combustible obtenidos en dicho estudio y que serán usados en el presente trabajo son (Sólo serán considerados los valores de 0% y 100% de carga, dado que los resultados de las encuestas muestran que estas son las configuraciones de carga típica):

Tabla 3-3: Consumo de combustible para vehículo C3 S3 en condiciones de vacío.

peso [t]	pendiente [%]	velocidad [km/h]	ml/km
19,09	0,6	40	202,8
		60	196,1
	2	25	249,1
		30	247,7
		35	239,5
		40	288,7
		60	294,8
	5,2	25	781,5
		30	761,0
		35	776,4
	7	25	794,7
		30	827,9
		35	846,2

Fuente: POSADA 2012

Tabla 3-4: Consumo de combustible para vehículo C3 S3 en condiciones de 100% de carga

peso [t]	pendiente [%]	velocidad [km/h]	ml/km
50	0,6	40	455,9
		60	513,9
	2	25	609,9
		30	674,8
		35	621,7
		40	662,8
		60	726,6
	5,2	25	2211,8
		30	2165,1
		35	2114,1
	7	25	2216,7
		30	2296,5
		35	2234,7

Fuente: POSADA 2012

Tabla 3-5: Consumo de combustible para vehículo C3 en condiciones de vacío

peso [t]	pendiente [%]	velocidad [km/h]	ml/km
11,72	0,6	40	202,7
		60	214,3
	2	25	265,4
		30	251,2
		35	215,5
		40	285,2
		60	299,1
	5,2	25	609,8
		30	551,1
		35	608,2
	7	25	652,9
		30	581,6
		35	592,7

Fuente: POSADA 2012

Tabla 3-6: Consumo de combustible para vehículo C3 en condiciones de 100% de carga

peso [t]	pendiente [%]	velocidad [km/h]	ml/km
27,99	0,6	40	342,0
		60	304,1
	2	25	573,9
		30	549,7
		35	506,0
		40	574,0
		60	608,1
	5,2	25	1371,9
		30	1284,3
		35	1244,4
	7	25	1369,6
		30	1329,2
		35	1272,9

Fuente: POSADA 2012

A partir de esta información, se podrá realizar las estimaciones adecuadas requeridas por los modelos de estimación de emisiones para tráfico terrestre

3.2 Modo Fluvial

La información del tráfico actual detallado sobre el Río Magdalena es escasa, debido a que los operadores del río como: Impala,, Naviera Fluvial Colombiana, Flota Fluvial Carbonera, entre otros, consideran estos datos como confidenciales, por ello a través de la empresa Exact Earth, se obtuvieron los datos del tráfico de las motonaves en circulación entre La Dorada y Cartagena durante el mes de julio de 2016; estos datos contienen la información de posición, velocidad y orientación de todas las motonaves que navegan en el Río.

Tabla 3-7: Ejemplo de datos de navegación de un remolcador sobre el Río Magdalena.

mmsi	imo	vessel_name	callsign	vessel_type	vessel_class	length
730151136	9536507	ALISIOS	HKJF5	Tugs	A	30
width	flag_country	destination	eta	draught	longitude	latitude
10	Colombia (Republic of)	CARTAGENA	20251000	45	-7,5515E+11	1,03797E+11
sog	cog	rot	heading	nav_status	ts_pos_utc	ts_static_utc
0.0	286.0	0.0	6.0	Under way using engine	20160701_002038	20160701_004852

Fuente: Exact Earth

De estos datos, se hará la identificación de las características de navegación de los remolcadores usando los datos de:

- Latitud – longitud para determinar la posición de la embarcación
- sog (speed over ground)– Velocidad de la embarcación
- cog (course over ground to next waypoint) – Curso de la embarcación
- nav_status – Condición de navegación de la embarcación
- ts_pos_utc – Fecha y hora tiempo universal

3.2.1 Características de las embarcaciones

A partir de informaciones públicas sobre la navegabilidad del Río Magdalena, se ha podido establecer que las configuraciones típicas de los remolcadores son como se muestran en la tabla 3.8 y la figura 3-21

Tabla 3-8: Características típicas de los remolcadores en el Río Magdalena

Constructor	Scheepswerf De Kaap - Holanda	
	KP3400 Remolcador	KP1250 Remolcador
Serie de Embarcación	Colombia	
Bandera	Colombia	
Especificaciones Técnicas		
Longitud [m]	33,7	29,5
Ancho [m]	11,2	29,22
Profundidad [m]	2,76	2,76
Calado de diseño [m]	1,8	1,7
Peso total [t]	340	
Velocidad [nudos] @100% empuje	8	
Cuando empuja un convoy de barcazas de 2 de ancho x 3 de largo en agua profunda		
Barcaza LxBxT [m]	60x16x1,85	
Desplazamiento del convoy [t]	10656	
Motor Principal		
Fabricante	Caterpillar	
Modelo	3512C DITA	C32 ACERT TTA
Cantidad	3	2
Tipo de combustible	Diésel	Diésel
Potencia [bhp]	1500	850
Revoluciones [rpm]	1600	1800
Consumo de combustible [l/hr]	269,2	163,1
Auxiliares		
Fabricante	Caterpillar	
Cantidad	2	
Tipo	C 6.6 ACERT DITA	C .4.4 DITA
Potencia / salida	143 bkW/1800 rpm	80 bkW/1600 RM

Fuente: Thecla Bodewes Shipyards

La configuración de estos remolcadores está diseñada específicamente para las condiciones del Río Magdalena, en especial el calado, por la poca profundidad que tiene el Río en algunos sectores.

A partir de esta información técnica, en especial de la configuración de los motores se realizarán las estimaciones de consumo de combustible.

Figura 3-21: Remolcador típico en el Rio Magdalena

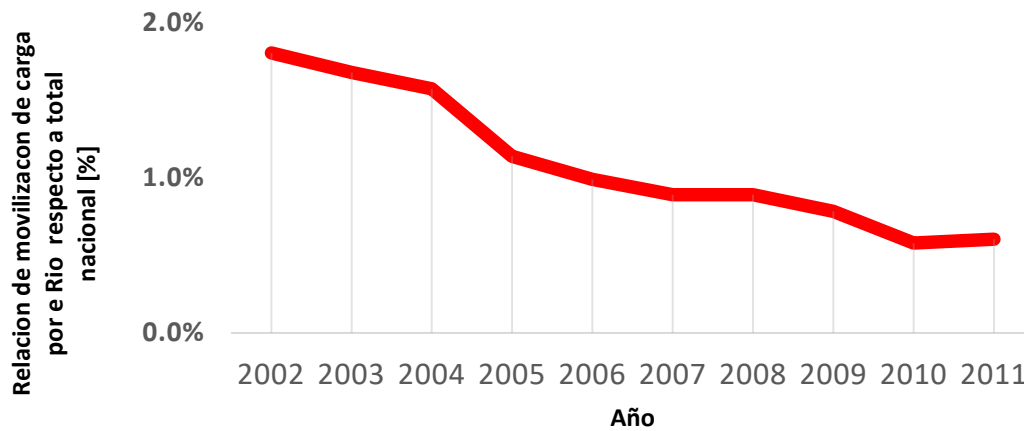


Fuente: www.vanguardia.com

3.2.2 Estudio de demanda del sistema fluvial del Rio Magdalena y evaluación beneficio costo de un esquema de reactivación de la navegación fluvial – Cormagdalena – Steer Davies Gleave 2014

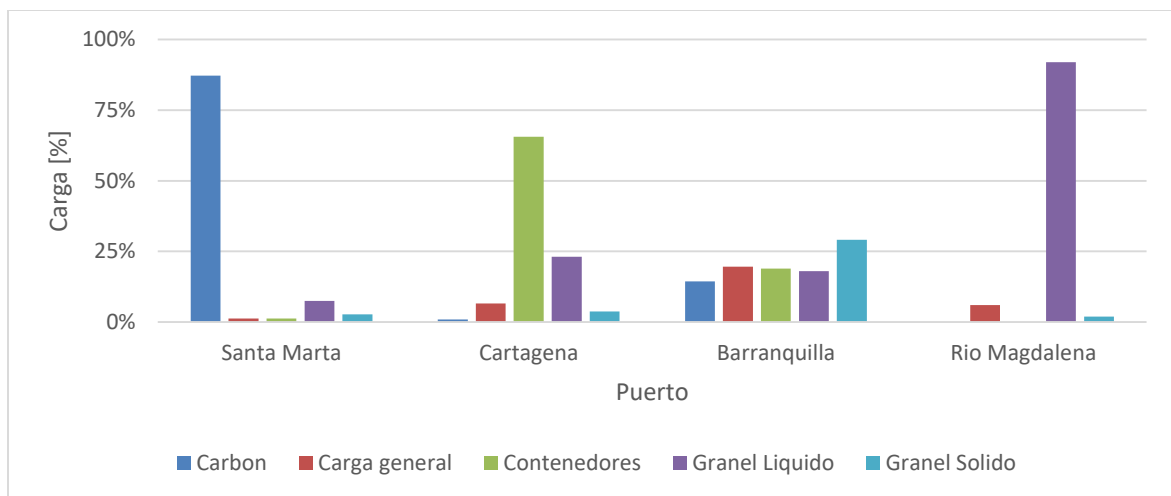
En 2014 la consultora Steer Davies Gleave realizó para Cormagdalena, el estudio de demanda del Rio Magdalena; en este se detallan los datos de uso del Rio, como vía para el transporte de carga; al igual que la información detallada de cuáles son los principales generadores / consumidores de carga en la orilla del Rio y los puntos cercanos al Rio (a una distancia promedio de 200 km). En este documento se establece que la capacidad de carga del Rio es de 500 MM de toneladas al año, y actualmente solo transporta cerca de 2MM toneladas al año. Esto obedece a que solo se usa para grandes volúmenes de carga no perecedera, principalmente hidrocarburos. El porcentaje de participación de la carga movilizada por el Rio, frente al porcentaje nacional, aunque es constante en el tiempo, por los efectos de crecimiento de la economía, se viene reduciendo desde el año 2002 – Figura 3-22

Figura 3-22: Porcentaje de movilización de carga por el Río Magdalena con respecto al porcentaje nacional



Fuente : Cormagdalena

Figura 3-23: Distribución de la carga por puertos en el área de influencia del Río Magdalena



Fuente: Steer Davies Gleave

El documento contiene las proyecciones de demanda de carga en el corto y mediano plazo, una vez que la navegación del Río sea ampliada hasta Puerto Salgar. Esta ampliación haría que la participación actual del Río como opción para el transporte de mercancías se duplique con respecto a los niveles actuales hacia el 10° año de operación después de finalizada la rehabilitación hasta Puerto Salgar.

Tabla 3-9: Principales orígenes y destinos de carga con potencial de movilización vía fluvial 2011 (ton) –

O/D	PUERTO SALGAR/DORADA	PUERTO BERRÍO	BARRANCA BERMEJA	GAMARRA	BARRANQUILLA	CARTAGENA	TOTAL
PUERTO SALGAR/DORADA	0	0	0	0	228.779	996.268	1.225.047
PUERTO BERRÍO	0	0	0	0	38.100	380.915	419.015
BARRANCABERMEJA	0	0	0	0	1.033.246	1.938.065	2.971.311
GAMARRA	0	0	0	0	118.542	0	118.542
BARRANQUILLA	1.463.493	555.452	403.712	0	0	0	2.422.658
CARTAGENA	2.049.977	909.359	50.153	0	0	0	3.009.489
TOTAL	3.513.471	1.464.811	453.865		1.418.667	3.315.248	10.166.061

Fuente: Cormagdalena 2014

3.3 Modo Férreo

El ferrocarril central, el cual cubre la ruta: Bogotá- La Dorada – Chiriguana – Santa Marta se encuentra abandonado hace cerca de 30 años, hasta Chiriguana (CCI 2012). En el año 2014 la ANI inició su rehabilitación, y en octubre del año 2016 se hizo un viaje de prueba entre el Puerto de Santa Marta y La Dorada, usando la configuración típica que podría llegar a emplearse.

Como el uso del ferrocarril central es hasta la fecha, un proyecto para ser concesionado, la información detallada a la fecha son únicamente proyecciones, y solo a través de entrevistas realizadas tanto a Holding Atlántico (que es el principal interesado en ser el concesionario de la vía), como al Ministerio de Transporte, se ha determinado que los terminales férreos donde se podría generar carga y pasajeros son los que se encuentran en la tabla 3.10

Tabla 3-10: Terminales férreos del ferrocarril central

TRAMOS DEL FERROCARRIL CENTRAL	LONGITUD DEL TRAMO [KM]
SPSM - CHIRIGUANA	247
CHIRIGUANA -GAMARRA	119
GAMARRA - SAN RAFAEL	88
SAN RAFAEL - GRECIA	189
GRECIA - LA DORADA	126

Fuente: ANI

Las locomotoras que serían empleadas en esta vía son: (Tabla 3-11):

Tabla 3-11: Características técnicas locomotora PR22L –

Motor	Caterpillar 3512C-HD
Estándar de emisiones	EU etapa IIIA
Potencia neta	2200 BHP
Configuración de ejes	C-C
Motores de tracción	D43
Freno de aire	26L/CCB26
Esfuerzo dinámico de frenado	180kN
Esfuerzo de tracción en el arranque (nominal)	350kN
Esfuerzo continuo de tracción	296kN
Rango de carga de ejes	15.75 - 18
Nominal	94.5
Ancho nominal	Trocha angosta

Fuente: Caterpillar 2016

Mintransporte estima que, dentro de condiciones adecuadas de desarrollo del Ferrocarril central, al final del primer año de operación transportarían 500.000 toneladas y que en un lapso de 10 años alcanzarían los 5 MM de toneladas

4 Estimación de factores de emisión

4.1 Características de los combustibles en Colombia y factores de emisión

Para estimar los factores de emisión de los combustibles comercializados en Colombia se debe tener en cuenta las características específicas del diésel y la gasolina. En las tablas 4-1 y 4-2 se observan estas características:

Tabla 4-1: Propiedades de la gasolina comercializada en Colombia –

PROPIEDADES GASOLINA	UNIDAD	CORRIENTE		EXTRA		
		Básica HDT	Oxigenada.	Básica HDT	Oxigenada.	
		Dic. -10	dic-10	Dic. -10	dic-10	
Azufre	%Masa	0,03	0,027	0,03	0,027	
RVP	PSIg	8	9,3	8	9,3	
IAD(RON+MON/2)	Octano	81	84	87	89	
Aromáticos	%Vol.	28	25	35	31,5	
Benceno	%Vol.	1	0,9	2	1,8	
Etanol	%Vol.	10	10	
Contenido Agua	%Vol.	0,2	0,2	
Curva de Destilación D86	T10	°C	Max 70	Max 70	Max 70	Max 70
	T50	°C	Min 77	Min 77	Min 77	Min 77
			Max 121	Max 121	Max 121	Max 121
	T90	°C	Max 190	Max 190	Max 190	Max 190
	PFE	°C	Max 225	Max 225	Max 225	Max 225

Fuente :Ecopetrol 2015

Tabla 4-2: Propiedades del diésel comercializado en Colombia –

PROPIEDADES DIESEL	UNIDAD	CORRIENTE	EXTRA
		ene-13	ene-10
Azúfre	%Masa	0,005	0,005
Número Cetano	Cetano	43	45
Biodiesel	%Vol.	5	5,0 ^{Nota 1}
Aromáticos	%Vol.	35	35
Viscosidad(40°C)	mm2/seg	1,9-5,0	1,9-4,1
Punto fluidez	°C	3	3
Punto Inflamación	°C	52	52
Lubricidad	µm	450	450
Estabilidad Térmica	%Reflect.	70/90 min	70/90 min
Destilación D86	T95	°C	Min 282
	PFE	°C	Máx. 360
		390

Fuente: Ecopetrol 2015

Para los modos fluvial y férreo, en los cuales la información disponible no es detallada, deben tenerse en cuenta las propiedades y los factores de emisión para los combustibles colombianos, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4-3: Factores de emisión para los combustibles colombianos –

Factores de emisión	Combustible	
	Diésel B2	Gasolina E10
Poderes caloríficos		
HHV[MJ /kg]	45,275	43,254
LHV[MJ /kg]	42,419	40,659
Factor de emisión CO2: [kg CO2 / TJ]	74.193	66778,409
Factor de emisión CO2(unidades físicas) [kg CO2/gal]	10,149	7,618

Fuente: INCOMBUSTION (2016)

Las características específicas de los combustibles colombianos, influyen de forma importante la selección del modelo de emisiones a usar.

4.2 Modelo de emisiones – modo terrestre

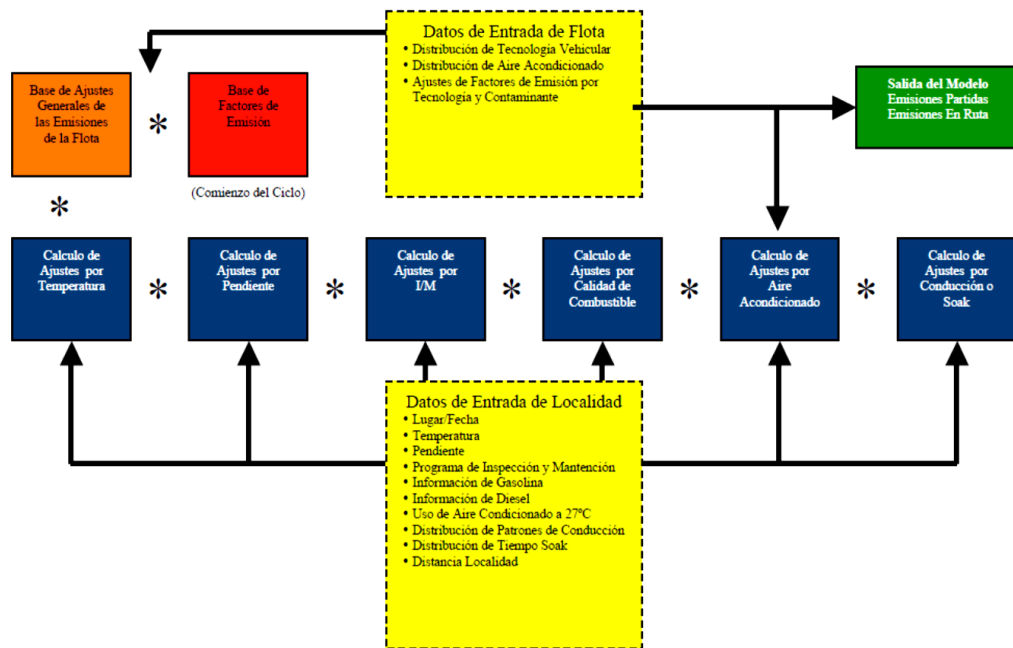
A partir de los valores de calidad de combustibles reportados por Ecopetrol (ICP 2015), se evaluaron los dos modelos más usados en Colombia para la estimación de emisiones: el

modelo IVE y el modelo Copert 4. A continuación se describe brevemente cada uno de los modelos, los insumos que requieren y los resultados que se obtienen.

4.2.1 Modelo IVE

El modelo Internacional de Emisiones Vehiculares IVE , es un modelo desarrollado por la Universidad de California Riverside, y patrocinado por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos, y está diseñado para ser empleado en países en desarrollo, donde los recursos requeridos para controlar y estimar las emisiones vehiculares no están suficientemente establecidos, de tal forma que, a partir de datos simples es posible desarrollar un inventario de emisiones de fuentes móviles. La figura 4-1 muestra el esquema del modelo IVE

Figura 4-1: Esquema del modelo IVE



Las evaluaciones de las opciones para la introducción de las características del combustible muestran que el modelo IVE tiene limitaciones para poder introducir los valores del combustible, es decir solo ofrece opciones fijas, un ejemplo de esta limitación está en el contenido de azufre de la gasolina comercializada en Colombia, que tiene un

valor 270 ppm, y este valor no es posible de aplicar en el modelo IVE, la tabla 4-4 muestra esta limitación

Tabla 4-4: variaciones posibles para el contenido de azufre en la gasolina modelo IVE.

Azufre	ppm
Superbajo	15
Bajo	50
Moderado	300
Alto	600

Fuente: IVE

La figura 4.1 muestra las opciones de variación de parámetros en el modelo IVE para el caso de gasolina, es de anotar que el modelo no permite valores intermedios en los rangos especificados.

Figura 4-2: Pantalla del modelo IVE – variación de parámetros de gasolina

Azufre

- Super bajo 15ppm
- Bajo 50 ppm
- Moderada 300 ppm
- Alto 600 ppm

Condicion combustible

- Moderada premezclada
- Limpia premezclada
- Moderada/no premezclada
- Limpia/ no premezclada

International Vehicle Emissions Model

Location: Bogota2005, Fleet: Euro/Track ICP, Altitude: 2600.0 meters

Fuel Characteristics: Sulfur (S): moderate (300ppm), Lead (Pb): none, Octane: moderate (1.50%), Dispersite: 1%

Plomo

- cero
- Bajo 0,07g/L
- Alto 0.20g/L

Benceno

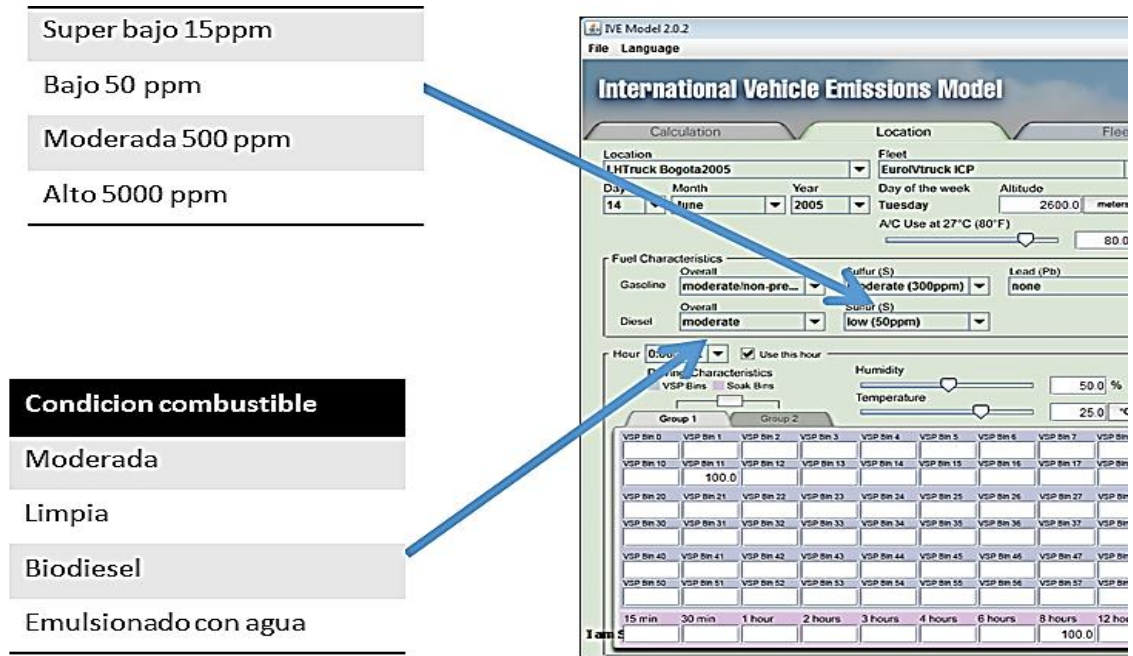
- Superbajo 0.2%
- Bajo 0.5%
- Moderada 1.5%
- Alto 3%

Oxigenados

- 0%
- 1%
- 2%
- 2.5%

Fuente: IVE

Figura 4-3: Pantalla del modelo IVE- variación de parámetros para el diésel –



Fuente: IVE

Para observar la variación o sensibilidad del modelo IVE a las diferentes opciones que permiten los parámetros de los combustibles, se definieron las siguientes condiciones:

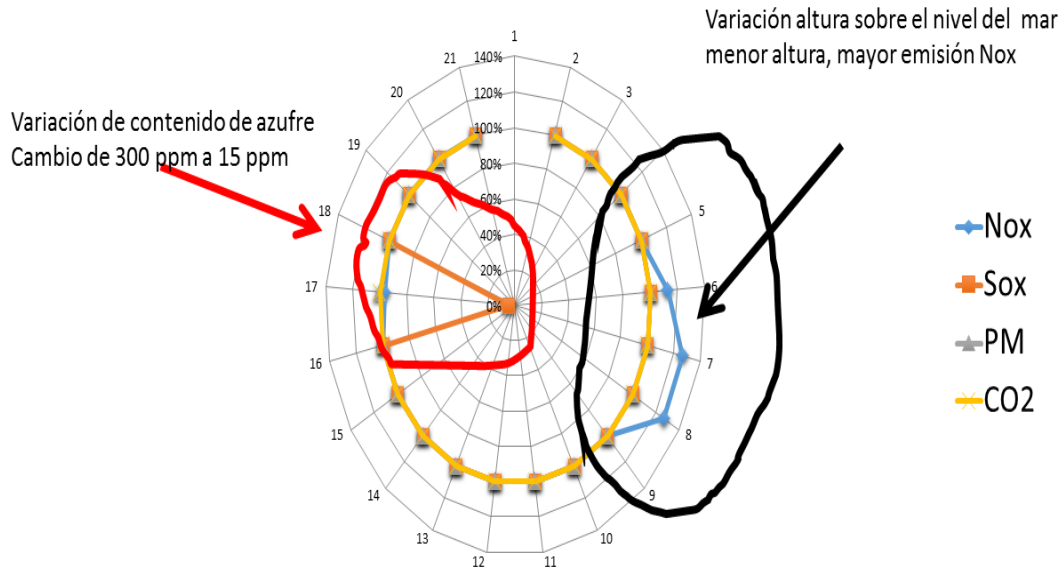
Tabla 4-5: Flota vehículos de prueba para evaluación modelo IVE

• Flota	Euro IV vehículos medianos 1.4 – 2.0 L
• Número de vehículos	1 MM vehículos
• Condiciones de combustible:	Moderada premezcla – Limpia premezclada
• Velocidad km/h	0 -20-35
• Azufre ppm	300- 15
• Uso de aire acondicionado %	80-60-40-20-0
• Temperatura: °c	12-15-20-25
• Altitud m	2600-2000-1500-1000-500-0
• Humedad relativa %:	90-70-60-50
• Resultados	1 día

Fuente: Elaboracion propia

Variando cada uno de los parámetros se realizaron diferentes corridas, y normalizando los resultados, el modelo solo muestra variaciones significativas cuando se reduce el contenido de azufre.

Figura 4-4: Resultados de la variación de parámetros normalizados en la flota seleccionada modelo IVE- Combustible Gasolina



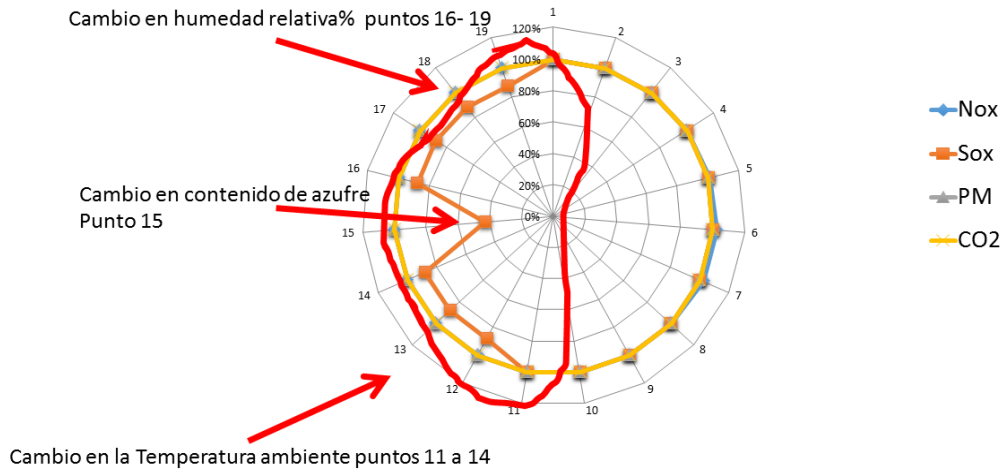
Fuente: Ecopetrol 2015

Tabla 4-6: Combustible Diésel Vehículos pesados

• Flota	Euro IV
• Condiciones de combustible	Moderado - Limpio
• Velocidad km/hr	11,6-15-20
• Azufre ppm	300- 15
• Uso de aire acondicionado%	80-60-40-20-0
• Temperatura °c:	12-15-20-25°
• Altitud m	2600-2000-1500-1000-500-0
• Humedad relativa %	90-70-60-50
• Resultados	1 día

Fuente: Elaboración propia

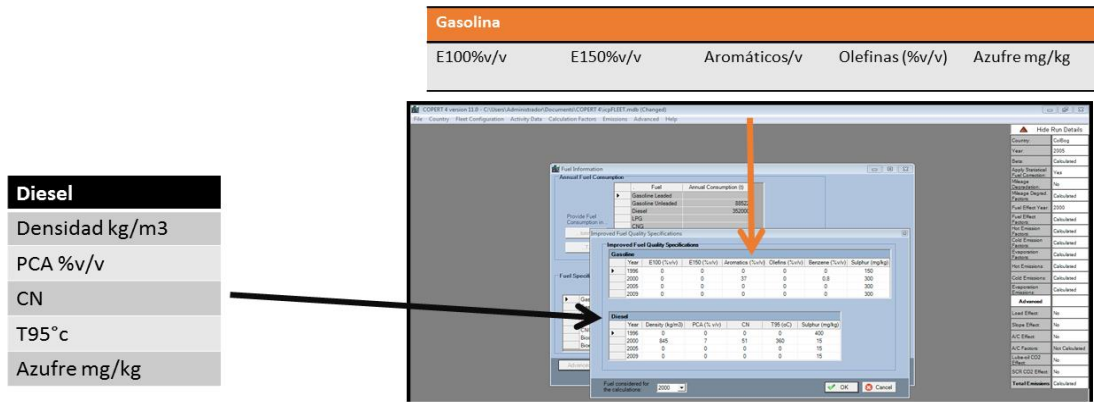
Figura 4-5: Resultados de la variación de parámetros normalizados en la flota seleccionada modelo IVE- Combustible Diésel



Fuente: Ecopetrol 2015

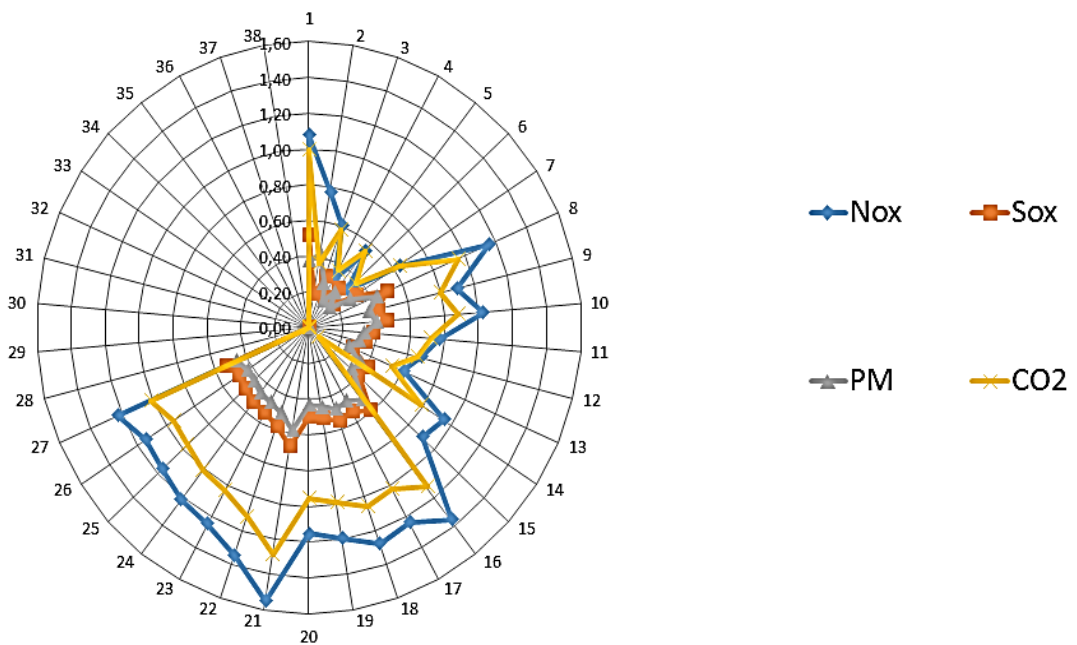
4.2.2 Modelo de emisiones Copert 4

El modelo Copert 4 es empleado por la Unión Europea para la estimación de emisiones contaminantes provenientes de fuentes móviles, requiere casi las mismas variables de entrada que el modelo IVE, pero con la diferencia que permite la introducción de valores numéricos para cada una de las características del combustible, la figura 4-6 muestra el esquema del modelo



Fuente: Copert 4

Figura 4-8: Resultados de la variación de parámetros normalizados en la flota seleccionada modelo Copert IV- Combustible Gasolina



Fuente: Ecopetrol 2015

Debido a que el modelo Copert 4 muestra una mejor respuesta a las variaciones de los parámetros, con los valores específicos del combustible comercializado en Colombia, este será el modelo empleado para la estimación de las emisiones a lo largo de la Ruta del Sol.

Debido a la variabilidad de los vehículos en los diferentes sectores, se realizarán cálculos individuales entre los sectores de conteo, teniendo en cuenta las características específicas de altura y velocidad promedio de los vehículos transitando por cada uno de los sectores.

4.3 Modelo de emisiones – modo fluvial

La información disponible de las características de la operación fluvial, es escasa y en algunos casos nula. Operadores consultados indicaron que dicha información era confidencial. Para poder estimar las emisiones generadas por los remolcadores en operación se debe conocer:

Características de los remolcadores:

- tipos de motores
- capacidad de carga
- clase de combustible empleado.

Condiciones específicas de operación:

- Tiempos de partida y llegada al puerto
- Nivel de operación del motor: nivel de empuje y consumo en la salida y llegada a puerto, en la operación aguas arriba y aguas abajo.

La información obtenida para la estimación de estos datos, arrojó la ubicación de los remolcadores de una de las empresas de transporte de carga para el mes de Julio de 2016, y con base en estos datos, junto con la información técnica disponible obtenida del fabricante de estos, se han realizado los cálculos de emisiones suponiendo las siguientes condiciones:

La navegación entre Barrancabermeja y Cartagena tarda 5 días (Ecopetrol – Carta Petrolera 2008) y el viaje de regreso tarda entre 3 y 9 días dependiendo del nivel de carga de las naves.

Se asume una sola operación de partida del puerto y una sola operación de llegada – esta operación es la que más consume combustible, y que la configuración de remolcador y barcas es de 8 x 2. Igualmente se supone una navegación de 24 horas – 7 días a la semana.

No se tienen en cuenta las dificultades actuales de navegación en ciertos sectores: baja profundidad, zonas estrechas de paso, y la actual imposibilidad de navegación nocturna.

Con estas condiciones establecidas se hará uso del método estándar del IPCC(1996), empleando los factores de emisión de los combustibles colombianos

4.4 Modelo de emisiones- modo férreo

A diferencia del modo fluvial, que a la fecha existe, pero la información es restringida, para el modo férreo, se tiene que no hay operación actual, y la información disponible de tiempos y operación, se obtuvo del viaje de prueba realizado a finales del año 2016, por el operador más interesado en ser el concesionario de la vía férrea.

Este viaje se realizó, con locomotoras GM, año modelo 1956, actualmente existentes en el país, y cuya configuración fue obtenida de la página web del fabricante.

La estimación de las emisiones se realizó asumiendo una operación de 2 ciclos de viaje diarios entre Puerto Salgar y la Zona Portuaria de Santa Marta, con una configuración de 6 vagones, al igual que en el modo fluvial, no se tienen en cuenta los tiempos de aproximación a los terminales de carga / pasajeros ubicados en la vía y se asume una operación constante.

Para el modelo de emisiones del modo férreo, se empleará igualmente el método estándar del IPCC(1996), empleando el factor de la EPA, aplicado en el estudio de caso de MIT - CTL (2013)

5 Estimación de emisiones y escenarios de emisión

5.1 Escenarios de emisión

Para tener una perspectiva de las posibilidades reales de reducción por efecto del transporte multimodal en el eje ruta del sol se evaluarán las condiciones de carga al año 2011, y se harán las proyecciones correspondientes en dos escenarios probables al año 2032; Se ha seleccionado este año, debido a que es el año objetivo del gobierno, en el cual se espera que Colombia sea uno de los tres países más competitivos de la región. (CPC 2008)

5.2 Modo terrestre

A partir de los datos obtenidos para la actividad de los vehículos en circulación se han establecido las siguientes condiciones para la estimación de emisiones:

- Se realizó la estimación detallada de la flota en un sector de la ruta, es decir contando cada una de las categorías vehiculares de acuerdo a la encuesta realizada durante el proyecto CAR – UNAL y se compararon con los resultados de la estimación simplificada en 3 categorías principales de vehículos de acuerdo a la clasificación de Copert IV:

Autos Gasolina 1.4 – 2.0 I PC Euro 2 – 94/12/EEC

Buses Buses estándar Euro II – 91/542/EEC Stage

Camiones Articulados HD Euro II – 91/542/EEC Stage

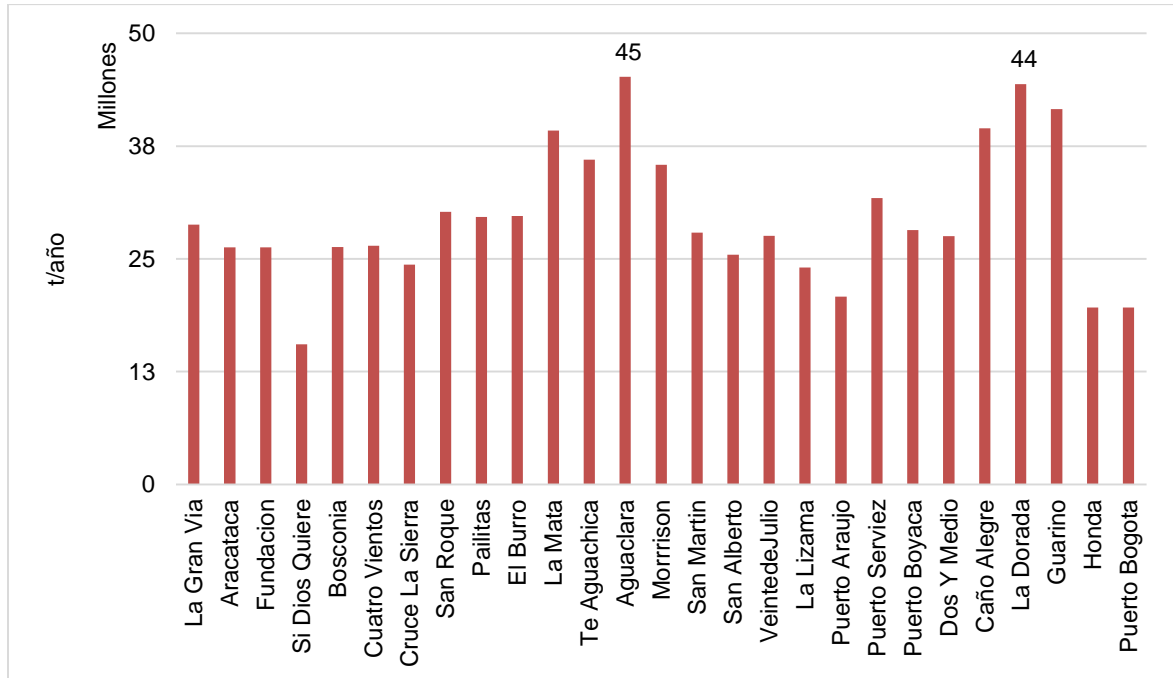
La diferencia en las estimaciones realizadas es del 2,7%, razón por la cual se considera una desviación aceptable de los resultados detallados, contra los resultados simplificados de la flota

- La velocidad promedio de la ruta se estableció en 60 km /hr a partir de los datos de GPS obtenidos de un camión típico que cubría la ruta Bogotá- Cartagena – Bogotá
- A partir de los datos del MADS, se estableció que los vehículos a gasolina comercializados en el país desde el año 2009 son Euro III, mientras que los vehículos diésel, para las marcas que representan el 30% de la flota en circulación en la ruta son EPA 98 – Euro II
- De acuerdo a los estimados comunes en el tema logístico, se asume que el 30% de los viajes se realizan con el vehículo vacío

5.2.1 Calculo de emisiones por estaciones de conteo del INVIAS

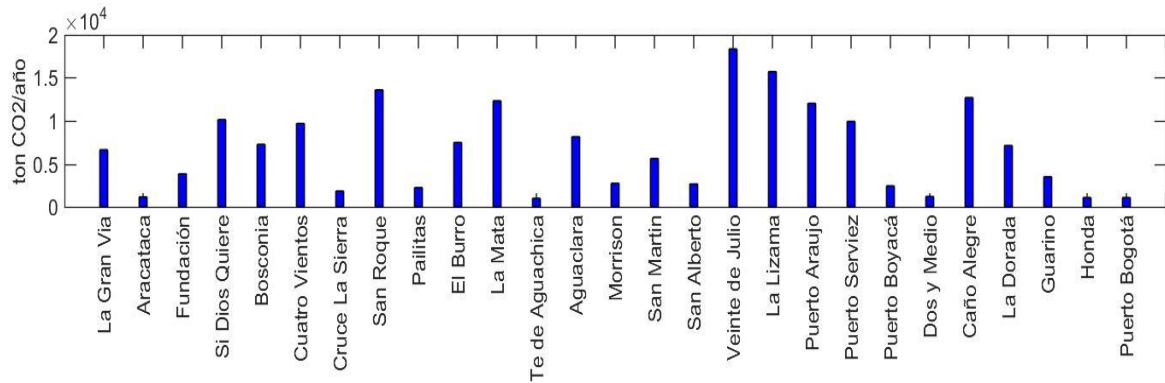
Con las consideraciones anteriores, se realizó la estimación de las emisiones de los vehículos transitando por la ruta del sol, haciendo uso del modelo COPERT IV, Para ello se calculó a partir de la información disponible del estudio Helios, la cantidad de carga transportada por la Ruta del Sol (Figura 5-1),

Figura 5-1: Cantidad de carga estimada en circulación por la Ruta del Sol –



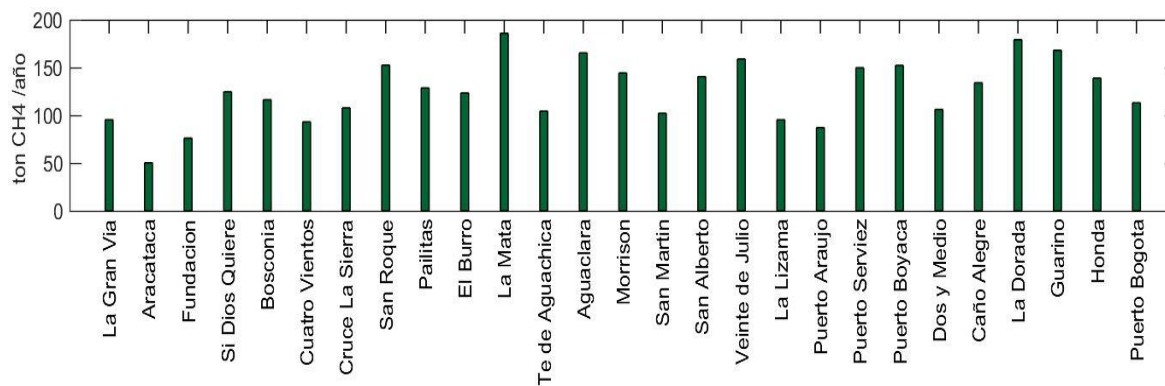
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2: Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los vehículos de pasajeros



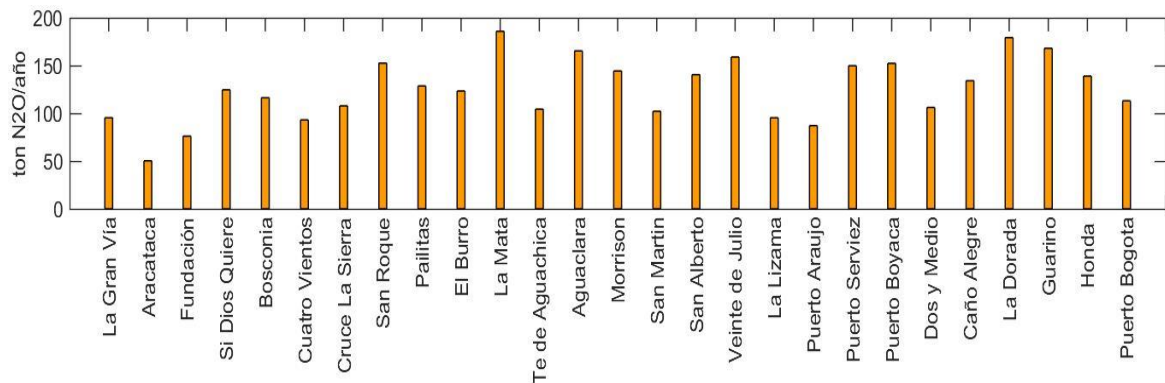
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-3: Emisión de CH4 en toneladas año emitidas por los vehículos de pasajeros



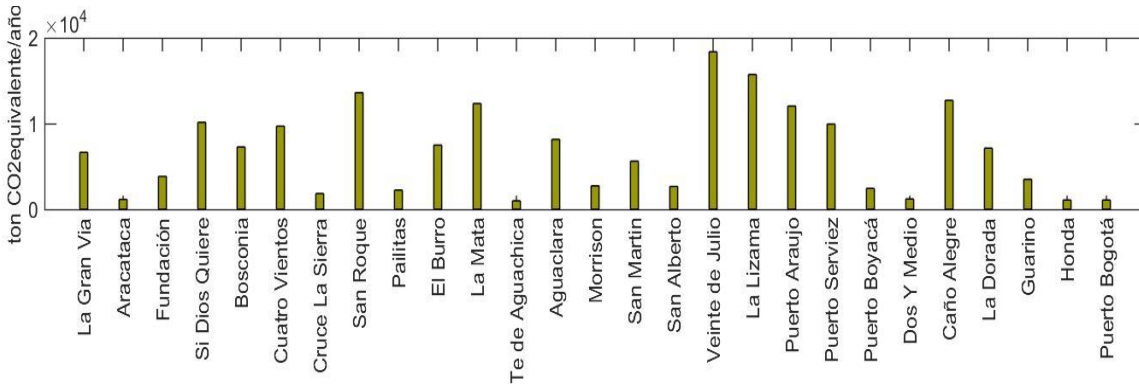
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4: Emisión de N2O en toneladas año emitidas por los vehículos de pasajeros



Fuente: Elaboración propia

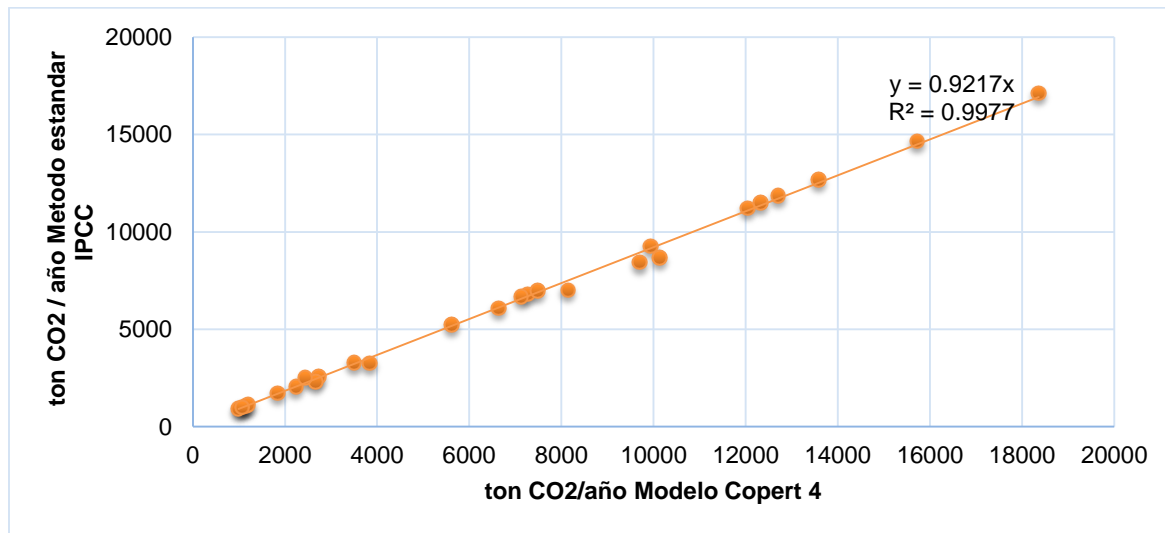
Figura 5-5: Emisión de CO2 equivalente en toneladas por año emitidas por los vehículos de pasajeros



Fuente: Elaboración propia

Para validar si la estimación de los datos, eran congruentes, se realizó el cálculo de las emisiones, empleando el método estándar del IPCC(2006), la figura 5-6 muestra la correlación obtenida entre los cálculos realizados, el detalle de estos se puede ver en el anexo 2, la cual muestra que los resultados obtenidos con Copert 4, corresponden adecuadamente con la metodología IPCC 2006, Esta comparación muestra que el modelo Copert 4 subestima las emisiones de CO2 entre un 7% y un 12%, con las características de combustible comercializado en Colombia

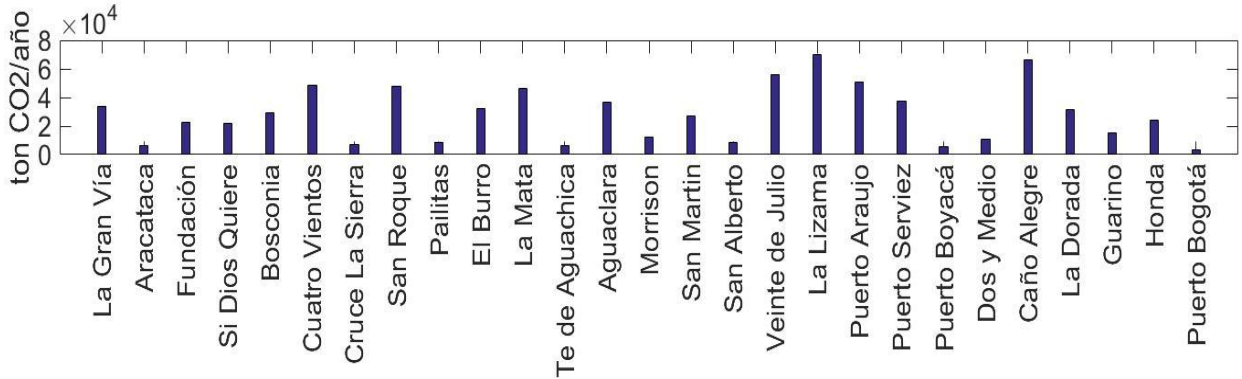
Figura 5-6: Correlación de las estimaciones entre el modelo Copert 4 y el método estándar del IPCC – vehículos de pasajeros



Fuente: Elaboración propia

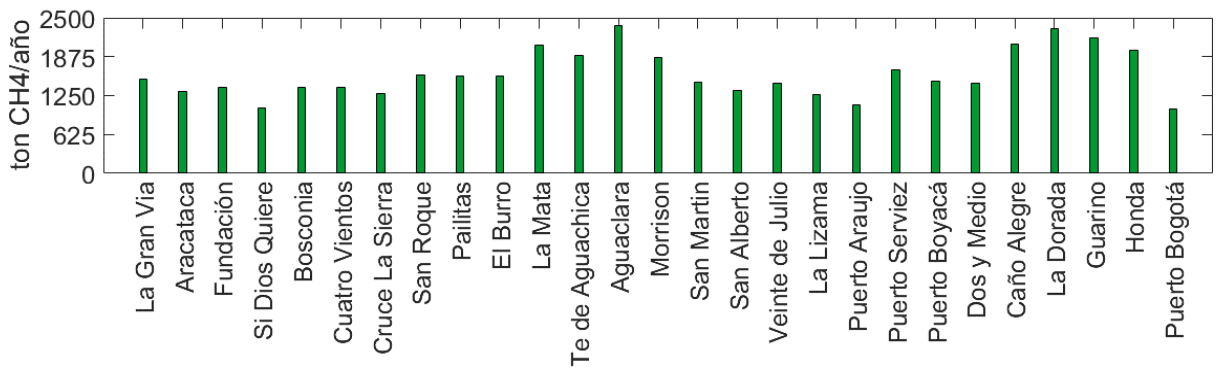
Para los camiones se presentan los resultados obtenidos, tanto en condición de carga, como en condición de vacío – figuras 5-7 a 5.10

Figura 5-7: Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los camiones con carga



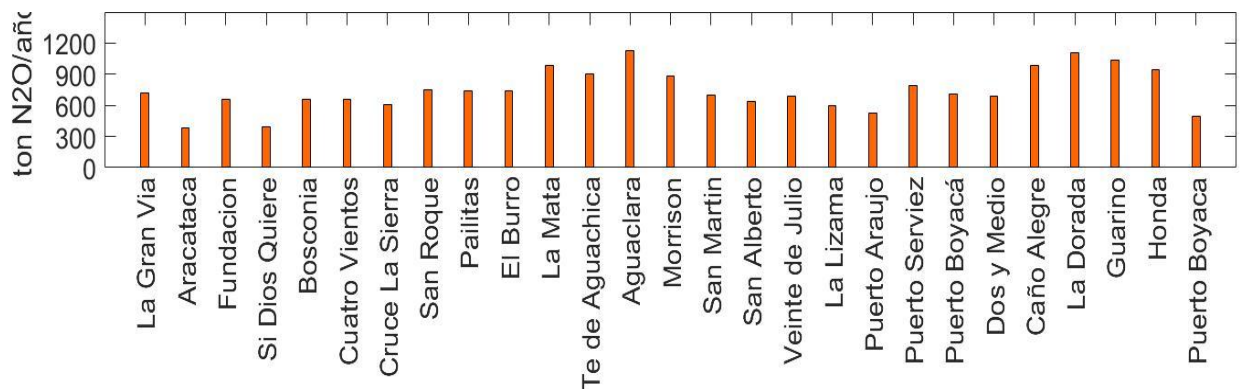
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-8:: Emisión de CH4 en toneladas año emitidas por los camiones de carga



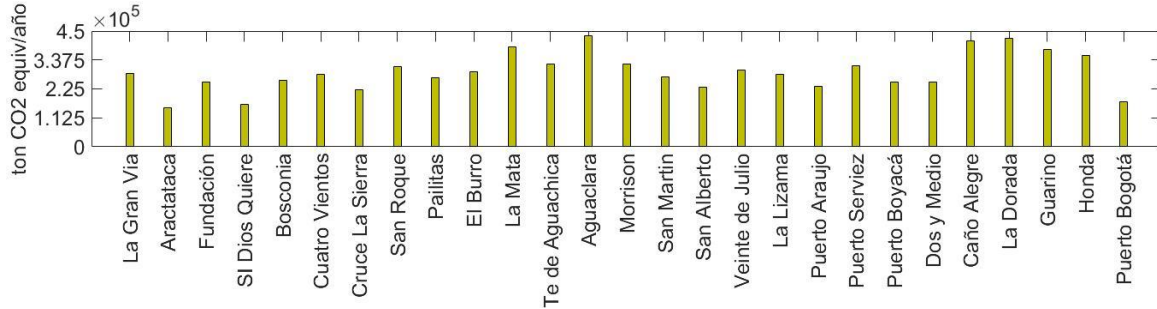
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-9: Emisión de N2O en toneladas año emitidas por los camiones de carga



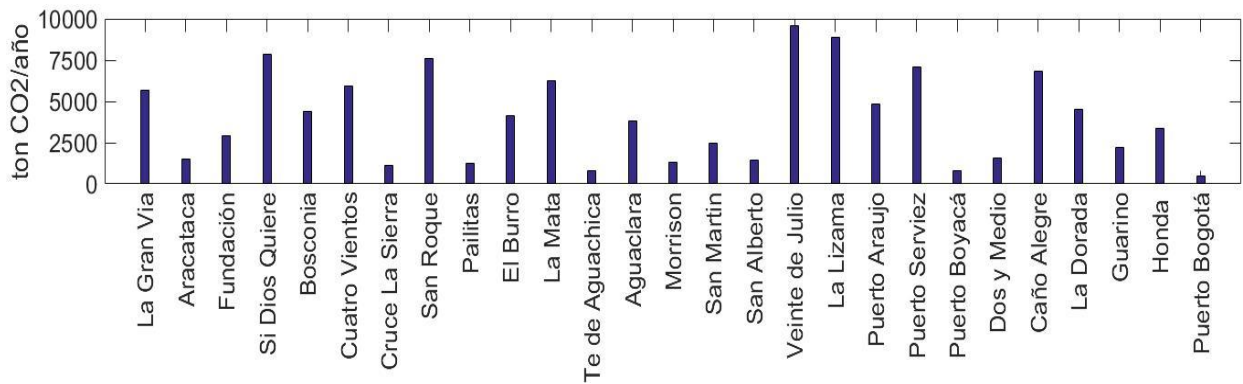
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-10: Emisión de CO2 equivalente en toneladas año emitidas por los camiones de carga



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-11: Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los buses



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-12: Emisión de CH4 en toneladas año emitidas por los buses

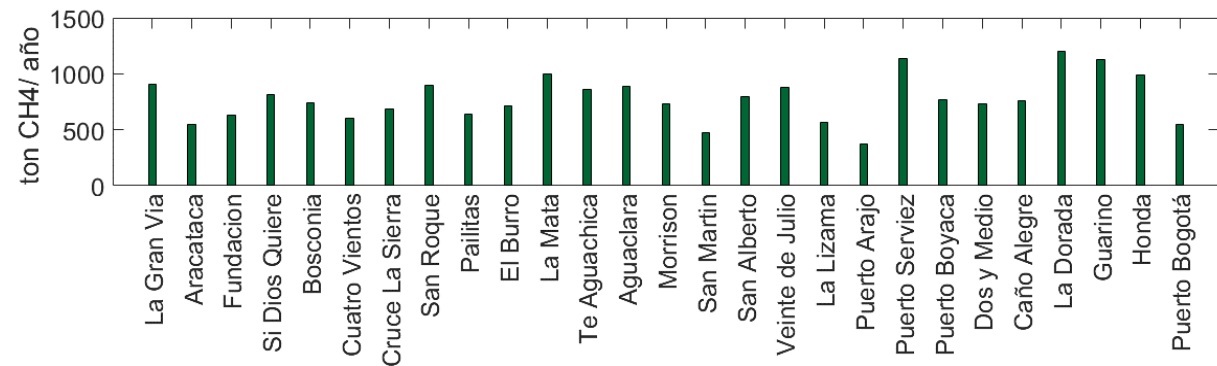
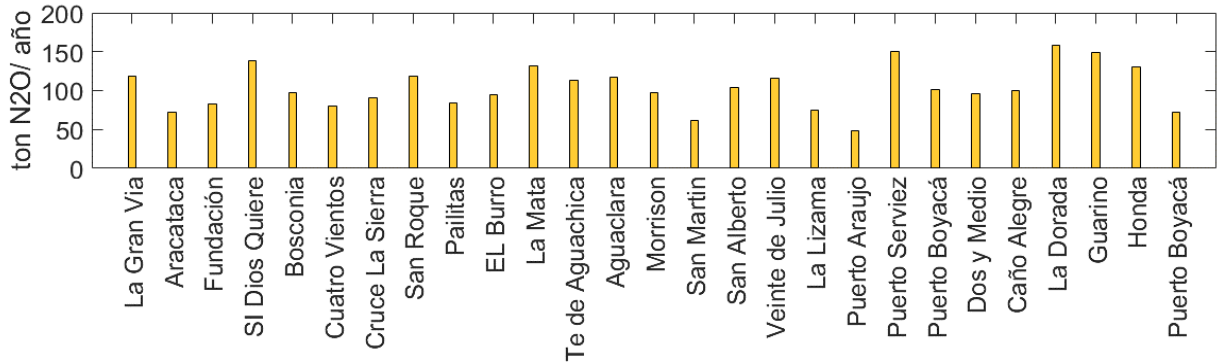
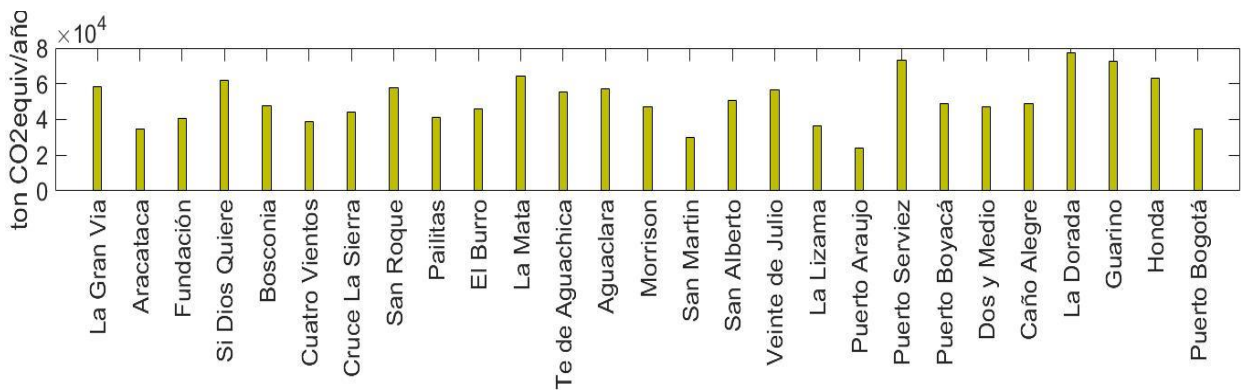


Figura 5-13: Emisión de N2O en toneladas año emitidas por los buses



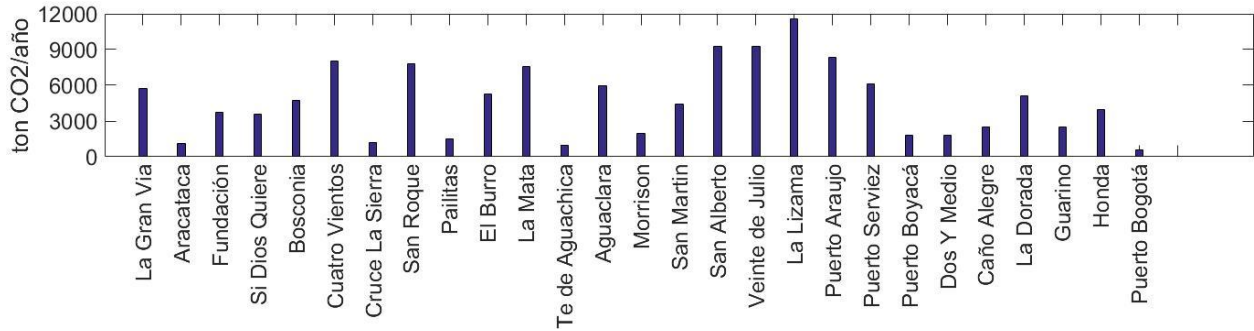
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-14: Emisión de CO2 equivalente en toneladas año emitidas por los buses



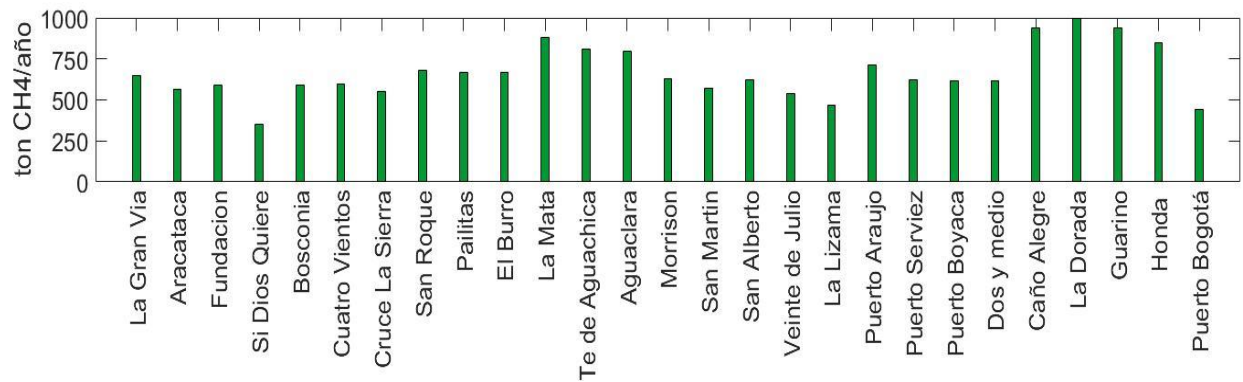
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-15: Emisión de CO2 en toneladas año emitidas por los camiones sin carga



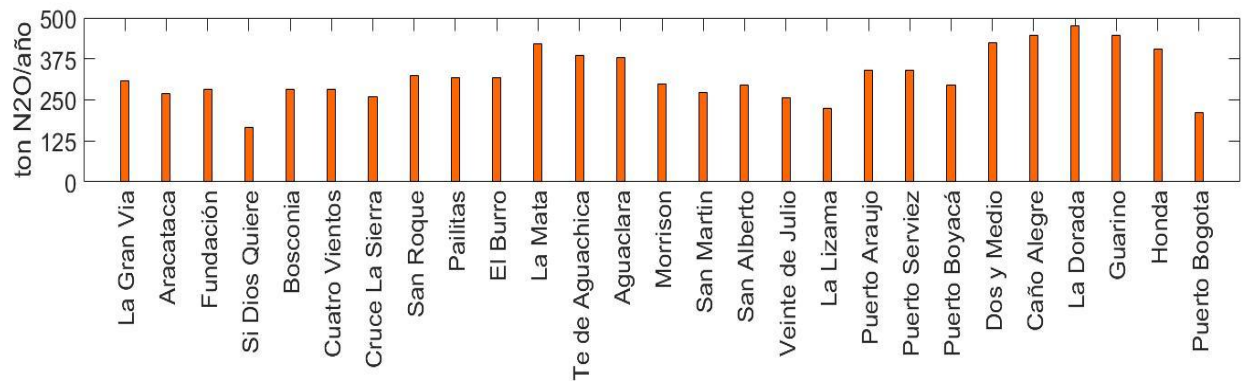
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-16: Emisión de CH4 en toneladas año emitidas por los camiones sin carga



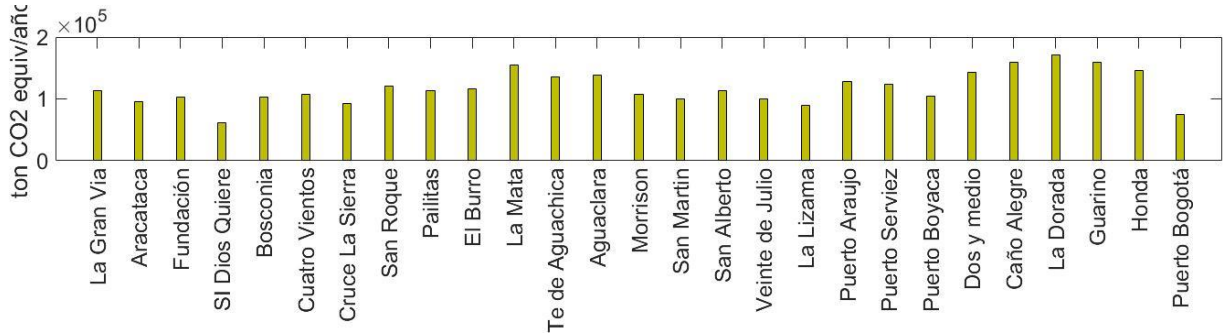
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-17: Emisión de N2O en toneladas año emitidas por los camiones sin carga



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-18: Emisión de CO2 equivalente en toneladas por año emitidas por los camiones sin carga



Fuente: Elaboración propia

El total de emisiones estimadas de CO2 generados por los vehículos en la ruta del sol, para el año 2011, es de 1 136 181 ton CO2/año.

5.3 Escenarios de estimación

Debido a que ni el Rio Magdalena ni el Ferrocarril Central operan en la actualidad, como una opción adecuada de carga, se realizaran dos estimaciones de operación tanto del Rio, como del Ferrocarril, Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Escenarios de carga para operación multimodal en el eje Ruta del Sol año 2032 –

ESCENARIOS DE CARGA	DE RIO MAGDALENA MTON/AÑO	FERROCARRIL CENTRAL MTON/AÑO	TOTAL CARGA MULTIMODAL MTON/AÑO
CONSERVADOR	5	1,1	6,1
OPTIMISTA	10	2,5	12,5

Fuente: Elaboración propia

Como a la fecha no se tiene claridad sobre el desarrollo del proyecto de navegabilidad del Rio Magdalena, y ni sobre la adjudicación para la concesión del Ferrocarril Central, estos comparativos se realizarán contra el año base de estimaciones de las emisiones en el modo terrestre que es 2011

5.3.1 Modo fluvial

Para la estimación de las emisiones del modo fluvial se realizó el método IPCC(2006) con siguientes consideraciones:

- Se estima que existen dos configuraciones principales de remolcadores de acuerdo a la información pública de las navieras son:
 - K3400 de 4500 hp fabricado por Scheepswerf de Kaap equipado con 3 motores Caterpillar 3512C
 - K1250 de 1700 hp fabricado por Scheepswerf de Kaap equipado con 3 motores Caterpillar 3512C

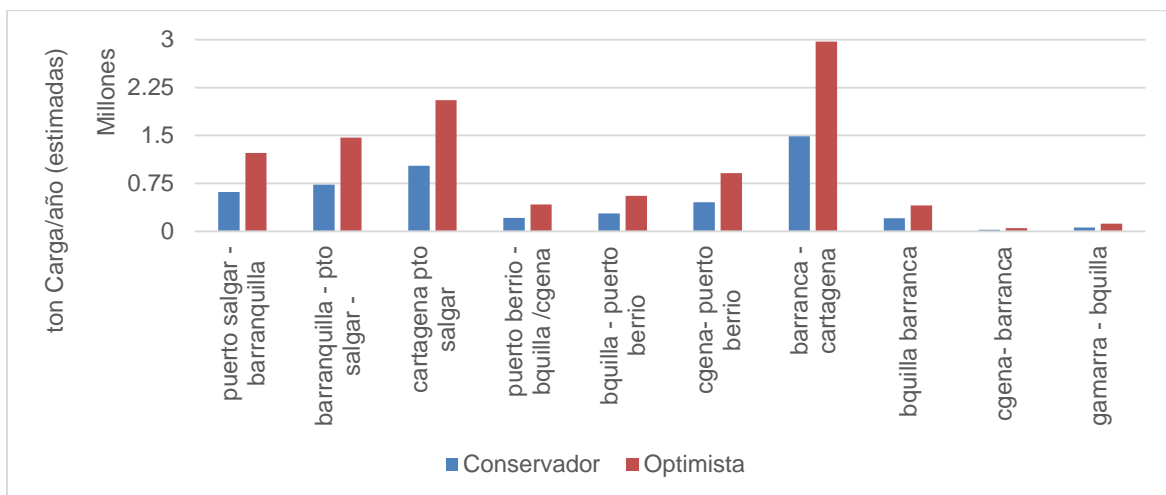
La estimación de emisiones se realiza sobre la condición de navegación continua y no tiene en cuenta los periodos de cargue y descargue.

Con la información satelital obtenida, se puede determinar que en promedio los remolcadores navegan 20 horas diarias, en algunos casos hasta 24 horas.

Los estimados de consumo fueron realizados a partir de las curvas de consumo de combustible obtenidas del fabricante

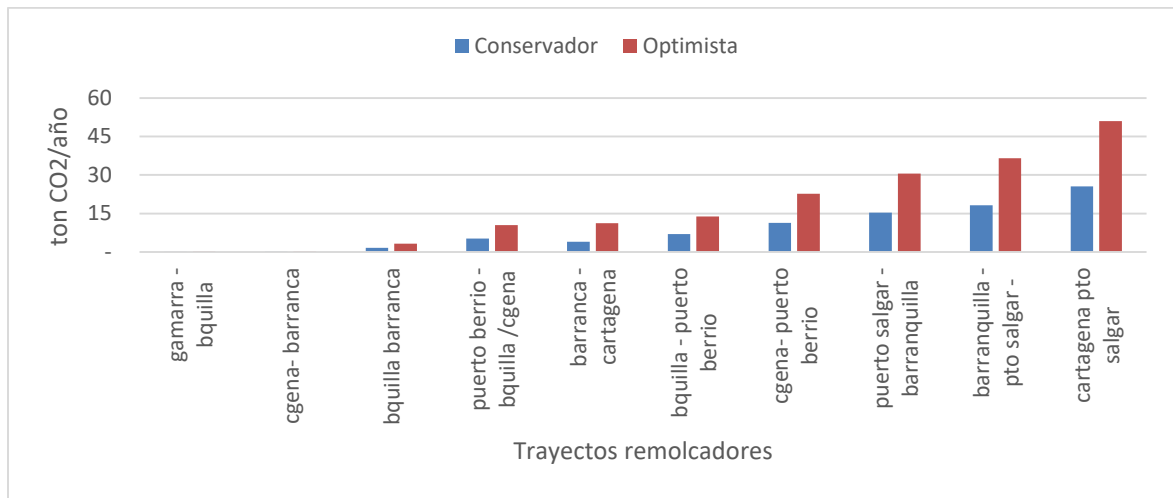
A partir de estas suposiciones, y empleando el método del IPCC(2006) se estimaron las emisiones del Rio (Figura 5-20) en los dos escenarios de carga (Figura 5-19)

Figura 5-19: Potencial de carga a ser movilizada por el Rio Magdalena en el primer año de recuperación de navegabilidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-20: Emisiones estimadas por escenarios para la operación entre Puerto Salgar y la Costa Atlántica



Fuente: Elaboración propia

El total de emisiones estimadas son:

89 ton CO2/año en el escenario conservador con 5 MM ton/año de carga

180 ton CO2/año en el escenario optimista con 10 MM ton/año de carga

5.3.2 Modo Férreo

Para la estimación de las emisiones del modo fluvial se realizó el método IPCC(2006) con el factor de emisión de MIT- CRT (2013) con siguientes consideraciones:

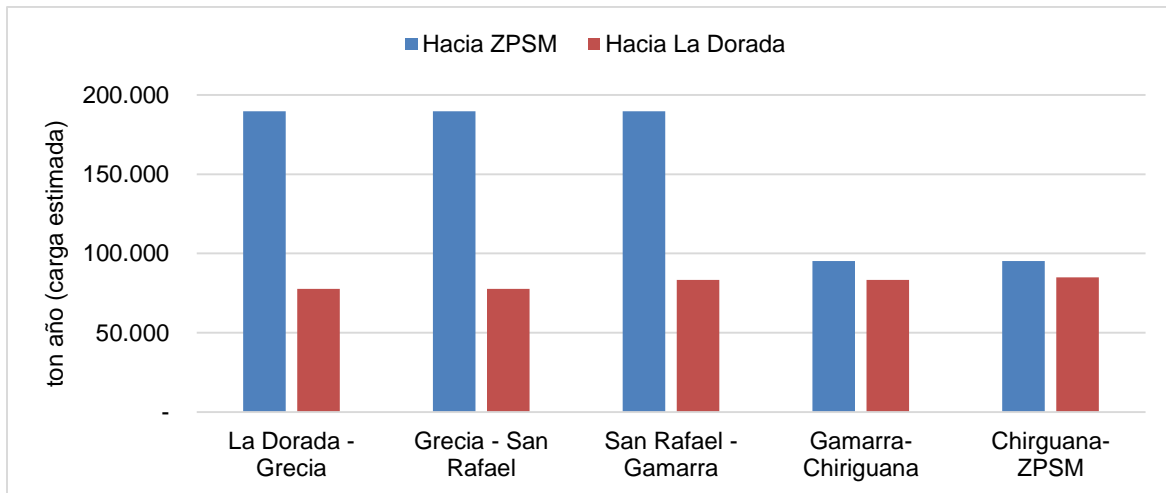
- Se supone una configuración típica de carga como la del viaje de prueba realizado entre la Zona Portuaria de Santa Marta (ZPSM) y La Dorada en octubre de 2016.
- Se asume una operación de carga de dos ciclos diarios: ZPSM – La Dorada y La Dorada- ZPSM
- La configuración posible para la operación de un tren moderno en trocha angosta, indica que, deben emplearse trenes de las siguientes características, fabricado por Progress Rail Services:

- Motor : Caterpillar 3512C-HD
- Estándar de emisiones EU Etapa IIIA
- Potencia neta 2200 BHP
- Arreglo de ejes C – C
- Motores de tracción D43 / D87

○ Freno de aire	26 L
Rango de carga del eje	15.75 a 18 toneladas métricas
Peso Nominal	94.5 a 108 toneladas métricas
Ancho nominal	ancho de trocha Queensland
Velocidad promedio	80 - 90 km/h

Los estimados de carga por año se muestran en la figura 5-21

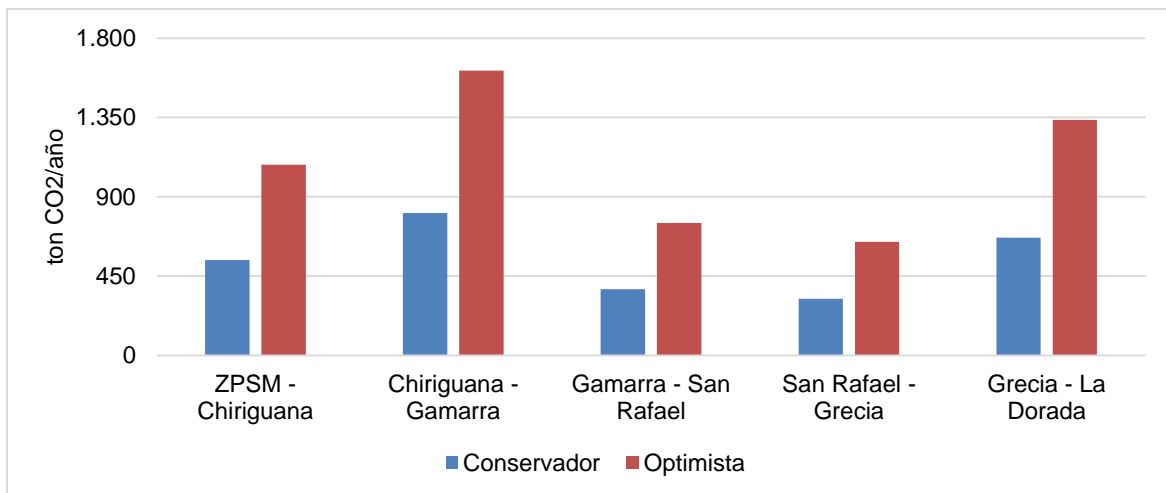
Figura 5-21: Movimiento estimado de carga entre Zona Portuaria de Santa Marta y La Dorada para el primer año de operación



Fuente: Elaboración propia

Los estimados de emisiones en los dos escenarios planteados se muestran en la siguiente figura

Figura 5-22: Emisiones estimadas por escenarios para la operación entre Puerto Salgar y la ZPSM



Fuente: Elaboración propia

El total de emisiones estimadas son:

2716 ton CO₂/año en el escenario conservador con 1,1 MM ton/año de carga

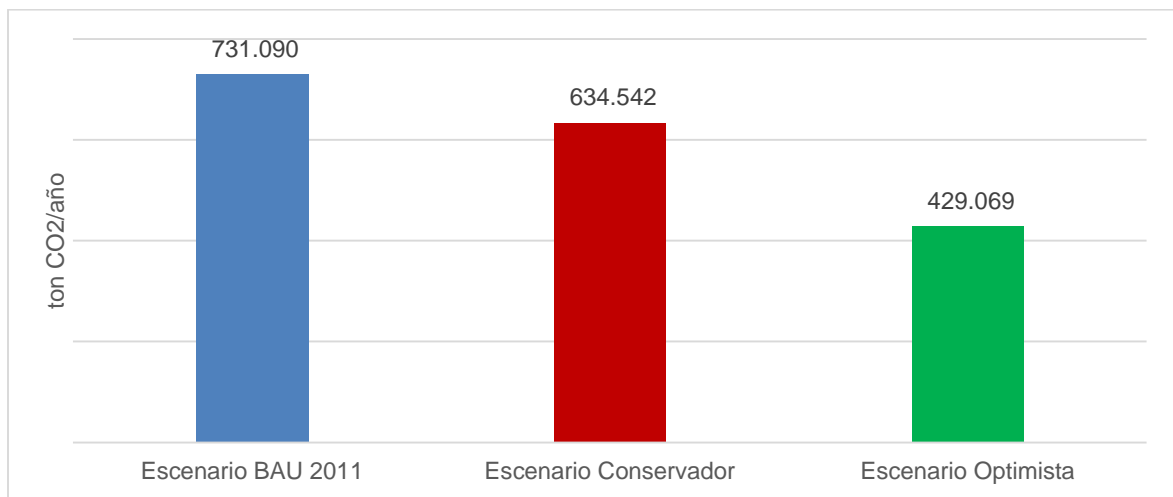
5432 ton CO₂/año en el escenario optimista con 2.2 MM ton/año de carga

5.4 Reducciones de emisiones esperadas

Una vez realizados los cálculos correspondientes se realizó la comparación de los escenarios de carga comparados con el estimado de carga de año 2011

La figura 5-23 muestra los resultados de las emisiones estimadas en los escenarios planteados

Figura 5-23: Emisiones totales para carga, en los escenarios planteados



Fuente: Elaboración propia

Sobre el mismo escenario de carga transportada si se dieran los escenarios propuestos la reducción en el primer caso sería de 13%, mientras que en el segundo caso sería del 41%

6 Análisis e interpretación de resultados

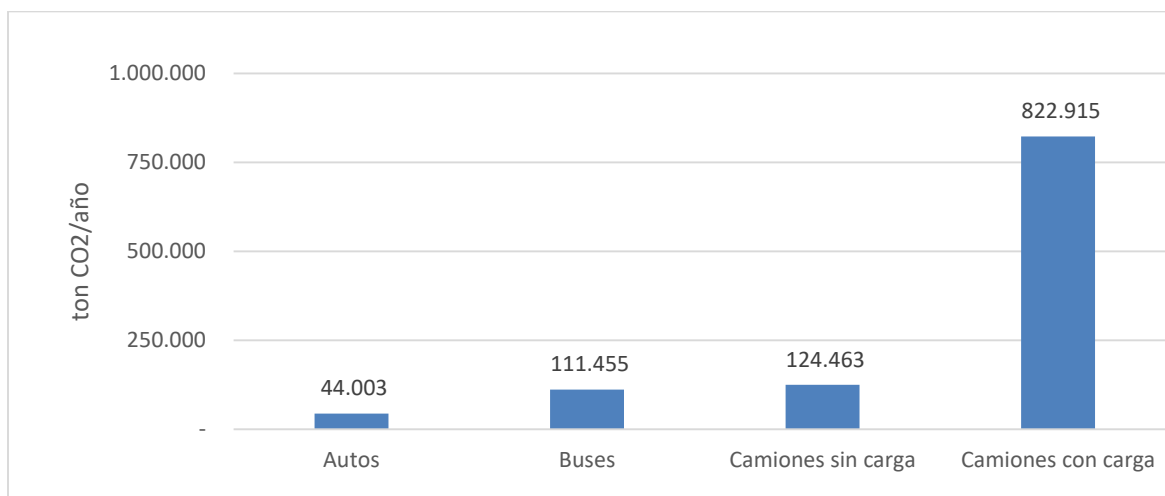
6.1 Modo terrestre

Los datos de emisiones del modo terrestre se encuentran divididos en 4 categorías:

- Autos
- Buses
- Camiones con carga
- Camiones sin carga

Los resultados totales por categoría se muestran en la siguiente figura

Figura 6-1: Total de emisiones estimadas por categoría de vehículos



Fuente: Elaboración propia

A partir de estos resultados se puede deducir que las emisiones del modo carretero provienen de los camiones pesados, categoría C3 S3, dado que son el 53.5% de los vehículos en circulación en la ruta.

El aporte de los vehículos de pasajeros es tan solo del 4% de las emisiones totales estimadas, de forma que no afectan de forma significativa los resultados, mientras que el de los buses y los camiones sin carga son del 10% y 11% respectivamente

El sector que más emisiones presenta es el tramo ubicado entre las estaciones: La Lizama - Puerto Araujo – Veinte de Julio – San Alberto, ubicadas en los departamentos de Santander y Cesar: La distancia entre estas estaciones es de 223 km, la altura promedio de este sector es de 125m sobre el nivel del mar. En este sector se genera aproximadamente el 25% de todas las emisiones en la Ruta, cabe recordar que este es el sector de mayor longitud entre estaciones en la Ruta.

Figura 6-2: Localización de las estaciones Puerto Araujo – La Lizama



Fuente: Elaboración propia

El valor estimado de emisiones en este sector se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 6-1: Resultados de emisiones en el sector Puerto Araujo – San Alberto

Categoría vehículos	TON CO2 / AÑO	% DE EMISION
Autos	11.373	3.2
Buses	26.774	7.7
Camiones vacíos	64.605	18.6
Camiones con carga	243.259	70.3
TOTAL EMISIONES	346.011	100

6.2 Modo Fluvial

Las estimaciones realizadas sobre el modo fluvial muestran que, si se ampliara la navegación hasta Puerto Salgar, permitiría una reducción significativa en las emisiones generadas por el transporte de mercancías. La estimación inicial de que el Río pueda transportar 5 MM de toneladas – año significa un aumento de carga del 150% con respecto a la carga actual, y aunque es una estimación conservadora, no disminuiría de forma significativa el transporte terrestre actual por la vía, el cual se estima alrededor de 45 MM de toneladas año. (MINTRANSPORTE 2013).

El efecto de la gran capacidad de carga de un solo convoy: remolcador y barcazas dentro de su configuración típica hace que a pesar de incrementar en dos veces (escenario conservador) y hasta cinco veces (escenario optimista) las motonaves actuales, los incrementos en emisiones esperados no se comparan con los niveles actuales de emisiones generados por el transporte carretero, y que a su vez están asociados con un menor consumo de combustible por tonelada transportada.

En ninguno de los escenarios contemplados, es posible alcanzar la saturación del Río como vía de transporte, y cuya capacidad máxima está estimada en 500 MM de toneladas – año,

Figura 6-3: Configuración típica de un convoy de carga en el Rio Magdalena –

Fuente Google Earth

6.3 Modo Férreo

Las estimaciones de transporte de carga sobre el Ferrocarril Central, una vez rehabilitado completamente son de mayor perspectiva que la del Rio Magdalena, pero en el mejor de los escenarios iniciales, solo se esperaría que transportara 2.2.MM ton/año de carga.

Los datos estimados, están basados en una operación típica similar para trenes de trocha angosta, existentes en Suráfrica

A diferencia del Rio, la vía férrea si tiene una capacidad máxima de transporte de carga y aunque el mejor escenario contemplado, es de dos ciclos día – dos viajes al día entre Puerto Salgar y ZPSM, la vía podría asumir hasta el 80% de la carga actual transportada por el modo carretero, que actualmente circula por la vía.

Figura 6-4: Vista del tren de carga existente, a la altura de Chiriguaná- Cesar.



Fuente: Google Earth

6.4 Comparativo de emisiones entre los modos de carga

De acuerdo a los resultados obtenidos es posible concluir que las emisiones en ton CO₂/km año recorridos son- tabla 6.2

Tabla 6-2: Comparativo emisiones entre modos de carga

	Modo Carretero	Modo Férreo	Modo Fluvial
CO ₂ [ton/año]	822915	5432	180
Longitud [km]	766	748,3	908
Emisiones [ton CO ₂ / km recorrido]	1074,3	7,3	0,2

Fuente: Elaboración propia

7 Conclusiones y Recomendaciones

Se ha realizado una estimación detallada por sectores de las emisiones generadas por el tráfico vehicular a lo largo de la Ruta del Sol, los resultados muestran que el sector de vehículos que más influyen en la generación de emisiones son los vehículos de carga pesada, dentro de este estudio se consideró que principalmente eran Tractocamiones clase C3 S3.

Las estimaciones realizadas indican que el número de automóviles particulares, aunque en número son similares, las emisiones totales de estos son apenas un 4% de las generadas por los vehículos de carga.

Desde el punto de vista ambiental, el uso de modos de transporte alternativos, como el modo fluvial y/o el modo férreo, conllevan a unas reducciones en emisiones bastante importantes, que incluso pueden llegar hasta el 41% si se logran consolidar las operaciones de transporte multimodal que requiere el país.

El uso del modelo COPERT 4, con las características reportadas de los combustibles por parte de Ecopetrol, permite hacer una estimación adecuada de las emisiones en las condiciones de Colombia.

Los datos estimados para los modos fluvial y férreo fueron realizados a partir de información general, debido a que para el primer modo, la información de la operación de los remolcadores fue estimada para naves de características similares, operando en el Río Mississippi, de los cuales si se disponía información, mientras que para el modo férreo, los datos fueron estimados, porque a la fecha el ferrocarril aun no opera en el corredor.

El desarrollo de una operación de transporte multimodal, traerá muchas ventajas no solo desde el punto de vista ambiental, sino también desde el punto económico, por la sola reducción del consumo de combustible para poder transportar los mismos volúmenes de carga.

La reducción en tiempo de viaje en automóvil particular de 18 a 10 h entre Bogotá y la Y de Ciénaga hará que muchas personas consideren la Costa Atlántica como una opción válida para pasar un fin de semana festivo, esta condición hará que muchos lugares a lo largo de la vía puedan desarrollar actividades turísticas, como efecto de la reducción en tiempos de viaje.

La mayor parte de la vía presenta actualmente un nivel de flujo vehicular que varía entre nivel de servicio A (Flujo libre) y C (Flujo estable), con excepción del sector comprendido entre la rotonda de Villeta y Guaduas en el que la vía es calzada sencilla y el nivel de servicio es categoría F (Flujo forzado- congestión total), esta condición cambiará una vez que entre en servicio el sector I de la Ruta del Sol entre Villeta y Guaduas.

Adicionalmente se espera que el uso de la vía por parte de los vehículos particulares se incremente considerablemente en los periodos de descanso, tal y como sucede actualmente en la vía Bogotá Girardot, la cual con una distancia de 80 km y doble calzada, presenta variaciones considerables entre los días laborales, en los cuales esta distancia puede ser cubierta en un tiempo cercano a una (1) hora, mientras que en un fin de semana festivo, la misma distancia puede tomar tiempos entre cuatro (4) y seis (6) horas. (Revista Semana 2014 – El Autor)

Este fenómeno que se da cuando se genera una mejora importante en un bien o servicio, con el propósito de que este sea más eficiente, en vez de reducir su uso, lo que se presenta es un aumento del mismo, este efecto conocido en economía como la paradoja de Jevons, explica de forma adecuada este efecto (Jevons 1905)

Se recomienda implementar mejoras en los sistemas y métodos de control de emisiones de los vehículos, debido a que el modelo supone condiciones óptimas de operación y

mantenimiento de los vehículos, pero los datos obtenidos de las encuestas y de gps en operación real muestran que los vehículos tienen condiciones diferentes a las supuestas

A. Anexo- Especificaciones técnicas remolcadores y motores



KP1250 PUSHER

Part of the shallow water pushboat series
Serie de Empujadores para aguas poco profundas

Take advantage of over 75 years of experience of the De Kaap Shipyard. All-round experts in the area of push boats, inland shipping and small sea-going coasters, tankers and passenger vessels. We are customer-oriented and our design and construction methods are based on your demands. *Aproveche la ventaja de más de 75 años de experiencia del Astillero De Kaap. Expertos en el área de las embarcaciones para aguas poco profundas, navegación interior y buques de cabotaje, así como buques tanques y buques de pasajeros. Estamos orientados al cliente y nuestros diseños y métodos de construcción están basados en sus demandas.*

Technical particulars (Especificaciones técnicas)

Length, over all (long total)	24.50 m
Length, over all (longa total)	24.52 m
Breadth, mid. (Ancho de travesa)	11.20 m
Breadth, max. (Ancho máximo)	11.75 m
Depth, mid. (Profundidad travesa)	2.76 m
Draught, design (Calado de diseño)	1.70 m
Air draught, min. (Alto sobre agua mínimo)	4.50 m
Fuel oil capacity (Wáster de fuel oil)	85 m ³
Ballast (ballast) (Wáster de lastre)	approx. 20 ton
Complement (Tripulación)	12
N/A cabins (Número de camarotes)	600 pers.

Classification (Clasificación)

Classification (Clasificación)	Bureau Veritas INLAND 11 () - HULL - MAC 11
	INCC(A), Pusher
Main engine(s) (Motor principal)	
Make (Fabricante)	Caterpillar
Model (Modelo)	C32-ACFRT TTA
Number (Número)	2
Output (Potencia)	534 kW or 720 hp
Revolutions (Revoluciones)	1000 rpm

Generator(s) (Generador)	
Make (Fabricante)	Mitsubishi
Model (Modelo)	MMW 5450
Number (Número)	2

Propeller(s) (Vela)	
Material (Material)	Stainless Steel (Acero inoxidable)
Number (Número)	2
Diameter (Diámetro)	1150 mm
No. of blades (Número de paletas)	4, fixed pitch (paso fijo)
Open or Nacled (Abierta o Cerrada)	Nacled (cerrada)

Propeller shaft (Eje de vela)	
Material (Material)	Welded fabric steel (Acero laminado)

Steering gear (Acción de gobierno)	
Main rudders (Pares de popa)	4

Auxiliaries (Auxiliares)	
Manufacturer (Fabricante)	Caterpillar
Model (Modelo)	C4.4 TTA
Number (Número)	2
Output (Potencia)	80 kW/100 kW
Frequency (Frecuencia)	50 Hz

Roughness (Rugosidad)	
Propeller diameter (Diámetro)	900 mm
Shaft (Vela)	Caterpillar C12
Output (Potencia)	250 hp/1,800 rpm

Working air compressor (Compresor de aire de trabajo)	
Working pressure (Presión de trabajo)	8.5 bar
Air capacity (Wáster de aire)	1000 L

Fuel purifier (separator) (Filtro de combustible)	
Installed (Instalado) (Instalado)	Yes (sí)

NO NONSENSE EFFICIENCY KNOW HOW



Kaapweg 1
 7044 HV Muisje
 Postbus 100
 4800 AB Steppel

Tel: +31 (0)512220224
 Fax: +31 (0)512220224
 Email: info@scheepswerfdekaap.nl
 Web: www.scheepswerfdekaap.nl



KP3400 Pusher

a shallow water pushboat for pushing a six barge convoy



Scheepwerf De Kaap is well known for her custom made ship designs instead of building ship series. In this way, De Kaap can meet each specific customer requirement. When the question came to make a design for a pusher for the inland waterways of South America, the choice was easily made. The Magdalena River is the principal river of Colombia, flowing northward about 1,578 kilometers (949 mi) through the western half of the country. The inland **pushboat** is especially designed for this river with her shallow water and the tropical climate resulting in high water temperatures (up to 30 degrees Celsius).

The **pushboat** can easily achieve a minimum speed of 6 knots in calm water when pushing a six barge convoy. The dimensions of each sixth barge being 1xR&T = 60x16x1.85 m and the barges being arranged in three sets of two by two. Without pushing any barge/convoy the **pushboat** can easily achieve a minimum speed of 9 knots.



Slipbouder Scheepwerf De Kaap, The Netherlands
 Vessel series KP3400 Pusher
 Hull number 251 & 252
 Flag Colombia
 Delivery date March 2013

Technical particulars

Length, o.c. 31.70 m
 Breadth, mld. 11.20 m
 Depth, mld. 2.76 m
 Draught, design 1.00 m
 Light weight 340 tonnes
 Speed @ 100% 6 knots
 (when pushing a six barge convoy
 convoy two wide/three long
 in shallow water)
 Barge 1xR&T 60x16x1.85 m
 Convoy displacement 10.000 ton
 Classification 1.5 []
 @ Hull = PLANCH
 @N (0/0) Pusher

Main Engine

Manufacturer Caterpillar
 Model 3512C DITA
 Number 2
 Type of fuel used Ussoil
 Output 1,118 kW or 1,500 bhp
 Revolutions 1,000 rpm
 Fuel consumption 260.0 l/hr

Gearbox

Make Rotax/Denelux
 Type WAP 6651
 Reduction 3.000:1
 Number 3
 (two counter-clockwise/one clockwise)

Auxiliaries

Manufacturer Caterpillar
 Number 2
 Type D6G AGERT DITA
 Output/speed 143 kW/1,800 rpm
 Generator make/type Leroy Somer
 LSAM 432 M95
 Electrical output/speed 135 kW/
 1,000 rpm
 Generator rated output 156 kVA
 Frequency 60 Hz
 Complement 12
 Main steering system
 Make Van der Velden
 Number 3x1
 (Hydro-Dynamic Fishrail Studder)
 Type HD 200 S/STD-WG
 Flanking rudders
 Make Van der Velden
 Number 3x2
 (Flanking Spade Rudders)
 Type NKA 100-WG
 Propeller
 Make Van der Velden
 Material Al Br Ni
 Number 3
 (two counter-clockwise/one clockwise)
 Pitch Fixed
 Diameter 1,450 mm
 Speed 390.5 rpm
 Nozzle yes
 (VDV Delphix X&S nozzles)



SCHIEPWERF DE KAAP
 Keesweg 2
 7544 HV Nijmegen
 Postbus 100
 7540 AG Nijmegen

Tel: +31 (0) 497 27 00 11
 Fax: +31 (0) 497 27 22 54
 Email: info@scheepwerfdekaap.nl
 Web: www.scheepwerfdekaap.nl

B. Anexo 2 Datos y cálculos

Figura B-1 Histórico de la profundidad del Rio Magdalena en los Puertos de: Calamar, Barrancabermeja y Puerto Salgar entre Oct 2011 y Oct 2017 – Fuente: El Autor a partir de los datos de CorMagdalena

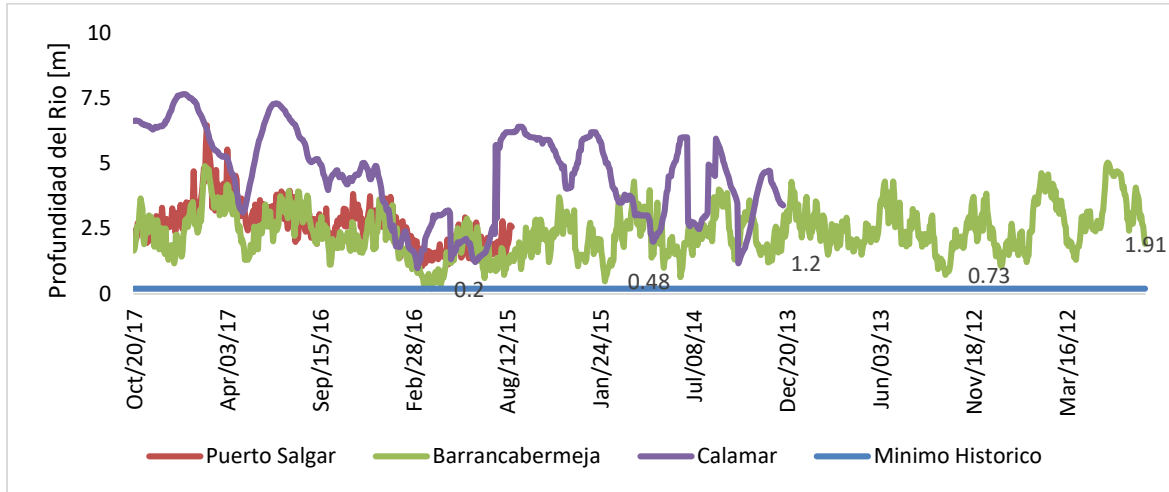


Figura B-2: Batimetría Puerto Salgar – Puerto Boyacá fuente <http://www.cormagdalena.com.co/idehacor/proyecto,htm>

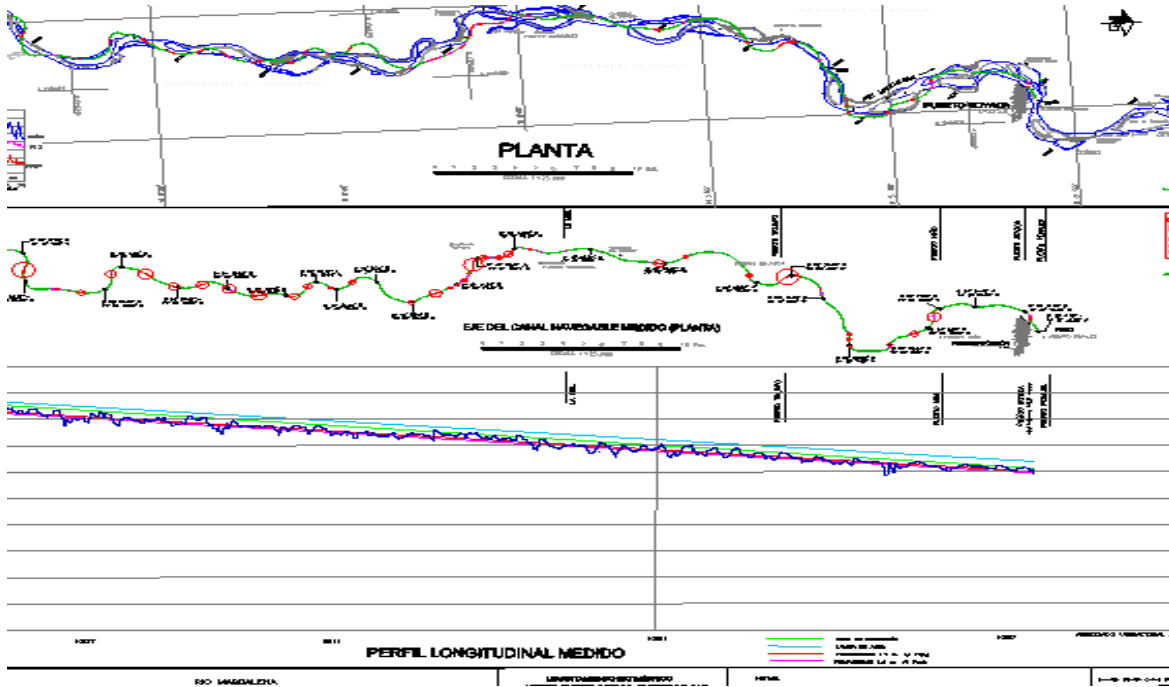


Figura B-3: Correlación de las estimaciones entre el modelo Copert 4 y el método estándar del IPCC – camiones con carga

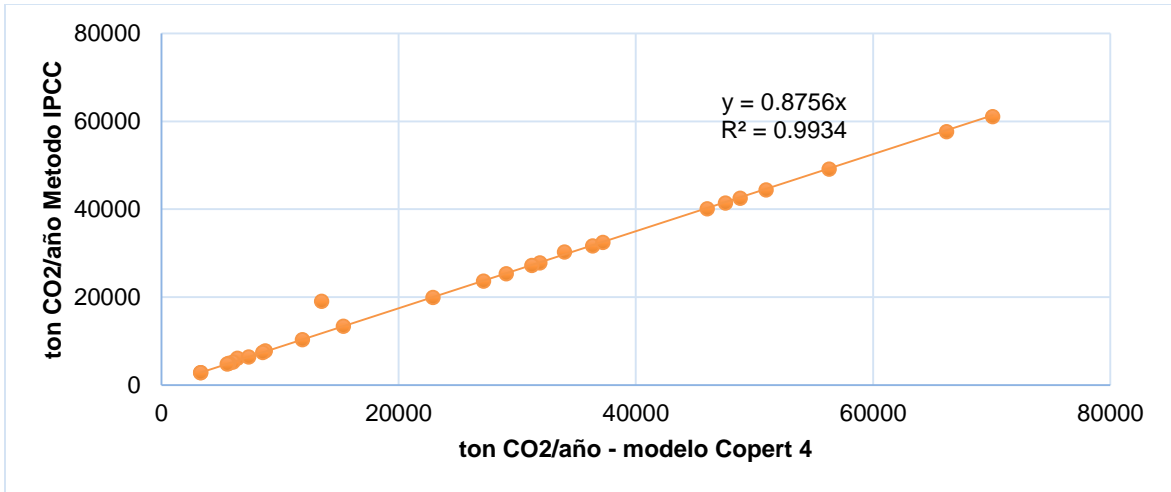


Figura B-4: Correlación de las estimaciones entre el modelo Copert 4 y el método estándar del IPCC – buses

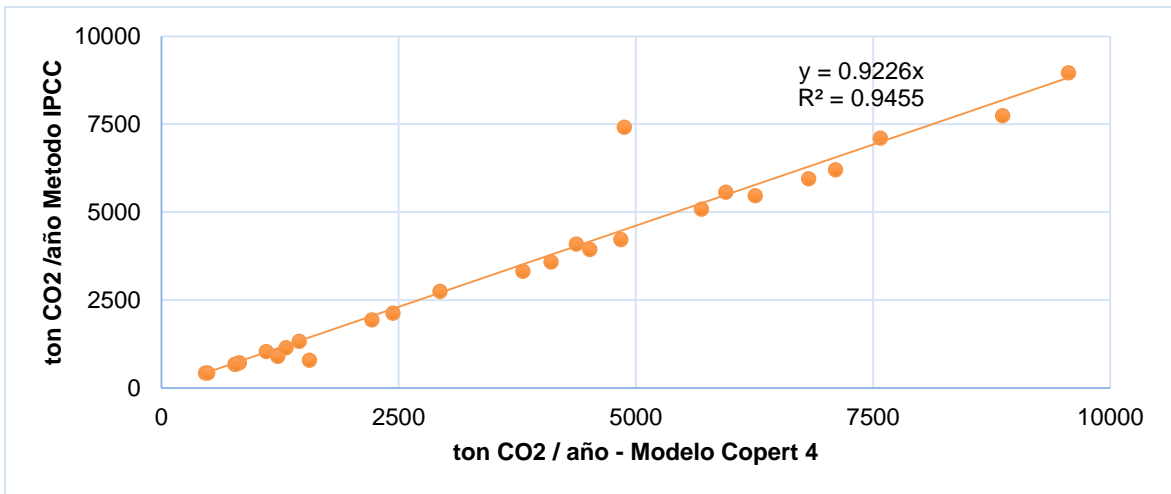


Figura A2-5: Correlación de las estimaciones entre el modelo Copert 4 y el método estándar del IPCC – camiones sin carga

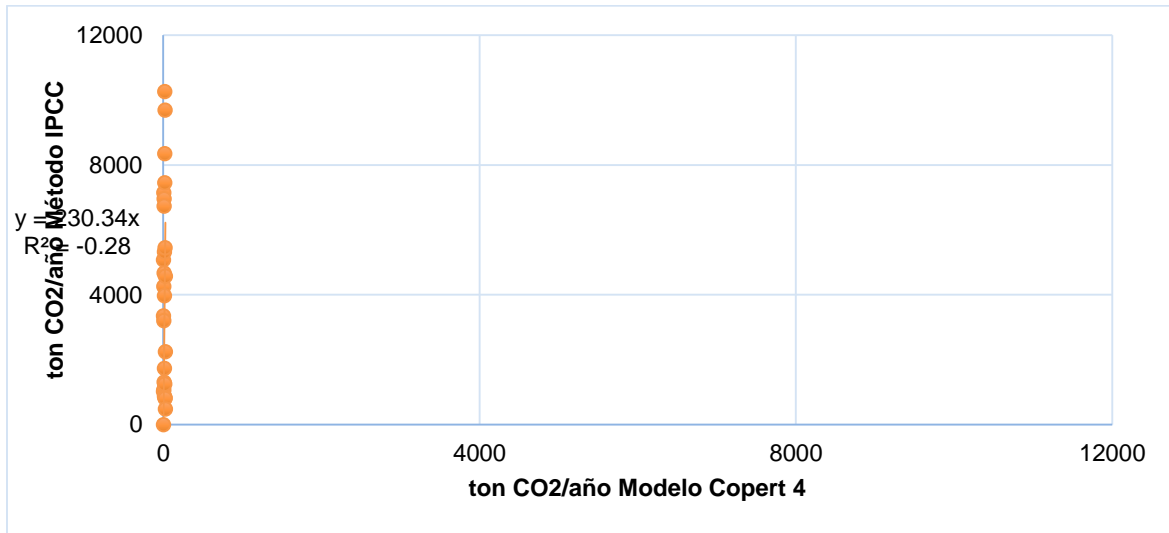


Tabla B-1: Detalle del calculo comparativo de CO2 por estación y sentido entre el modelo Copert y el modelo IPCC

RESULTADOS		Copert	IPCC	Total Copert	Total IPCC
LA GRAN VIA N	Passenger Cars	6643	6089	52006	46520
	HDTrucks	33975	30266		
	Buses	5690	5087		
LA GRAN VIA S	HDTrucks	5698	5078		
ARACATACA N	Passenger Cars	1155	1076	10255	9031
	HDTrucks	6387	6136		
	Buses	1558	788		
ARACATACA S	HDTrucks	1155	1031		
FUNDACION N	Passenger Cars	3835	3260	33407	29304
	HDTrucks	22884	19942		
	Buses	2935	2750		
FUNDACION S	HDTrucks	3753	3352		
SI DIOS QUIERE N	Passenger Cars	10136	8656	32082	38322
	HDTrucks	13482	19053		
	Buses	4877	7410		
BOSCONIA	HDTrucks	3586	3203		
	Passenger Cars	7271	6810	45474	40507
	HDTrucks	29066	25341		
	Buses	4370	4096		
HDTrucks	4768	4260			
CUATROVIENTOS	Passenger Cars	9699	8428	72439	63658
	HDTrucks	48791	42513		
	Buses	5947	5571		
	HDTrucks	8001	7146		
CRUCELASIERRA	Passenger Cars	1839	1714	11497	10231
	HDTrucks	7348	6406		
	Buses	1104	1034		

	HDTrucks	1207	1077		
SANROQUE	Passenger Cars	13590	12674	76499	68192
	HDTrucks	47535	41449		
	Buses	7576	7102		
	HDTrucks	7800	6967		
PAILITAS	Passenger Cars	2242	2047	13684	12048
	HDTrucks	8750	7795		
	Buses	1224	896		
	HDTrucks	1469	1310		
EL BURRO	Passenger Cars	7482	6977	48707	43024
	HDTrucks	31889	27791		
	Buses	4106	3584		
	HDTrucks	5231	4672		
LAMATA	Passenger Cars	12326	11495	72122	63787
	HDTrucks	45995	40090		
	Buses	6257	5463		
	HDTrucks	7544	6739		
TEAGUACHICA	Passenger Cars	991	926	8784	7741
	HDTrucks	6032	5257		
	Buses	772	674		
	HDTrucks	990	884		
AGUACLARA	Passenger Cars	8147	7011	54270	47323
	HDTrucks	36355	31666		
	Buses	3809	3323		
	HDTrucks	5959	5323		
MORRISON	Passenger Cars	2735	2550	17870	15779
	HDTrucks	11875	10344		
	Buses	1313	1146		
	HDTrucks	1948	1739		

SAN MARTIN	Passenger Cars	5616	5236	39659	34984
	HDTrucks	27154	23645		
	Buses	2440	2128		
	HDTrucks	4450	3975		
SAN ALBERTO	Passenger Cars	2662	2313	14036	12324
	HDTrucks	8524	7434		
	Buses	1452	1327		
	HDTrucks	1399	1250		
VEINTEDEJULIO	Passenger Cars	18366	17131	93459	83544
	HDTrucks	56295	49099		
	Buses	9559	8963		
	HDTrucks	9240	8351		
LALIZAMA		3406			
	Passenger Cars	15723	14661	106245	93732
	HDTrucks	70080	61069		
	Buses	8864	7737		
PUERTOARAUJO					
	HDTrucks	11578	10265		
	Passenger Cars	12042	11230	76190	67290
	HDTrucks	50959	44379		
PUERTOSERVIEZ	Buses	4838	4221		
	HDTrucks	8351	7460		
	Passenger Cars	9934	9263	60339	53379
	HDTrucks	37196	32454		
PUERTOBOYACA	Buses	7102	6207		
	HDTrucks	6107	5455		
	Passenger Cars	2443	2520	9858	9005
	HDTrucks	5666	4939		
DOS Y MEDIO	Buses	820	716		
	HDTrucks	929	830		
	Passenger Cars	1206	1126	8432	7445
	HDTrucks	5533	4822		

	Buses	786	686		
	HDTrucks	907	811		
CAÑOALEGER	Passenger Cars	12705	11849	96556	85134
	HDTrucks	66180	57644		
	Buses	6820	5951		
	HDTrucks	10850	9690		
LADORADA	Passenger Cars	7132	6651	47983	42380
	HDTrucks	31215	27213		
	Buses	4514	3942		
	HDTrucks	5121	4574		
GUARINO	Passenger Cars	3504	3267	23571	20819
	HDTrucks	15335	13368		
	Buses	2218	1937		
	HDTrucks	2515	2247		
HONDA	Passenger Cars	1073	999	5380	4766
	HDTrucks	3308	2862		
	Buses	461	424		
	HDTrucks	538	481		
PUERTOBOGOTA	Passenger Cars	1073	999	5380	4766
	HDTrucks	3283	2862		
	Buses	486	424		
	HDTrucks	539	481		
				1.136.181	1.015.035

Número de vehículos en el tramo de la Ruta del Sol la ye de cienaga				Características ruta				Tiempo de viaje en el tramo							
Autos		buses		camiones		pendiente		velocidad		pendiente		velocidad			
la gran via	Autos	577 430	198 560	1 028 205	7 197 44	308 461	0.7	0.3	Long ruta	36	0	60	0.6		
Combustible en ton consumido en el tramo															
pendi0	gasolina	diesel	diesel												
pendi0	2139	12857	1808												
Calculos de consumo de combustible															
peso	pendiente	velocidad	tripo	1 vehiculo	ml/km	l/km	gl/km	total flota [l/km]	total flota [m3/km]	total consumo distancia tramo prueba [m3]	combustible [kg]	combustible [Ton]	combustible [gl]	Combustible 1 Veh [g]	
CAMION 100% CARGA	0.6	60	0.60	0.51	513.9	0.26	308461	369905	369.9	13317	11.052.768	11053	3517843	3517.8	
												14254		4536.7	
peso	pendiente	velocidad	tripo	1 vehiculo	ml/km	l/km	gl/km	total flota [l/km]	total flota [m3/km]	total consumo distancia tramo	combustible [kg]	combustible [Ton]	combustible [gl]	combustible le 1 veh [g]	
CAMION 0% CARGA	0.6	60	0.60	0.196	196.1	0.1	60492	60.5	60.5	2178	1.807.510	1808	575289	575.3	
												2661		846.8	
peso	pendiente	velocidad	tripo	1 vehiculo	ml/km	l/km	gl/km	total flota [l/km]	total flota [m3/km]	total consumo distancia tramo	combustible [kg]	combustible [Ton]	combustible [gl]	combustible le 1 veh [g]	
BUS 100% CARGA	0.6	60	0.60	0.304	304.1	0.1	60377	60.4	60.4	2174	1.804.059	1804	574191	574.2	
												3406		1084.0	
rendimien to	pendiente	velocidad	tripo	1 vehiculo	ml/km	l/km	gl/km	valores x año	total flota [m3/km]	total consumo distancia tramo	combustible [kg]	combustible [Ton]	combustible [gl]	combustible le 1 veh [g]	
AUTOS	0.6	60	0.6	124.0	0.124	0.0	71601	577430	1000	36	750	1000	264.17	1000	
									71.6	2578	2.139.447	2139	680937	680.9	
vehiculos /año	distancia tramo	rendimiento comb/veh	conv m 3/l	densidad del combustible	PCI	TJ	Factor de Actividad año	Emisiones CO2 [t/año] Copert	Factor de emisión COPERT4 //IPCC	Emisiones CO2 [t/año] IPCC	Emisiones CO2 [t/año] Copert				
CAMION 100% CARGA	719744	36	0.50	1.E-03	830	42149	1.E-09	453	66778.404	30.266	33975				
CAMION 0% CARGA	308461	36	0.20	1.E-03	830	42149	1.E-09	76	66778.404	5.087	5698				
BUS 100% CARGA	198560	36	0.30	1.E-03	830	42149	1.E-09	76	66778.404	5.078	5690				
AUTOS	577430	36	0.12	1.E-03	750	45239	1.E-09	87	69623.6	6.089	2369				
										Total Emisiones por Estacion		46.520		47732	

Bibliografía

- ACEVEDO, Jorge et Al. (2009). El transporte como soporte al desarrollo de Colombia. Una visión al 2040. Ediciones Uniandes .
- ANI (2014). Estado actual Corredores Férreos a Cargo de la ANI.
- BARTH, M. BORIBOONSOMSIN K. (2009) Traffic congestion and greenhouse gases, University of California - University of California Transportation Center
- CAL Y MAYOR, R. CARDENAS, J (1994) Ingenieria de tránsito - fundamentos y aplicaciones
- CAMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. Sistema férreo nacional. 2012 {En línea} {19 Marzo de 2015} disponible en: <http://www.infraestructura.org.co/seguimientoproyectos/Informe%20ferrocarriles.pdf>
- CCI (2012) Seguimiento a proyectos de infraestructura, Sistema Férreo Nacional
- CORMAGDALENA (2014) Estudio de demanda del sistema fluvial del Río Magdalena y evaluación beneficio costo de un esquema de reactivacion de navegacion fluvial
- DANE (2012) Informe de coyuntura económica regional. Departamento de Bogotá - Cundinamarca
- DAVILA C, ROJAS A, ROJAS N(2013) Estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles en el tramo vial Bogotá- Facatativa (Cundinamarca) – Universidad Nacional de Colombia
- DNP (2006) Vision Colombia II Centenario
- DNP (2007) CONPES 3489 Política nacional de transporte automotor de carga
- DNP (2008) CONPES 3547 Política Nacional Logística
- DNP (2013)CONPES 3748 Importancia estrategica de la rehabilitacion delos corredores férreos : La Dorada - Chiriguaná y Bogotá - Belencito
- ECOPETROI ICP (2015) Análisis de las principales herramientas de software para estimacion de emisiones nivel internacional y su aplicabilidad al escenario Colombiano
- IDEAM (2016) Inventario nacional y departamental de gases de efecto invernadero - Colombia – 3era comunicación nacional de cambio climático
- INCOMBUSTION (2016) Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emision de los combustibles colombianos - Fecoc
- JEVONS,W.S (1905) The Coal Question: an Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines. 3rd edition 1905, Ed. A.W. Flux.
- MINTRANSPORTE (2011), Diagnostico del transporte 2010 y años anteriores
- MINTRANSPORTE (2013), Plan estrategico intermodal de infraestructura de transporte
- MIT CTL (2013) Case studies in carbon efficient logistics - Boise: Leveraging rail direct service
- POSADA J . (2012) Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones – Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellin Facultad de Minas
- REVISTA SEMANA (2014) <http://www.semana.com/nacion/articulo/girardot-bogota-en-solo-siete-horas/406002-3> - Consultado en 4/06/2017
- RINCON A (2013) Exploratory application of CCATT- BRAMS modelling system for the metropolitan area of Bogotá: preliminary representation of meteorology and transport
- CPC Consejo Privado de Competitividad – Informe nacional de competitividad 2008
- TEN T EA (2009) Port infrastructure facilities in the Malmö northern harbour
- UPME(2012), Proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia
- ZAHURUL D (2005) International freight transport multimodal development in developing countries : The case of Bangladesh

