



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación de políticas para reducir emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte de carga carretera en Colombia

Policies evaluation to reduce greenhouse gas emissions in road freight transport in Colombia

Susana Marín Valencia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2019

Evaluación de políticas para reducir emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte de carga por carretera en Colombia

Susana Marín Valencia

Tesis de maestría en investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería- Sistemas Energéticos

Director (a):

PhD., MSc., Ingeniero Civil, Carlos Jaime Franco Cardona

Codirector (a):

PhD., MSc. Ingeniera administradora, Lorena Cadavid Higueta

Línea de Investigación:

Transporte, Cambio Climático, Eficiencia Energética

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2019

*“La Tierra proporciona lo suficiente para
satisfacer las necesidades de cada hombre, pero
no la avaricia de cada hombre.”*

Mahatma Gandhi

Agradecimientos

Este trabajo y alcanzar mi grado de magíster, significa mucho para mí, y quisiera expresar mi gratitud a todas las personas e instituciones que hicieron esto posible.

En primer lugar, a la Universidad Nacional de Colombia, la cual considero mi segundo hogar, por la financiación de mi estudio de maestría mediante la beca de facultad. También por ofrecer todas las herramientas para que sus estudiantes se desarrollen como profesionales e investigadores de forma íntegra. Y por motivarnos a crear un país más justo y desarrollado.

A mis directores, Carlos Jaime Franco y Lorena Cadavid, por su paciencia, dedicación y ese gran cariño que le tienen a enseñar. Por guiarme de la manera indicada para lograr los objetivos de este trabajo. Por sus consejos y exigencias, y estar siempre disponibles para lo que necesitara.

Al Ingeniero Juan Guillermo Mesa, profesional experto en motores diésel, a los ingenieros Andrés Santos Blair y Hernán Pérez de Soluciones Logísticas Botero Soto, por abrirme las puertas de sus empresas y un espacio en su agenda para asesorar y resolver dudas del sector para el desarrollo de la tesis.

A todos los integrantes del grupo de investigación de Sistemas Energéticos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, por sus recomendaciones y observaciones durante la presentación de los avances de mi tesis, para mejorarla. Y por su disposición a ayudarme.

A mis compañeros de la maestría, Nathalie, Andrés y Tatiana, quienes me acompañaron en este posgrado, gracias por su apoyo y consejos.

A mis amigos Natalia, Julián, Santamaría y Santiago, mi paño de lágrima, pero también con quienes he pasado los mejores momentos de mi vida.

Por su puesto, a mis padres, porque es por ustedes que estoy aquí, culminando mi maestría, gracias por enseñarme a perseverar y trabajar por mis sueños, por sus consejos y palabras de aliento, por siempre creer en mí, por calmarme en momentos de desesperación y siempre estar ahí para mí, incondicionales. A mis hermanos, Viviana y Andrés, mi sobrina Paulina y a Julián, mi cuñado, que siempre estuvieron pendientes de mi estudio, que me ayudaban a olvidar el estrés, ustedes son parte fundamental de mi vida.

A Luis Miguel, que siempre me ha motivado a creer en mi misma, a dejar de lado las inseguridades, que me anima siempre a ser mejor, por sus memes sobre la tesis, por alegrar mis días y apoyarme en todas mis decisiones. A Celeste, por estar junto a mí todos los días mientras escribo esta tesis.

Y a todos que de alguna u otra manera hicieron parte de este proceso y que me preguntaban cómo iba con la tesis.

Definitivamente, este nuevo logro se los debo a todos ustedes.

Resumen

La temperatura de la superficie de la tierra se ha elevado en 1°C en comparación con la era preindustrial debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, consecuencia de las actividades productivas del ser humano. Esta situación ha traído consigo cambios en los ciclos naturales, en los patrones del clima y efectos colaterales que pueden poner en riesgo la vida de todas las especies del planeta. Adicional a los cambios que se pueden percibir actualmente, expertos pronostican un futuro aún más complejo, debido a que las personas cada vez emiten más CO₂ a la atmósfera. Entes gubernamentales internacionales y gran cantidad de países, han propuesto acuerdos para mitigar la cantidad de emisiones, con el fin de desacelerar el Cambio Climático y otorgar más tiempo para adaptarse a dichos cambios. Colombia es una de las naciones que se ha comprometido a reducir sus emisiones en todos los sectores de su economía a 2030, sobre todo en aquellos que más generan gases de efecto invernadero, como el sector transporte, puntualmente el de carga carretero, el cual genera el 36% de las emisiones del sector. Esta investigación, pretende hallar y evaluar estrategias y políticas que pertinentes para la reducción de las emisiones de dióxido de carbono equivalente en el país mediante la metodología de dinámica de sistemas, en dirección a los compromisos adquiridos por la nación. Al realizar la evaluación y el análisis en el modelo de simulación, se evidencia que una combinación de diferentes políticas y escenarios es el caso en el que se perciben resultados más favorables. Un aumento de la participación del modo férreo, la incursión de nuevas tecnologías vehiculares y la regulación de la edad de la flota, son elementos necesarios para que la actividad económica de transporte carretero reduzca sus emisiones en las proporciones pactadas, sea más sostenible y eficiente.

Palabras Clave: Cambio Climático, Mitigación, Políticas, Escenarios, Transporte de Carga Carretero, Dinámica de Sistemas

Abstract

The overall surface temperature of the earth has been raised by 1 ° C since the preindustrial time due to greenhouse gas concentration increment as a consequence of the human productive activities, bringing with it several changes in natural cycles, the climate pattern and collateral effects that could place the life of all the species on the planet in severe danger. Experts predict a tough future, with events even worse than those the planet is going through now, caused by the CO₂ human emissions, which are still increasing. International governmental entities and nations have been compromised to mitigate those emissions trying to decelerate Climate Change bringing more time to make plans for the adaptation. Colombia is one of the countries who has been committed to reducing greenhouse gas emissions in its whole economy by 2030 especially in those sectors that are more polluting as road freight transportation activity which generates 36% of the emissions in this transport sector. This research pretends to find and assess strategies and policies that contribute reducing equivalent carbon dioxide emissions with a system dynamics methodology approach in line to reach the targets of the nation. The model simulation shows that a combination of initiatives and scenarios is the case with better results. An increase of rail mode share on the modal shift, the penetration of new vehicular technologies and the regulation of the fleet age are necessary elements to reduce the emissions in this activity, achieving sustainability and efficiency.

Keywords: Climate Change, Mitigation, Policies, Scenarios, Road Freight Transportation, System Dynamics

Tabla de contenido

Resumen	IV
Abstract	V
Keywords	V
Lista de Figuras.....	VII
Lista de Tablas	IX
Lista de Ecuaciones.....	X
Lista de abreviaturas	X
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	6
3. Marco teórico.....	22
3.1. Cambio climático.....	22
3.1.1. Cambio Climático, Calentamiento Global y Efecto Invernadero.....	22
3.1.2. Gases de Efecto Invernadero (GEI)	24
3.1.3. Mitigación del cambio climático.....	25
3.1.4. Adaptación al cambio climático.....	25
3.2. Transporte de carga.....	25
3.2.1. Modos de transporte de carga.....	26
3.2.2. Vehículos de carga	29
3.2.3. Vehículos de carga y motores.....	31
3.3. Emisiones Motores diésel.....	33
3.4. Nuevas tecnologías.....	35
4. Revisión de la literatura	41
5. Objetivos	51
5.1. Objetivo general	51
5.2. Objetivos específicos	51
6. Metodología y Modelo de Simulación	52
6.1. Descripción del modelo.....	54
6.1.1. Propósito del modelo	54
6.1.2. Hipótesis dinámica.....	54
6.1.3. Diagrama de flujos y niveles.....	60
6.2. Validación del modelo.....	73

6.2.1.	Validación de la estructura	74
6.2.2.	Validación del comportamiento	81
6.2.3.	Análisis de sensibilidad.....	82
6.3.	Análisis del caso base	85
6.3.1.	Emisiones de CO _{2e}	85
6.3.2.	Demanda-Oferta	86
6.3.3.	Costos, ingresos y utilidades	87
6.3.4.	Flota vehicular convencional	88
6.4.	Diseño de escenarios y políticas	89
6.5.	Análisis de resultados.....	93
7.	Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.....	102
7.1.	Reporte del cumplimiento de objetivos	102
7.2.	Conclusiones.....	104
7.3.	Trabajo futuro	106
7.4.	Divulgación de resultados	107
8.	Referencias.....	109
A.	ANEXO 1.....	116

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución de las emisiones de GEI emitidas por el transporte por modo. (Peet et al., 2018)	6
Figura 2. Reparto modal mundial del transporte de carga, participación en transporte, consumo de energía y emisiones de GEI. (Peet et al., 2018).....	7
Figura 3. Emisiones sector transporte en Colombia de 1990 a 2012. (IDEAM et al., 2016).....	8
Figura 4. Emisores de GEI del sector transporte en Colombia (Ministerio de transporte de Colombia & ECDBC, 2014)	9
Figura 5. Emisiones proyectadas de CO _{2e} para el año 2040. (Behrentz et al., 2014)	10
Figura 6. Edad promedio de las flotas de transporte de carga terrestre en América Latina y países perteneciente a la OECD. (CEPAL, 2018)	11
Figura 7. Vehículos desintegrados en Colombia de 2013 a 2017. (EditorialLR, 2018)	12
Figura 8. Características del segmento: Transporte de carga carretero (UPME, 2016)	13

Figura 9. Costos totales de exportar una mercancía en USD por contenedor. (Felfle, Angulo, & Cardona, 2015).....	14
Figura 10. Consumo de energía del transporte terrestre en Colombia por segmento. (UPME, 2016).	16
Figura 11. Normatividad mundial de emisiones para vehículos pesados a 2014. (Engine Mobile Filtration Team, 2015)	18
Figura 12. Características de los modos de transporte, elaboración propia. Fuente: (National Academies of Sciences, 2011).....	27
Figura 13. Componentes de un camión, tipo de vehículo de carga: C3. Fuente: (MinTransporte, 2014)	30
Figura 14. Componentes de un tractocamión, tipo de vehículo de carga: C3S3. (MinTransporte, 2014)	30
Figura 15. Componentes de un tractocamión, tipo de vehículo de carga: C3S3. (MinTransporte, 2014)	30
Figura 16. Composición de los gases del tubo de escape de los motores diésel (Reşitoğlu et al., 2015)	33
Figura 17. Etapa de modelado usando dinámica de sistemas. Adaptado de (Sterman, 2000)	53
Figura 18. Subsistemas del modelo de transporte de mercancías y sus emisiones en Colombia, elaboración propia.	55
Figura 19. Hipótesis dinámica de las emisiones de GEI generadas por el transporte de carga carretero en Colombia, elaboración propia en Vensim PLE®.	56
Figura 20. Ciclos B1, B2 Y R1.....	57
Figura 21. Ciclos R2 Y R3.....	58
Figura 22. Ciclos B3, B4 Y R5.....	59
Figura 23. Ciclo B5.....	60
Figura 24. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Demanda-Oferta: Subsistema de Demanda.	62
Figura 25. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Demanda-Oferta: Subsistema de Oferta y generación de viajes.....	64
Figura 26. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de costos: Subsistema de Costos fijos.....	65
Figura 27. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de costos: Subsistema de Costos variables.	66
Figura 28. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de ingresos.	66
Figura 29. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Utilidades	68
Figura 30. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Flota vehicular convencional. Subsistema de vehículos nuevos.	69
Figura 31. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Flota vehicular convencional. Subsistema de vehículos antiguos.....	70
Figura 32. Diagrama de flujos y niveles. Módulo cálculo de emisiones de CO _{2e}	72
Figura 33. Carga transportada por modo carretero con demanda de carga y crecimiento económico cero.	79
Figura 34. Emisiones de CO _{2e} con demanda de carga y crecimiento económico cero.	80
Figura 35. Oferta de carga con flota vehicular y compra de vehículos igual a cero	80

Figura 36. Emisiones de CO _{2e} con flota vehicular y compra de vehículos igual a cero.	80
Figura 37. Emisiones de CO _{2e} . Sensibilidad al paso de tiempo. Elaboración propia.....	81
Figura 38. Emisiones de CO _{2e} . Sensibilidad al método de integración. Elaboración propia.	81
Figura 39. Emisiones de CO _{2e} . Cambio en el crecimiento económico del país. Elaboración propia...83	
Figura 40. Emisiones de CO _{2e} . Cambio en el precio de los vehículos de carga. Elaboración propia. .83	
Figura 41. Comportamiento de las emisiones de CO _{2e} para el transporte de carga carretera en Colombia, escenario BAU. Elaboración propia.	86
Figura 42. Oferta vs demanda. Elaboración propia.....	87
Figura 43. Costos anuales vs Ingresos anuales. Elaboración propia.	87
Figura 44. Utilidad anual para reinvertir. Elaboración propia.	88
Figura 45. Compra vs desintegración vehicular. Elaboración propia.....	89
Figura 46. Comportamiento de la flota de vehículos de carga convencionales. Elaboración propia..89	
Figura 47. Escenarios para valuación de políticas para reducción de emisiones del transporte de carga carretera en Colombia. Elaboración propia.	91
Figura 48. Emisiones de CO _{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo escenario base y políticas. Elaboración propia.	94
Figura 49. Utilidad para reinversión del sub-sector escenario base y políticas. Elaboración propia. 94	
Figura 50. Emisiones de CO _{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo escenario multimodal e implementación de políticas. Elaboración propia.	96
Figura 51. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo escenario multimodal e implementación de políticas. Elaboración propia.	96
Figura 52. Emisiones de CO _{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo bajo escenario innovación e implementación de políticas. Elaboración propia.....	97
Figura 53. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo bajo escenario innovación e implementación de políticas. Elaboración propia.	98
Figura 54. Emisiones de CO _{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo bajo escenario de alta eficiencia e implementación de políticas. Elaboración propia.	99
Figura 55. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo bajo escenario innovación e implementación de políticas. Elaboración propia.	99
Figura 56. Emisiones de CO _{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo la implementación de diferentes políticas regulatorias y escenarios. Elaboración propia.	100
Figura 57. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo la implementación de diferentes políticas regulatorias y escenarios. Elaboración propia.	101

Lista de Tablas

Tabla 1. Emisiones de CO _{2e} y consumo energético en diferentes etapas. (Villalobos & Wilmsmeier, 2016).....	19
---	----

Tabla 2. Valores de Potencial de Calentamiento Global (PCG) para diferentes GEI. (Shindell et al., 2013).....	24
Tabla 3. Designación de vehículos y PBV según legislación colombiana. Elaboración propia. (MinTransporte, 2014).....	31
Tabla 4. Medidas para mejorar la eficiencia energética y la emisión de GEI en vehículos automotores. (Villalobos & Wilmsmeier, 2016)	36
Tabla 5. Tabla resumen de la revisión de la literatura, elaboración propia.	50
Tabla 6. Especificaciones de los parámetros del modelo, elaboración propia.	78

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Oferta de Carga	62
Ecuación 2. Generación de Viajes anuales	63
Ecuación 3. Duración de un viaje	63
Ecuación 4. Costos Fijos por tonelada transportada	64
Ecuación 5. Costos variables por tonelada transportada	65
Ecuación 6. Ingresos.....	66
Ecuación 7. Utilidad Anual	67
Ecuación 8. Desintegración vehicular	69
Ecuación 9. Consumo de combustible por vehículo	70
Ecuación 10. Cálculo de emisiones de cada uno de los GEI.....	71
Ecuación 11. Cálculo de emisiones CO _{2e}	71

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
GEI	Gases de Efecto Invernadero
CC	Cambio Climático
CA	Contaminación Atmosférica
CG	Calentamiento Global
SC	Sistema Climático
CO _{2e}	Dióxido de Carbono Equivalente
WTW	Well To Wheel

WTT	Well To Tank
TTW	Tank To Wheel
GNV	Gas Natural Vehicular
GNL	Gas Natural Licuado
GNC	Gas Natural Comprimido
ACPM	Aceite Combustible Para Motores
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
BanRep	Banco de la República de Colombia
MinTransporte	Ministerio de Transporte de Colombia
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
RUNT	Registro Único Nacional de Tránsito
TRM	Tasa Representativa del Mercado
PIB	Producto Interno Bruto
IVA	Impuesto al Valor Agregado
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

1. Introducción

En la actualidad la tierra está atravesando por eventos que no ocurrían hace más de 3 millones de años: 415 partes por millón (PPM) son las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) (Scripps Institution of Oceanography, 2019) en esos tiempos las temperaturas eran 2° a 3°C más cálidas y el nivel del mar era 10 m mayor (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería, 2016) Todas las toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) que el humano genera en la ejecución de sus diferentes actividades no son posibles de absorber en su totalidad por la biósfera: tan solo se atrapa el 25% por los bosques y 25% por los océanos (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019). Esto, a lo largo de los años de industrialización, ha generado cambios en los ciclos del planeta y el efecto invernadero, que ha traído consigo, cambios en el clima global. Desde la época pre industrial, el ser humano, ha causado un aumento en la temperatura media del planeta de $\sim 1^\circ\text{C}$. Científicos de todo el mundo y entes internacionales, alertan sobre las catástrofes que se darían con un aumento de la temperatura de 1.5°C , ocasionados por la modificación de muchos ciclos naturales del planeta, que pondría en riesgo la vida de todos los seres que la habitan (Masson-Delmotte et al., 2018). Durante los encuentros por el Cambio Climático (CC) se ha definido la meta de no sobrepasar el aumento de la temperatura global por encima de 2°C , pero a medida que el tiempo avanza y los efectos se hacen visibles, pareciera que esta meta no tiene la rigurosidad que se necesita. Inundaciones, difícil acceso al agua y a la comida, acidificación de los océanos, desplazamiento de personas y pérdida de biodiversidad, son algunas de las consecuencias de las que alertan los entes gubernamentales como el IPCC e investigadores del Cambio Climático (CC) de todo el mundo, si el aumento de temperatura llega y sobrepasa los 2°C , gracias a diferentes modelos de predicción. Y algunos de los efectos ya se están haciendo visibles: temporadas de lluvias más fuertes en la zona tropical, veranos más calientes e inviernos más benévolos en el hemisferio norte, aumento de la actividad de huracanes y tifones, aumento del nivel de los mares, derretimiento de los polos y nevados, entre otros. Algunas regiones se verán más afectadas en un principio que otras, los países más pobres son los que sufrirán especialmente debido a sus condiciones socioeconómicas y a su ubicación. Los países del norte gozarán de mejores

condiciones para la producción agrícola en un principio, pero a finales del siglo se generalizarán las consecuencias negativas en todo el mundo (Stern, 2006). Las predicciones de las investigaciones cobran importancia más que nunca, así como la concientización sobre la responsabilidad de los seres humanos en la aceleración de estos cambios y la necesidad de crear alternativas e iniciativas de mitigación y adaptación a todos los cambios que irá trayendo el CC en las diferentes partes del globo.

En el escenario global, la mayor cantidad de emisiones de GEI son aportadas por el sector energético, y el sector transporte se ubica en el cuarto lugar (Eickemeier et al., 2014). En Colombia la situación es diferente, el primer emisor de GEI es el sector forestal (Deforestación) seguido por el sector agropecuario y en tercer lugar se ubica el sector transporte, en el que se destaca el terrestre, el cual emitió 28 millones de toneladas de CO_{2e} en el 2012 según el último inventario nacional, de estas el 50% proviene del transporte de carga carretero (IDEAM et al., 2016).

El parque automotor de vehículos de carga en Colombia se caracteriza por su antigüedad (23 años es la edad promedio de la flota), falta de regulación y su ineficiencia tanto energética como logística, generan altos costos en el transporte de mercancías, en los productos como tal y gran cantidad de emisiones de GEI, de esta situación surge la necesidad de estudiar los trasfondos de toda la dinámica de este sector y qué acciones lograrán disminuir el alto consumo energético y las emisiones de CO_{2e} conservando el buen desempeño económicos de la actividad en el país.

Generalmente las personas en Colombia cuando piensan en transporte de carga lo relacionan con sus externalidades negativas: ruido, tráfico, contaminación y accidentalidad, pero olvidan que gracias a este sector es posible que las materias primas y los productos terminados estén disponibles en el lugar y momento en los que se necesitan, adicionalmente, alrededor de este, se tejen gran cantidad de empleos. Sin embargo, vale la pena identificar estas externalidades para ponerles fin, conocer sus causas, efectos y analizar las posibles soluciones. Ese precisamente es el foco de atención de esta tesis, más específicamente para las emisiones de

GEI que genera este segmento de la economía. Vale la pena recordar, que los vehículos de combustión interna, como los camiones, también son fuente de material Particulado (MP) y otros tipos de gases, que generan perjuicios de forma local en los centros urbanos, y están estrechamente ligado a enfermedades respiratorias y cardiacas, pero que no se encuentran dentro del volumen de control del trabajo.

En el mundo cada año son más evidentes todas las consecuencias y efectos generados por el CC causado por las emisiones de GEI a la atmósfera. De esta preocupación surgen pactos internacionales, elaborados por las diferentes naciones en pos del cuidado del planeta y sus ciclos naturales, preservando las condiciones idóneas para la vida. Uno de ellos, se firmó en 2015 con la celebración del acuerdo de París, en dicho acuerdo Colombia se comprometió ante la comunidad internacional a reducir todas las emisiones generadas por los sectores de su economía en un 20% para el año 2030, teniendo en cuenta el escenario proyectado para este mismo año. Sin embargo, según el más reciente reporte del IPCC, serán necesarias medidas más drásticas y reducir en mayor cantidad las emisiones de GEI.

Estas acciones además de mitigar el impacto generado por las emisiones de GEI, favorecerán a que el país modernice su economía, a que proteja más sus recursos naturales, a que aumente la eficiencia en las industrias y a crear conciencia en los ciudadanos para fomentar la creación de una sociedad menos contaminante, con procesos industriales bajos en carbono.

El propósito de este trabajo es evaluar el impacto de diferentes políticas de reducción de gases de efecto invernadero en el transporte de carga por carretera en Colombia, recopilando información actual, local y confiable, con el fin de conocer la real cantidad de emisiones que genera el transporte de mercancías terrestre interurbano en todo el territorio nacional a 2019. Con estos datos se pretende realizar modelos de diferentes escenarios planteados con la ayuda de la dinámica de sistemas, para determinar cuáles serían los cambios o acciones que más aportarían a la descarbonización del transporte de carga carretera y así, promover iniciativas que ayuden a cumplir las metas propuestas por el gobierno para el año 2030 aumentando la

reducción en los años posteriores y como consecuencia, que Colombia se consolide como una nación baja en carbono.

El trabajo también pretende obtener las respuestas a las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles son las políticas que generarán mayor reducción de las emisiones de GEI generadas por el transporte de carga terrestre en Colombia?
- ¿Cuáles son los factores que inciden para que el transporte de carga emita grandes cantidades de GEI a la atmósfera en Colombia?
- ¿Qué objetivo de reducción de emisiones de GEI es el más alcanzable o adecuado?

La forma de abordar el problema se divide en los capítulos de la tesis de investigación, la información que se brinda en cada capítulo se resume así:

En el capítulo 1 de esta tesis, se presenta por medio de la introducción, las generalidades del foco de estudio de este trabajo investigativo, su propósito y la importancia de investigar en esta área.

En el capítulo 2, se dan a conocer los antecedentes y la justificación del problema seleccionado mediante datos y cifras tanto globales como locales. En este capítulo también se explica cómo es el actual funcionamiento del sistema desde diferentes partes que se relacionan, es decir, se explicará la realidad del sector transporte en Colombia.

En el capítulo 3 se agrupan y se describen los diferentes conceptos teóricos y científicos que fueron útiles para la resolución y entendimiento del problema, además que el lector deberá, también, conocer para entender la problemática descrita de manera más profunda y entender los resultados y conclusiones.

En el cuarto capítulo agrupa y describe trabajos científicos más recientes, que han estudiado el mismo problema y lo han analizado desde diferentes metodologías, se describe en este apartado cuales fueron las conclusiones, retos, recomendaciones y trabajo futuro de dichas investigaciones.

Los objetivos de la presente tesis, se muestran en el capítulo 5, aquí se pueden identificar los específicos y el objetivo general.

En el capítulo 6 se describe cual fue la metodología seleccionada para analizar el problema de estudio del presente trabajo, se presentan las razones por las que se seleccionó dicha

metodología. Luego, se pasa a describir el modelo y cómo este fue desarrollado, se explican las variables que lo integran, el horizonte temporal, el paso de simulación, el software utilizado y demás puntos que se consideren relevantes con respecto a la metodología, al final del capítulo se describe el proceso de validación al que se modela, es decir, de que su estructura y comportamiento sean lo más parecido a la realidad del sector, se exponen cuáles fueron los criterios para evaluarlo y que métodos se utilizaron para este propósito. Por último se reseñan los resultados del análisis de sensibilidad, que se le realizó a las variables que se consideran significativas en el modelo.

En el capítulo 7 se exponen los resultados de la investigación realizada y los escenarios y políticas que se aplicaron al modelo.

Finalmente en el octavo capítulo, se describen las conclusiones, recomendaciones y el trabajo futuro en esta área.

Al final del trabajo, se enlistan todas las referencias y bibliografía en el que se apoyó el presente trabajo investigativo.

A continuación, en el capítulo de antecedentes, el lector se pondrá en contexto sobre la situación actual del problema que se está abordando en esta tesis.

2. Antecedentes

- **Mundo**

El sector transporte, que incluye transporte de pasajeros y mercancía en sus diferentes modos, en el 2015 fue el responsable del 14% de las emisiones totales de GEI mundiales, de acuerdo a la figura 1, el modo predominante en cuanto a generación de contaminación son los vehículos livianos seguidos por los vehículos pesados (Peet et al., 2018), en cuanto a términos energéticos, el sector transporte fue el consumidor del 19% de energía final en el planeta, en 2013. Esto ha ocasionado que en el 45% de los países, el transporte, es la principal fuente de emisiones de CO_{2e}, y de no realizar cambios para mitigarlas, el transporte podría llegar a generar 15 Giga toneladas (Gt) de emisiones GEI para el 2050 (Villalobos & Wilmsmeier, 2016).

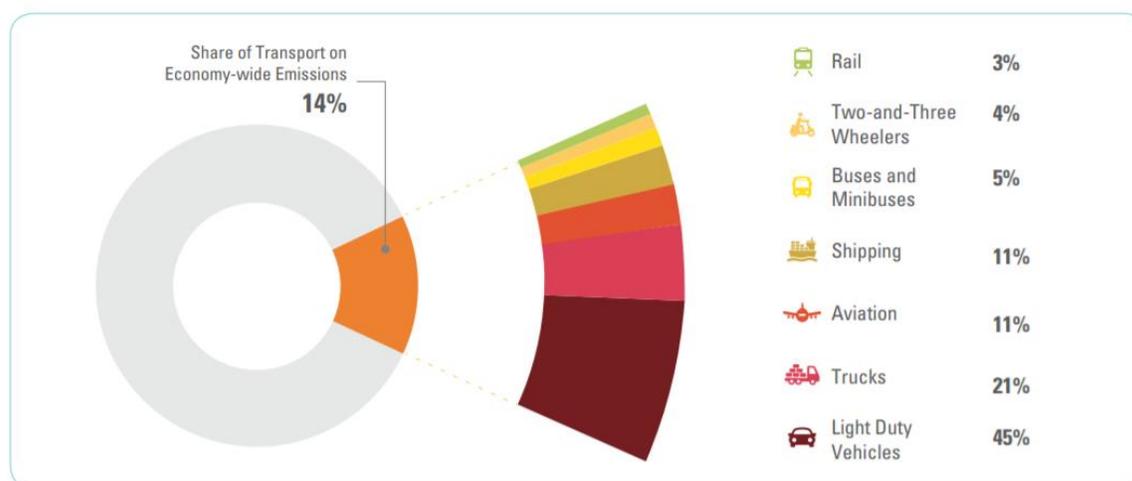


Figura 1. Distribución de las emisiones de GEI emitidas por el transporte por modo. (Peet et al., 2018)

Observando con detalle la figura 1, el transporte de carga carretero es el responsable del 21% de las emisiones del sector, sin embargo, en el reparto modal mundial, no es el que más carga transporta, tan solo lleva alrededor del 20% del total de la carga global, como se muestra en la figura 2, esto hace que la situación sea crítica, ya que las emisiones por tonelada de mercancías transportadas en este modo (gCO_{2e}/Ton transportada) es mucho mayor que en el marítimo, por ejemplo, y la tendencia mundial, como se aprecia en la misma figura, es que este modo gane más terreno en el segmento de carga. En esta figura, también se aprecia que

para este segmento el modo carretero es el responsable del 80% de las emisiones de GEI y del consumo energético, aproximadamente.

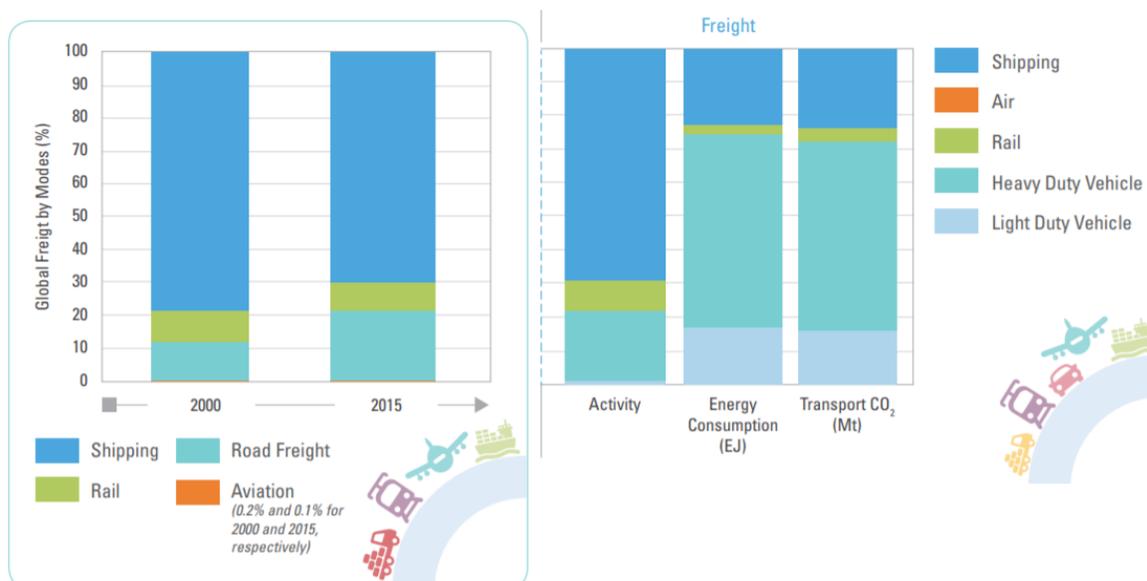


Figura 2. Reparto modal mundial del transporte de carga, participación en transporte, consumo de energía y emisiones de GEI. (Peet et al., 2018)

• Colombia

En el año 2012 Colombia emitió 258,8 millones de toneladas (Mton) de CO_{2e} (Contribución del 0.46% de las emisiones totales mundiales), de los cuales 28,2 Mton fueron responsabilidad del sector transporte, ver figura 3 (IDEAM et al., 2016). Esto ubica a este sector como el tercero que más emite GEI con un 11% de participación del total nacional, después del sector forestal (36%) y agropecuario (26%), en las que se generan altas tasas de emisiones debido a la deforestación y la ganadería. Es importante destacar que tanto el sector forestal como el sector agropecuario también realizan absorciones de CO_{2e}, lo cual no hace el transporte, poniéndolo en una situación más crítica aún. El sector forestal para el 2012 emitió 94 Mton de CO_{2e} y absorbió 30 Mton, el sector agropecuario por su parte emitió 66 Mton de CO_{2e} y absorbió 44 Mton (IDEAM et al., 2016)

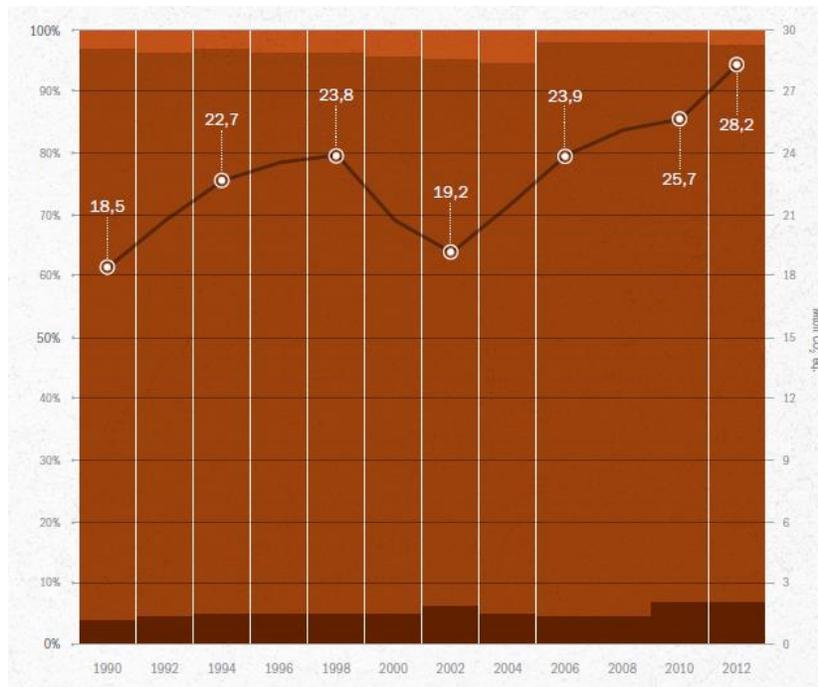


Figura 3. Emisiones de CO_{2e} sector transporte en Colombia de 1990 a 2012. (IDEAM et al., 2016)

Y es que el transporte se identifica como el sector de mayor consumo de energía final en Colombia: 40% del total nacional (UPME, 2016). En términos energéticos, para 2015 su consumo fue de 494.541 TJ, siendo su principal fuente de energía los combustibles fósiles, como el diésel o ACPM (Aceite Combustible Para Motores) y gasolina, de aquí que sus emisiones de GEI sean tan elevadas. Apenas en los últimos años, la movilidad eléctrica ha cobrado importancia, pero apenas logra un 1% de participación como fuente energía para la tracción de los vehículos (Andemos, 2019) su crecimiento es ideal, ya que sus emisiones son cero en la etapa de TTW (del tanque a la rueda), aunque aún hay muchas dudas acerca del funcionamiento de los vehículos de carga eléctricos en terrenos escarpados y empinados como los tiene la topografía colombiana. En cuanto a otros tipos de combustibles en el parque automotor se encuentran vehículos con motores a gas, un combustible un poco más “limpio” que el diésel (CEPAL, 2018), los vehículos que funcionan con gas en Colombia son en gran mayoría automóviles particulares, buses de transporte público, vehículos recolectores de basura y algunos camiones, principalmente participantes de pruebas piloto.

El gobierno nacional en su misión de identificar las emisiones por tipo de vehículo, realizó una caracterización de este sector y sus participantes, evaluando el porcentaje de emisiones de GEI y el consumo de energía. En la figura 4 se resumen los datos obtenidos.

Como se puede observar, en esta figura, el transporte terrestre es el responsable del 90% de las emisiones de GEI en el país generadas por transporte de carga y pasajeros, dichas emisiones son generadas en iguales proporciones por los viajes de carga y por los viajes de pasajeros, pero para el caso de carga los viajes que más contaminan son los viajes interurbanos hechos por vehículos de carga, con un 40%, es decir que para 2012 estos vehículos generaron alrededor de 11.2 Mt de CO_{2e}, y es que en Colombia, el 73% de la carga es transportada en camiones, según la encuesta origen destino realizada en 2013, se transportaron 220 Mt este año mediante este modo (GSM & Ministerio de transporte de Colombia, 2014).

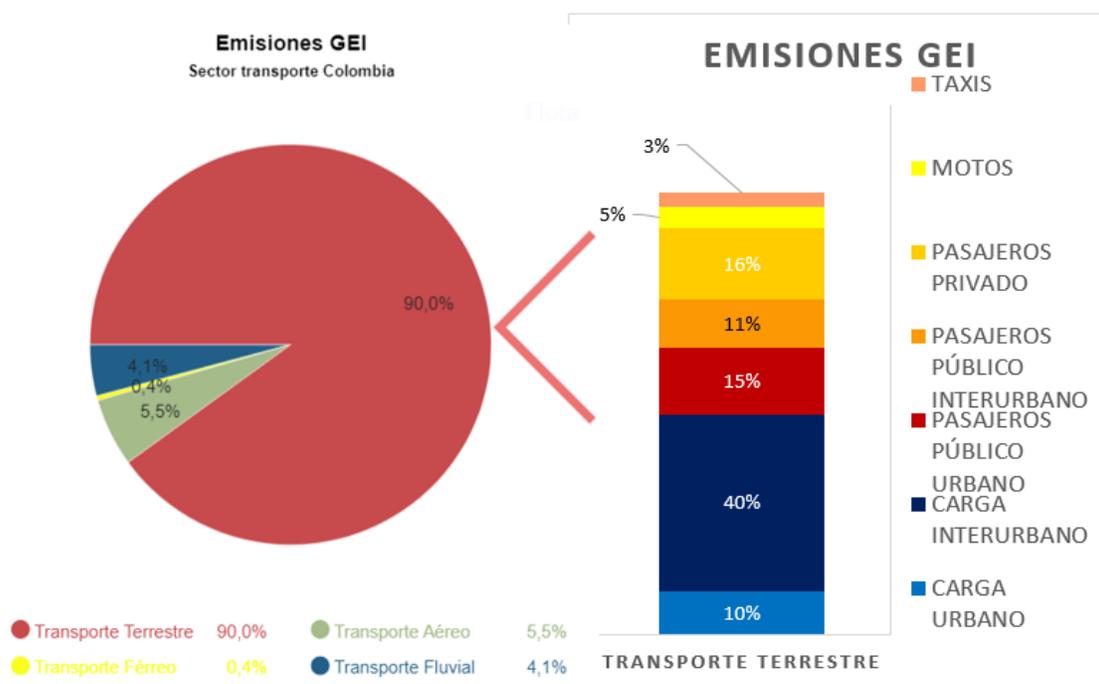


Figura 4. Emisores de GEI del sector transporte en Colombia (Ministerio de transporte de Colombia & ECDBC, 2014)

Al 2019, el país alberga 14'751.044 vehículos en su parque automotor, de esta cifra 57% son motocicletas, el 42% son vehículos y el 1% son tipificados como vehículos, maquinaria, remolques y semirremolques (RUNT, 2019). Según Colfecar, el 2018 cerró con 372.714

vehículos de carga, de esta cifra el 72% son camiones, 15% son tracto camiones y el 13% restante, son volquetas (COLFECAR, 2018).

Con el panorama actual, y si el parque automotor colombiano continua con la misma tendencia de crecimiento y con unos números de vehículos desintegrados tan bajos, para el año 2040 se prevé un monto de emisiones que pueden alcanzar los 70 millones de toneladas de CO_{2e} para todo el sector, y para el transporte de mercancías carretero sus emisiones se podrían doblar para dicho año, como se observa en la figura 5 (Behrentz, Espinosa, Joya, Peña, & Prada, 2014).

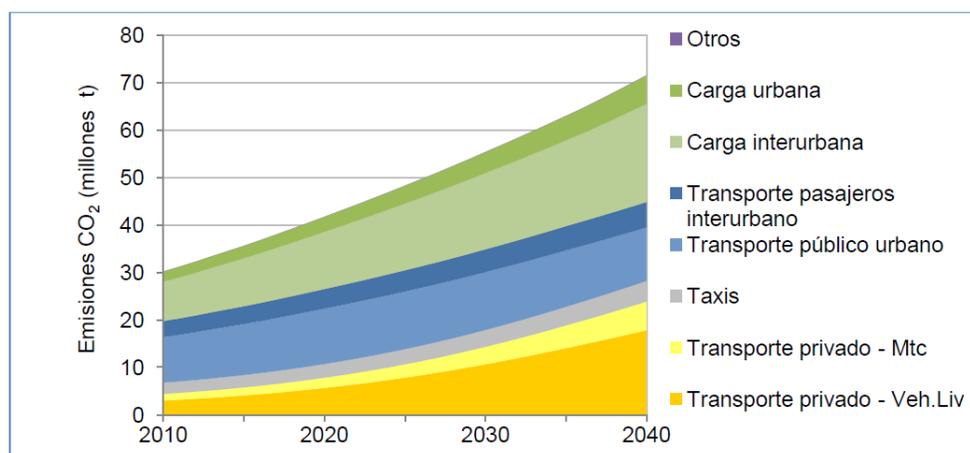


Figura 5. Emisiones proyectadas de CO_{2e} para el año 2040. (Behrentz et al., 2014)

Para el caso de los vehículos de carga, en los años 2013 y 2014, la flota de camiones tuvo un crecimiento inusual (ANDEMOS, 2014), según personas cercanas al sector, se debió a que desde 2015 comenzaba a regir el cambio de norma EPA a EURO en el país, de la cual poco se conocía en el gremio, adicional a esta razón, para este entonces se contaba con una Tasa Representativa del Mercado (TRM) que hacía que los vehículos importados no costaran tanto en la moneda local y había un buen crecimiento económico (4.9% de 2013 a 2014) (BanRep, 2019b). Después del año 2015 las ventas de camiones y tracto camiones cayeron considerablemente, desde entonces y solo hasta el cierre del año 2018 se vio un aumento en los números (ANDEMOS, 2019), entre las razones, muy probablemente están las pocas utilidades que ha dejado la sobreoferta y los picos históricos que ha alcanzado la TRM. Por lo tanto, el parque automotor del país se ha tornado antiguo, en la figura 6 se ve como Colombia y República Dominicana se destacan porque sus flotas de carga superan los 20 años, mientras que el promedio de la región es 15 y de países de la OCDE es aproximadamente 8 años.

“Según el estudio realizado por E&Y para el MME en 2015, específicamente el 43% de los camiones tiene más de 25 años, mientras que solo el 15% de los tractocamiones alcanza esa edad.”(UPME, 2016).

Debido a estas condiciones, las emisiones son aún mayores ya que la eficiencia del motor al quemar el combustible es mucho menor en automotores más antiguos, así mismo otros componentes del auto dejan de funcionar correctamente, dejando escapar más GEI a la atmósfera(Villalobos & Wilmsmeier, 2016).

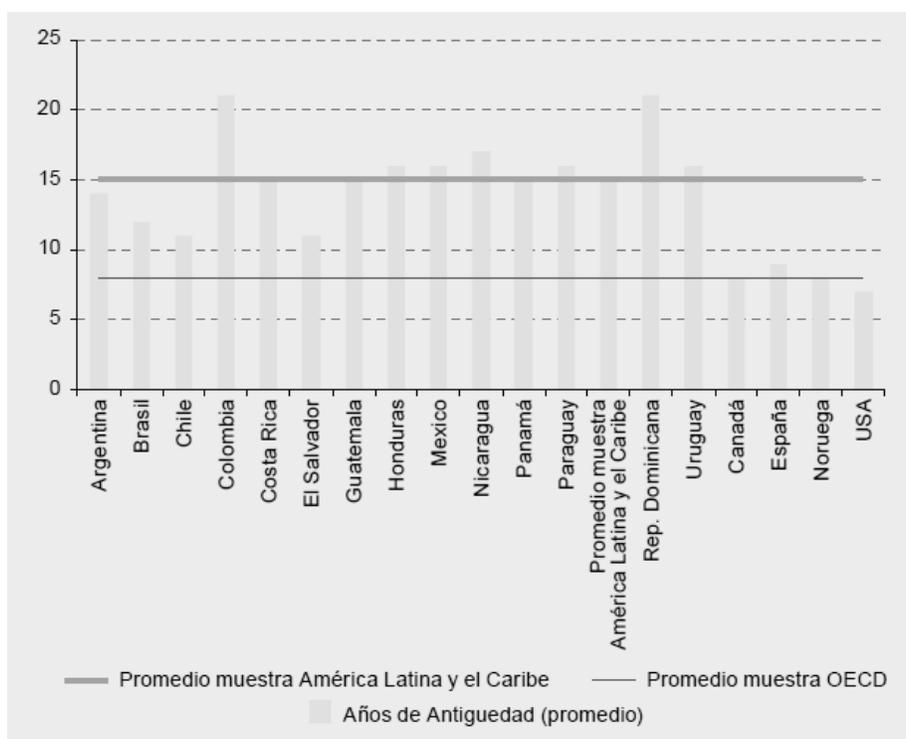


Figura 6. Edad promedio de las flotas de transporte de carga terrestre en América Latina y países perteneciente a la OECD. (CEPAL, 2018)

En Colombia no hay una política clara para el tema de chatarrización de vehículos de transporte terrestre, no existe norma alguna que indique la edad máxima para un vehículo de carga. El “CONPES 3759”, es el documento público donde se plasma todos los lineamientos para la modernización del parque automotor de carga, el plan que proponía la política contaba con un presupuesto de 1.1 millones de pesos y planteaba otorgar incentivos para entregar vehículos de más de 25 años de uso, pero desafortunadamente, por una serie de inconvenientes

el proyecto ya no se llevará a cabo, en los años en los que estuvo en marcha solo se alcanzaron a ejecutar 466.042 millones de pesos (Benitez-Piñeros, 2017a) y en ningún año se alcanzaron las metas trazadas. A pesar del plan de desintegración que se planteó en el CONPES, las cifras de desintegración vehicular siguen siendo muy pobres, el promedio sigue siendo de 3.400 vehículos que salen de las carreteras, solo en el año 2014 esta cifra se elevó a casi 5.000 camiones, pero estos números no son suficientes para disminuir la edad promedio del parque automotor de carga: “Para disminuir el número de vehículos de más de 20 años, que en Colombia son más de 93.967, deberíamos tener un ritmo de por lo menos 8.000 al año” (Juan Carlos Rodríguez, 2017), la información se resume en la figura 7.

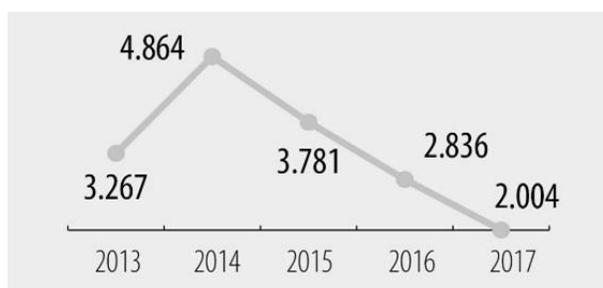


Figura 7. Vehículos desintegrados en Colombia de 2013 a 2017. (EditorialLR, 2018)

No obstante, el pasado mes de junio el gobierno nacional oficializó su nuevo programa de sustitución de camiones y desintegración para vehículos de carga mayores a 10,5 t, mediante el decreto 1120 de 2019 (MinTransporte, 2019). Con este se prevén exenciones de impuestos como el IVA, y la política se realizará uno a uno: por cada vehículo que se desintegre se dará cupo a uno nuevo, eso sí, que cumpla norma EURO V. También entre las propuestas estarán las facilidades de créditos y reconocimiento de hasta un 40% del valor del vehículo para los pequeños propietarios (Delgado-Gómez, 2019).

En los últimos años esta actividad se ha caracterizado por muchas ineficiencias económicas, logísticas y energéticas. Uno de los problemas más grandes de este segmento es que la oferta de transporte de mercancías supera por mucho a la demanda (Benitez-Piñeros, 2017b), generando grandes costos y pocas utilidades, también por esta razón se realizan muchos viajes

en vacío o con muy poca carga, generando, además de ineficiencia energética, otras externalidades negativas como mayor deterioro de la infraestructura vial (UPME, 2016).

Los propietarios de los vehículos de carga son en su mayoría personas naturales (70%) mientras que el 30% restante pertenecen a empresas legalmente constituidas, características que se muestran en la Figura 8. Para una persona natural, con las pocas utilidades que deja esta actividad económica, se le dificulta renovar su flota o realizar los mantenimientos necesarios, además, tampoco están en la capacidad de hacer análisis financieros y estratégicos que mejoren sus condiciones económicas, esto se ve reflejado en los costos de exportación que se presentan en la figura 9.

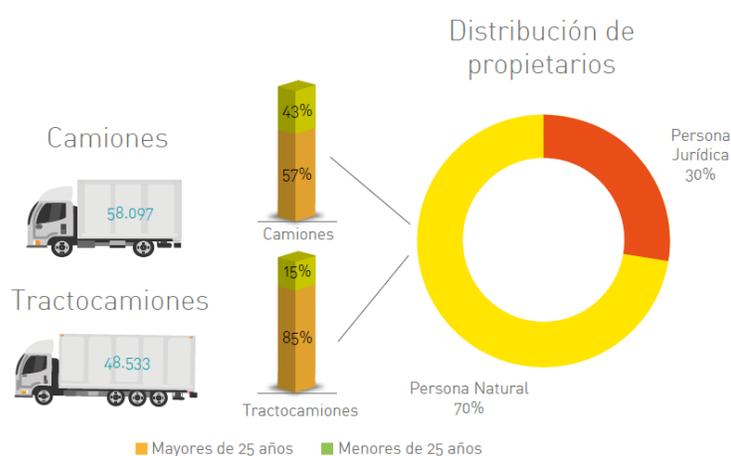


Figura 8. Características del segmento: Transporte de carga carretero (UPME, 2016)

La regulación por parte del estado es casi nula, desde 1997 el ministerio de transporte ofrecía una tabla de fletes según el origen y el destino, este método era criticado porque, de alguna manera, al garantizar el pago a los menos eficientes evitaba que el sector fuera más innovador y competitivo, en el año 2011 estas tablas se abolieron para dar paso a un esquema llamado “libertad vigilada” y ahora hay un servicio en la red para conocer los costos según el viaje, fijar unos costos eficientes de operación y en caso de encontrar fallas en el mercado, la entidad regulatoria debería intervenir, este método suena bien, sin embargo, los presidentes de las asociaciones no lo han encontrado favorable.

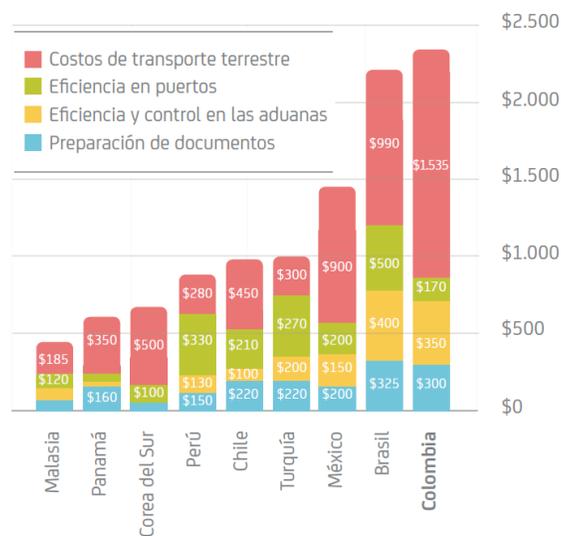


Figura 9. Costos totales de exportar una mercancía en USD por contenedor. (Felfle, Angulo, & Cardona, 2015)

La situación del subsector se ha vuelto crítica en varios períodos de la historia, algunos factores como la sobreoferta de carga, los fletes o tarifas, una infraestructura deficiente y el alza de precios de los combustibles han generado movilizaciones de los transportadores para presionar algún tipo de intervención gubernamental, aun así, debido al manejo mediocre que se le ha dado al segmento, en la actualidad se echan de ver muchas de los efectos que algunos autores pronosticaron, como jornadas de trabajo excesivas, falta de una buena gestión de los activos (mantenimiento, operación, desintegración) y poca renovación de la flota (Bocarejo, 2011).

Aun así, el transporte de carga es un gran generador de empleo en el país. Según el Observatorio Laboral y Ocupacional, para el 2017 y 2019 se generaron 2.283 y 2.907 colocaciones para conductores de vehículos pesados, respectivamente (contribución del 8.2% en generación de empleo) (DNP, 2019)

Uno de los causantes de dichas ineficiencias del sector se debe a las debilidades de la infraestructura vial y de los otros modos de transporte de carga, ocasionadas por debilidades en las políticas de desarrollo en infraestructura por parte de los gobiernos, tan solo el 47% de las vías están en “muy buen” y “buen” estado, mientras que el restante 53% son vías pavimentadas que se encuentran en “regular”, “mal” y “muy mal” estado. A principios del siglo

XX, la infraestructura de transporte de carga del país se centró en la construcción de la red férrea, la cual tuvo su cúspide alrededor de los años de 1960 con las redes del Atlántico y el Pacífico, moviendo cerca de 6.4 millones de toneladas. Desde esta época, por diferentes factores políticos y de desarrollo, la inversión del estado comenzó a favorecer a la red vial, en detrimento de las infraestructuras de los otros modos de transporte como la férrea y también la fluvial. Por esta razón, el comportamiento del reparto modal para transporte de carga inclina su balanza hacia los camiones. Para la década de los 50, el país contaba con una infraestructura para el transporte de mercancías aceptable, según las condiciones de demanda y crecimiento económico de la época, pero en la primera década del siglo XXI, se evidenció un abandono del gobierno en la mejora de la infraestructura vial que no permitía los avances requeridos por el país en ese momento y a futuro, lo que ocasionó un atraso grande frente a sus países vecinos (la red pavimentada en buen estado se redujo un 18% desde 2002 hasta 2012, y las carreteras en mal estado pasaron de 9% a 22%). Por esta razón, el gobierno comenzó a recuperar y mejorar su red vial mediante los proyectos de “Vías 4G” y con proyectos a largo plazo, con el fin de recuperar el transporte férreo, con la construcción del tren del Carare y la movilidad fluvial con la recuperación de la navegabilidad del río Magdalena (UPME, 2013).

El sector transporte también se identifica por su ineficiencia energética, las pérdidas del sector alcanzan el 82%, representando el 65% del total de las pérdidas energéticas en el país (UPME, 2016), la preocupación se remarca al saber que son los combustibles fósiles su principal fuente de energía, por lo tanto, si Colombia quiere descarbonizar su economía deberá empezar por este sector. Las ineficiencias están relacionadas con muchos factores, comenzando con la geografía y topografía colombiana que hacen que sus carreteras se construyan en terrenos escarpados, haciéndolas costosas y de difícil construcción, lo que perjudica la calidad de la infraestructura vial y por ende los consumos altos de combustibles, pues el consumo de combustible puede llegar a ser cinco veces mayor en montaña que en terreno plano (Nocera & Cavallaro, 2016). La edad media del parque automotor también es uno de los factores que inciden en los números (Colombia tiene un retraso de 13 años en tecnología de motores

aproximadamente) y adicional a esto, el país no se destaca por educar y capacitar a sus conductores para que operen los vehículos de la forma más eficiente posible (Mesa, 2019b). El ACPM o diésel, representa el 37% de los energéticos utilizados por el transporte, superado por la gasolina (40%), en cuanto al consumo de diésel, los camiones y tractocamiones, usan el 53% del este combustible. En la figura 10 se observa con más detalle los consumos del sector en el país, el transporte de carga interurbano es el tercer subsector que más consume energía del transporte terrestre, con un consumo de 80.683 TJ, en galones de combustible, según los estudios de la UPME, los vehículos de carga consumieron alrededor de 795 millones de galones al año, en el 2015.

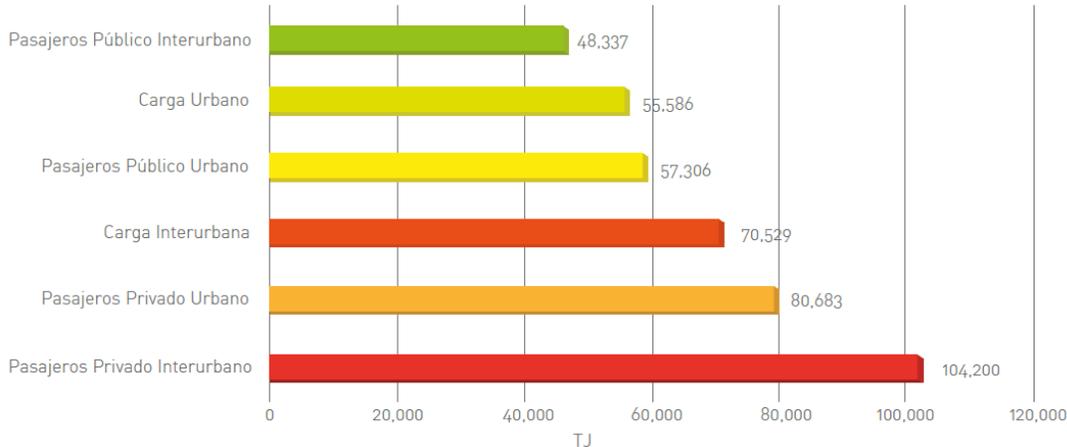


Figura 10. Consumo de energía del transporte terrestre en Colombia por segmento. (UPME, 2016).

A pesar de que hay países con mejores infraestructuras para los modos de transporte diferentes al carretero, la tendencia en la logística del transporte global se ha inclinado por el transporte terrestre, debido a la facilidad de consolidación de un camión frente a un tren, por ejemplo. Colombia no ha sido ajeno a esta preferencia logística, como se dijo anteriormente, el 73% de las mercancías en el país se transporta en camiones, sin embargo, el país ha trazado una hoja de ruta mediante el “Plan Maestro de Transporte Intermodal” en donde se propone aumentar la participación de los modos fluvial y ferroviario. Lamentablemente en este plan, no se muestran cifras exactas de las expectativas de crecimiento de otros modos de transporte como el ferroviario y el fluvial, solo se exponen los presupuestos para el desarrollo de estos. Existen algunas estimaciones realizadas por otros entes gubernamentales, como el

Departamento Nacional de Planeación (DNP), los cuales apuntan a que para el 2030 el reparto modal del país será 66% para el carretero, 29% para el férreo y 5% para el fluvial, sin embargo, tanto en la actualidad como en el mediano plazo, el 90% de las mercancías que se transporta y se transportará por ferrocarril es y será carbón (Mejía, 2018).

Debido a la escasa renovación del parque automotor de carga, las tecnologías de los motores son obsoletas y no cumplen estándares exigentes que en otros países si están haciendo cumplir. En el mundo existen diferentes estándares de emisiones para los motores de combustión interna, estos estándares y los lugares donde se han implementado se pueden ver en la figura 11, estos en general controlan las emisiones de gases como NO_x, SO_x y MP, actualmente Colombia ha adoptado el estándar europeo desde el 2014: EURO, de este estándar hay 6 ediciones, tanto para vehículos livianos como para vehículos pesados, para este último, hay normatividad para vehículos diésel, duales (diese-gas) y dedicados a gas.

Según la resolución 1111 del 2013 del ministerio de medio ambiente, desde finales del 2014 los vehículos pesados del país deben cumplir con el estándar EURO IV (MinAmbiente, 2013).

Sin embargo, según expertos, actualmente, el 98% la flota de vehículos de carga en Colombia, sigue cumpliendo la norma norteamericana EPA 98, la cual era la antecesora de la EURO IV, lo cual nos ubica en 13 años de atraso tecnológico en cuanto a motores diésel, como se dijo anteriormente, esto significa, que a pesar de que los combustibles mejoren su calidad, los antiguos camiones del país seguirán emitiendo grandes cantidades de gases contaminantes, y finalmente no se cumplirán los estándares. Los estándares de emisiones más importantes se observan en la figura 11.

Worldwide Emission Legislation Overview HD On-Road CI-Engine 2014

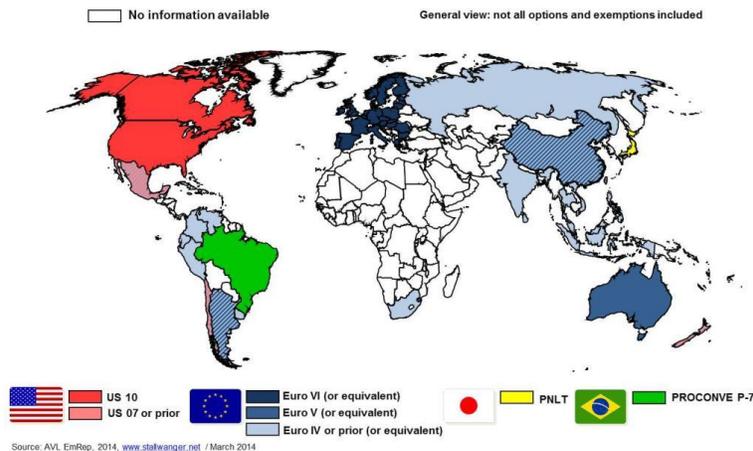


Figura 11. Normatividad mundial de emisiones para vehículos pesados a 2014. (Engine Mobile Filtration Team, 2015)

En Colombia la calidad del combustible es aceptable, y debido a las contingencias por contaminación en los grandes centros urbanos del país, se ha venido mejorando en los últimos años, según datos de Ecopetrol de 2013, el diésel que se provee en casi todo el territorio colombiano tiene una concentración menor a 50 partes por millón (ppm) de dióxido de azufre (SO_x), en comparación con la región, solo Chile tiene una legislación más exigente: 15 ppm o menos, pero en ciudades como Bogotá y Medellín ya se comercializa diésel con 25 ppm (Engine Mobile Filtration Team, 2015) y se espera que este año se disminuya el contenido de SO_x en el diésel de 23 a 18 ppm para dichas ciudades (Vogt, 2018) sin embargo, falta un combustible de calidad para el resto del país.

Pero a pesar de que se comercialicen combustibles mucho más limpios, si se tienen vehículos muy antiguos y que no cumplen las normas actuales, no se generará la reducción de emisiones esperada debido a las bajas eficiencias de estos motores obsoletos (Mesa, 2019a).

Adicional a la calidad del diésel, Colombia se está quedando corto en las mezclas con biocombustibles. Para el caso del biodiesel, según el decreto número 2629 de julio 10 de 2007 (MinMinas, 2007), desde 2010 la mezcla de biodiesel-diésel debía ser 10-90, pero sólo apenas

a Marzo del 2018 la mezcla está cumpliendo la norma (Domínguez, 2018). Desde el año 2012 todos los vehículos o máquinas que funcionen con diésel deben estar diseñadas para funcionar con una mezcla 20-80, aunque aún es incierto para cuándo se aumentará el porcentaje de biodiesel a estos parámetros una mezcla B7 produce menos cantidad de CO₂ por kilómetro versus el diésel convencional en la etapa de Tank To Wheel o del tanque a la rueda (TTW), ver la tabla 1.

Cuadro 2
Emisiones de CO₂ y consumo energético en las diferentes etapas

Tipo de vehículo	Emisión de CO ₂ (g CO ₂ /km)			Energía Utilizada (MJ/100km)		
	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW
Eléctrico	78	0	78	52	118	170
Híbrido Gasolina-Electricidad	36	75	111	52	116	168
Híbrido Diesel-Electricidad	36	68	105	52	107	159
Biodiesel	-101 a -22	125	44 a 103	45-437	163	207-600
B7-Biodiesel (FAME) hasta 7% v/v con Diesel	14-19	120	137-140	31-56	163	193-219
Etanol	-127 a 30	146	19-176	187-427	204	391-630
E10-Etanol hasta 10% v/v con Gasolina	17-28	150	166-178	48-64	204	252-268
E85 - Etanol hasta 85% v/v con Gasolina	-82 a 29	143	61-171	142-312	199	341-459
GNC (EU-mix)	30	132	163	38	232	271
Biometano	-290 a -33	132	-158 a 99	231-503	232	463-736
GLP	17	142	160	26	216	241
Gasolina	29	156	185	39	211	250
Diesel	25	120	145	33	163	196

Tabla 1. Emisiones de CO_{2e} y consumo energético en diferentes etapas. (Villalobos & Wilmsmeier, 2016)

En cuanto a las tecnologías y combustibles alternativos, en el país apenas están empezando a caminar algunos vehículos pesados funcionando con gas natural vehicular (GNV), es importante incentivar este cambio, pues la combustión del GNV es más completa, haciendo que las emisiones al quemar este combustible sean menores a las de la combustión del diésel, como se puede identificar en la tabla 1. Actualmente se han realizado pruebas piloto con camiones compactadores de basura (EPM, 2015) y ya se hizo la compra de los primeros vehículo de carga con motor a gas comprimido (GNC) en Valle del Cauca y en Antioquia (Mouthón, 2018), desafortunadamente la autonomía de esta tecnología es muy baja (200-300 km) como para recorrer las distancias en Colombia, pues aún es difícil encontrar donde cargar GNC en carretera (Mesa, 2019b). Por el momento en el país no han se han realizado pruebas

con vehículos que funcionen con gas natural licuado (GNL), el cual ofrece autonomías de hasta 1.000 km (CEPAL, 2018).

Una de las pocas regulaciones que afecta al transporte de mercancías y a la mitigación de sus emisiones de GEI es el Impuesto Nacional al Carbono, se creó mediante la ley 1819 de 2016 (Congreso de la República de Colombia, 2016), y es una de las herramientas que el gobierno nacional ha aplicado con el fin de desincentivar el uso de los combustibles fósiles y cumplir las metas de mitigación de emisiones de GEI. Los combustibles que se encuentran gravados por medio de este impuesto son la gasolina, el diésel o ACPM, el kerosene, jet fuel, fuel oil y gas natural (pero solo para uso en industrias de hidrocarburos y petroquímica), uno de los puntos que ha generado controversia es que la combustión del carbón no debe pagar este impuesto. Para el diésel, el impuesto se cobra en la compra del líquido, y para el 2017 se pagaba a \$135 COP por galón, que finalmente se traduce en pagar por emitir 1 tonelada de CO_{2e}, aproximadamente \$16.000 COP/TonCO_{2e} (MinAmbiente, 2017). En un principio el impuesto recaudado iba a ser utilizado para la protección del medio ambiente y temas relacionados con los compromisos adquiridos en la COP21, pero actualmente se desconoce para que se está utilizando.

Los grandes consumidores de combustibles fósiles como las empresas privadas de transporte de carga pueden comprar bonos de carbono que emitan empresas colombianas, en el mercado de carbono del país, para evitar pagar todo el impuesto y generar ahorros, de esta manera también se incentiva la creación y el desarrollo de proyectos que mitiguen los GEI y crear más bonos de carbono, las reglas del juego se establecieron mediante el decreto 926 de 2017 (MinHacienda, 2017) (Pardo, 2018).

La descripción y datos anteriores resumen como es la actualidad del mundo y de Colombia en materia de políticas, tecnologías y acciones, es decir, el panorama a 2019 y a mediano plazo. Esta información pretende contextualizar y reflexionar sobre todas las acciones que se pueden tomar para alcanzar las metas propuestas para el 2050. Tanto en el país como en el resto del globo, las circunstancias son similares, en algunos países ya se viene trabajando para mitigar

las emisiones de GEI, gracias a esto se dan a conocer diversidad de iniciativas que se deben plantear y evaluar en Colombia para lograr los objetivos pactados en las cumbres internacionales para la mitigación y adaptación al CC.

A continuación, se explicarán los conceptos más relevantes para entender a cabalidad el presente trabajo de investigación, algunos ya se han analizado y otros se utilizarán en capítulos posteriores.

3. Marco teórico

3.1. Cambio climático

3.1.1. Cambio Climático, Calentamiento Global y Efecto Invernadero

Con el fin de entender como fenómenos como el Calentamiento Global, cambiarán los ciclos naturales de la tierra y por ende, muchas de las costumbres humanas y de los demás seres, es importante tener claros algunos conceptos básicos de las ciencias del clima, ya que este es el resultado de diferentes y simultáneas interacciones entre factores terrestres y externos.

El **clima** de la tierra, reúne las condiciones fluctuantes promedio de la atmósfera por períodos determinados de tiempo (horas, días, años, décadas, etc.) y en un sitio dado, el concepto de clima frecuentemente se confunde con el de **Tiempo Atmosférico (TA)**, que es la descripción de las condiciones atmosféricas en un único instante de tiempo. En términos generales el Clima puede ser definido como el promedio de los TA (Le Treut, Somerville, Cubasch, & Et al., 2007). El **Sistema Climático (SC)**, es el conjunto de los componentes en el sistema geofísico, la atmósfera y otros factores, que juntos determinan el clima. Estos cinco componentes son la atmósfera misma, el océano, la superficie de la tierra, las superficies de hielo/nieve y la biósfera (terrestre y marina), mientras que los factores de fuerza externa como el sol, los parámetros de la órbita del planeta, la topografía de la tierra, la composición básica de la atmosfera y el océano son, también, parte fundamental de esta interacción (Houghton, 2002). Por tanto, el **Cambio Climático (CC)** hace referencia al cambio del clima promedio de la tierra que ha sido generado de forma directa o indirecta por las actividades que realizan los seres humanos, en comparación con la variabilidad natural que este debería haber tenido sin la intervención de las personas (WMO, 2018). Las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso de la tierra (deforestación) son las que más han contribuido a la generación de **Gases de Efecto Invernadero (GEI)**, los cuales, en concentraciones normales en la atmósfera, preservan el calor en la parte baja de esta por medio del fenómeno natural conocido como **Efecto Invernadero (EI)** en el cual, dichos gases absorben y emiten la radiación solar

permitiendo que se den temperaturas aptas para que exista vida en el planeta, sin la existencia de este fenómeno la temperatura de la superficie terrestre sería aproximadamente de -18°C (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015). Desafortunadamente, debido a las emisiones antropógenas de GEI que han ido aumentando desde la “Era Preindustrial” por el crecimiento demográfico y económico, el calor de la superficie terrestre está aumentando de forma inusual y acelerada lo que hace “sumamente posible” que esta sea la causa del aumento de la temperatura terrestre a los ritmos actuales y no naturales o lo que se conoce como **Calentamiento Global (CG)** (Eickemeier et al., 2014), esta tendencia se viene dando desde principios del siglo XX, pero se ha acentuado desde la década de los 70. Desde 1880 a la fecha, la temperatura promedio de la superficie terrestre ha aumentado alrededor de 1°C (NASA, 2019).

El CC en las últimas décadas ha causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todo el globo, cambios en los patrones de precipitaciones y nubosidad, derretimiento de las montañas nevadas y del hielo de los polos, aumento de la temperatura y acidez de los océanos, pues estos son uno de los más grandes sumideros de calor y GEI. El IPCC, ha realizado proyecciones para el siglo XXI y se espera que con el escenario base BAU (*Business As Usual*) o sin cambiar las costumbres de la actualidad, las emisiones de GEI continuarán aumentando y para 2100 la temperatura promedio de la tierra se elevará a 3°C aproximadamente, lo que generará cambios aún más devastadores. A pesar de que la humanidad lleve sus emisiones de GEI a cero hoy en día, la temperatura de la tierra seguirá aumentando.

Todas las regiones del planeta se verán afectadas de alguna u otra manera con el CC, se dará un aumento en la intensidad de eventos extremos como huracanes, inundaciones y sequías, pérdidas de biodiversidad (expertos afirman que con un aumento de la temperatura de la superficie de la tierra de 2°C , el 30% de las especies y hábitats se extinguirán), todo esto traerá consigo problemas sociales también, y se prevé que los países en vía de desarrollo serán los más afectados debido a sus condiciones socioeconómicas (UNFCCC, 2007).

3.1.2. Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Como se explicó previamente, los **GEI** son aquellos gases que están presentes en la atmósfera que generan el EI, entre los GEI naturales más importantes se destacan el vapor de agua (H_2O) y el Dióxido de Carbono (CO_2). El Metano (CH_4), el Óxido Nitroso (N_2O), Ozono (O_3) y otros gases presentes en la atmósfera también contribuyen con el efecto, entre ellos varios antropógenos, como el Hexafloruro de azufre (SF_6), los Hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC)(IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015). Debido a las emisiones de GEI antropógenas generadas desde hace dos siglos por la Revolución Industrial y a la expansión de la agricultura, las concentraciones de GEI en la atmósfera han pasado de 278 partes por millón (PPM) a 414,7 PPM en el 2019, pico alcanzado en Mayo (NOAA, 2019) lo que supone que los esfuerzos realizados hasta el momento para disminuir las emisiones de GEI no han sido suficientes.

Para realizar las mediciones de los GEI, se utiliza el **Potencial de Calentamiento Global (PCG)**, el cual se expresa en unidades de masa (gramos, kilogramos y toneladas) de CO_2 que es el gas de referencia, con el PCG se comparan los niveles de radiación infrarroja que atrapa en la atmósfera un GEI dado, al multiplicar las emisiones de CH_4 y N_2O , por ejemplo, por el factor de PCG se obtienen los valores en la medida de referencia que es el **Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2e})**. Los valores de referencia son calculados y actualizados por el IPCC con un horizonte dado, generalmente 100 años, estos valores se encuentran en la tabla 2 (Rodríguez, Villalva, & Saavedra, 2016).

	Lifetime (yr)	GWP		GTP	
		Cumulative forcing over 20 years	Cumulative forcing over 100 years	Temperature change after 20 years	Temperature change after 100 years
CO_2	^b	1	1	1	1
CH_4	12.4	84	28	67	4
N_2O	121.0	264	265	277	234
CF_4	50,000.0	4880	6630	5270	8040
HFC-152a	1.5	506	138	174	19

Tabla 2. Valores de Potencial de Calentamiento Global (PCG) para diferentes GEI. (Shindell et al., 2013).

3.1.3. Mitigación del cambio climático

Con el fin de evitar que las emisiones de GEI causadas por las actividades humanas generen una interferencia peligrosa en el SC, la humanidad está apostándole a la mitigación del CC, acciones por las cuales se reducen o se evitan las emisiones y se potencian los sumideros de GEI, para estabilizar las concentraciones en la atmósfera de dichos gases y con ello poder proporcionar el tiempo necesario para la adaptación de los ecosistemas al CC (Pachauri et al., 2014). Ya que aún los efectos del CG no son tan devastadores, urge la necesidad de evaluar posibles políticas, estrategias y cambios tecnológicos que permitan proceder con el crecimiento económico de una manera sostenible, es decir, plantear un crecimiento bajo en carbono (UNFCCC, 1992).

3.1.4. Adaptación al cambio climático

A pesar de que las emisiones de GEI se detuvieran instantáneamente, el CG no se detendría, y la tierra seguiría aumentando su temperatura en al menos 0,5°C más durante las próximas tres décadas, debido a que los gases que ya se encuentran en la atmósfera no se remueven rápidamente, es decir, tienen un tiempo de vida dado (ver tabla 3) (Houghton, 2002). Debido a esta realidad, todos los países deben prepararse para la adaptación a más cambios que traerá consigo el CC en la tierra y hacerle frente a un futuro incierto, ya que en la actualidad se están evidenciando algunas de las consecuencias del cambio en el clima global como lo son el aumento de la intensidad de las lluvias, huracanes, olas de calor, entre otras (Costa-Posada, 2007). La adaptación al CC, son todas las estrategias políticas e institucionales que buscan reducir el riesgo, la vulnerabilidad y los impactos socioeconómicos y eco-sistémicos que se puedan presentar en un futuro asociados al CC. En Colombia se creó el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) por medio del CONPES 3700 (DNP, 2011).

3.2. Transporte de carga

En su forma más sencilla, el transporte de mercancías o carga permite mover bienes de un lugar a otro (National Academies of Sciences, 2011), debido a esto, es uno de los pilares

fundamentales de las economías de todos los países, hace posible la mayoría de las actividades e intercambios sociales y económicos, esto lo hace una de las actividades más importantes de la humanidad, no solo en términos de Producto Interno Bruto (PIB), sino también por su influencia clave en el desarrollo y funcionamiento de las otras actividades económicas, es decir, es una actividad transversal (Crainic & Laporte, 1997). En conclusión, este sector es fundamental para que el movimiento de la economía mundial se dé de manera eficiente: “El transporte de carga es un componente clave de la cadena de suministro para garantizar el movimiento eficiente y la disponibilidad oportuna de materias primas y productos terminados” (SteadieSeifi, Dellaert, Nuijten, Van Woensel, & Raoufi, 2014).

En el campo del transporte de mercancías, hay diferentes tipos de actores y cada uno de ellos tiene determinados objetivos y recursos: Productores, Transportadores y Recibidores. También hay actores en su planificación como son entes públicos, privados y la academia, debido a lo complejo y delicado que resulta su funcionamiento.

3.2.1. Modos de transporte de carga

El transporte de carga tiene una dinámica bastante compleja, donde hay muchas partes interesadas y niveles de decisión, este sector ha tenido que adaptarse a todos los cambios sociales, económicos y políticos. La planeación y la gestión correcta de las tomas de decisiones aquí es fundamental. Para mantener esta eficiencia y eficacia, y permitir una la correcta planeación del transporte de mercancías los países cuentan con infraestructura que permite mover la carga en diferentes modos (SteadieSeifi et al., 2014), y según las diferentes características de los productos que se mueven, como la distancia a la que viajan, el tipo de producto, el costo y el tamaño, se seleccionan uno o varios modos, y así asegurar que materias primas y productos terminados lleguen en los tiempos pactados y en buenas condiciones. En la figura 12, se resumen las características de cada modo de transporte de carga, como costos, velocidad, confiabilidad y los productos que se envían por cada uno (Savy, 2009).



Figura 12. Características de los modos de transporte, elaboración propia. Fuente: (National Academies of Sciences, 2011)

Debido a la apertura económica que han afrontado la mayoría de los países en la segunda mitad del siglo XX, el **modo marítimo** es el que más toneladas de mercancías transporta en el mundo para el comercio exterior, debido a su gran capacidad, a las grandes distancias que puede recorrer y al bajo costo, este se realiza por medio de barcos cargueros, pero es un transporte que suele tomar muchos días.

Para el transporte interno de los países el **modo camionero o carretero** es el que prima, este es aquel que se realiza por calles o carreteras, generalmente se hace en vehículos motorizados de gran capacidad desarrollados especialmente para este fin, pero también puede realizarse en vehículos livianos e inclusive motocicletas, los cuales son comunes realizando este tipo de actividad en zonas urbanas. Es el modo más ampliamente utilizado en la mayoría de los países, ya que proporciona flexibilidad y rapidez, pero es más costoso que otros modos como el férreo. En Colombia es el modo más utilizado con una participación del 73% y acarreando el 99% de los productos si se excluye el carbón (Clavijo et al., 2014).

Para realizar transporte interno, muchos países también utilizan el **modo férreo**, el cual se realiza por medio de trenes de carga o mixtos (pasajeros y carga), se caracteriza por ser económico y la posibilidad de transportar gran cantidad de carga por unidad tractora. En este modo se tiende a llevar productos de bajo valor y gran volumen, como granos, aunque también se transportan bienes más costosos pero masivos como partes de automóviles. Se usa para largas distancias que queden sobre el mismo territorio continental. En Colombia el 26% de la carga total se transporta por vía férrea pero el 99% de estos productos es carbón (Clavijo et al., 2014)

Si los bienes a transportar son delicados, valiosos o tienden a descomponerse con facilidad, como las flores, el **modo aéreo** es el más usado para estos casos, como su nombre lo indica, se realiza por aire por medio de aviones. Se puede realizar en aviones comerciales de pasajeros y en aviones dedicados al transporte de carga. Es el más rápido, pero es el más costoso de los modos, puede llevar mercancía entre continentes en cuestión de horas.

El **modo fluvial**, es aquel realizado por ríos, pero para que los ríos sean navegables deben contar con ciertas características especiales. En Colombia, se está tratando de recuperar la navegabilidad del río Magdalena, el cual es el río que cubre más territorio del país (Mejía, 2018) Este modo es muy utilizado en países como Holanda, ya que cuenta con la infraestructura, niveles de agua apropiados y canales bien adaptados para realizar el transporte tanto de carga como de personas.

Hay otro modo de transporte que no es muy conocido, y son los **ductos**, son sistemas compuestos por tubos, válvulas y bombas, y suelen transportar materias primas líquidas como el petróleo, gaseosas como el metano y lodos (partículas finas suspendidas en líquidos).

Cada país maneja la intermodalidad de su sector de manera diferente, dependiendo de su estructura social (demanda-oferta), las distancias geográficas, la topografía, los recursos hídricos, si hay presencia de costas, de sus límites geográficos, entre otros factores (National Academies of Sciences, 2011) (Savy, 2009).

3.2.2. Vehículos de carga

Según la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4788, en la cual se basa la normatividad colombiana por medio de la Resolución 4100 de 2004, un vehículo de carga “es un tipo de vehículo autopropulsado o no, destinado al transporte de mercancías por carretera. Puede contar con equipos adicionales para la prestación de servicios especializados” es decir, son los vehículos automotores, en su mayoría, que por su configuración, tamaño y fuerza, son destinados para el transporte de mercancía, animales, materiales para construcción y/o manufactura, alimentos, combustibles y/o elementos químicos, entre otros.

3.2.2.2. Tipos de vehículos de carga

Según la legislación colombiana, los vehículos de carga se caracterizan según número de ejes y su configuración: si es un camión rígido (C), si tiene semirremolque (S) o remolque (R). Los vehículos de carga en Colombia generalmente se dividen en dos grandes tipos, **camiones** y **tractocamiones**, los primeros son vehículos automotores con **Peso Bruto Vehicular (PBV)** superior a cinco toneladas y que por su configuración se usa para el transporte de carga, en la figura 13 se puede ver con detalle la estructura de estos vehículos. Por otro lado los **tractocamiones**, se componen de una unidad tractora que se conecta a un **remolque** o **semirremolque** y lo hala, cuando la unidad tractora se conecta a uno o más remolques, recibe el nombre de **vehículo articulado**, los componentes de un tractocamión se pueden observar en la figura 14. Dependiendo de la distribución del peso y la posición de las llantas, las unidades de carga adicional pueden ser **semirremolques** o **remolques**, en la figura 15 se puede ver con más claridad la diferencia entre estos dos. El **PBV** es una medida de clasificación de los vehículos y es el peso del vehículo en condiciones de marcha más la carga máxima que puede transportar, en la tabla 4, se encuentra como se clasifican los vehículos de carga en Colombia, y cuáles son sus principales características. Generalmente para clasificar estos vehículos se utiliza el número de ejes de ruedas, el tipo de unidad que hala y el PBV.

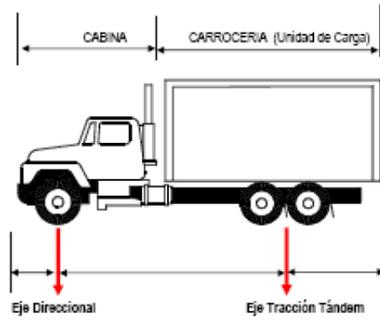


Figura 13. Componentes de un camión, tipo de vehículo de carga: C3. Fuente: (MinTransporte, 2014)

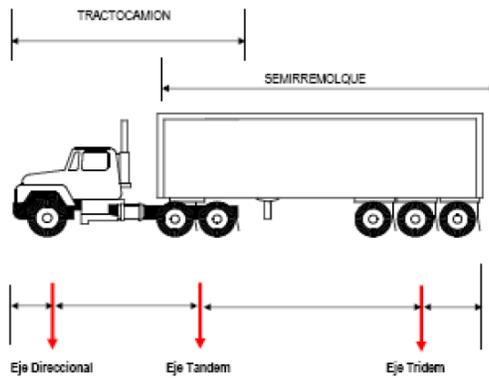


Figura 14. Componentes de un tractocamión, tipo de vehículo de carga: C3S3. (MinTransporte, 2014)

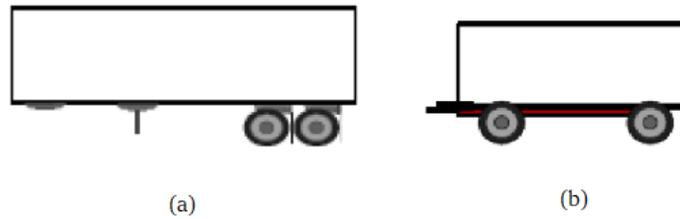


Figura 15. Componentes de un tractocamión, tipo de vehículo de carga: C3S3. (MinTransporte, 2014)

VEHÍCULOS	DESIGNACIÓN	PBV MÁX [ton]
Camiones Rígidos	2	16
	3	28
	4	31
		36
		32
Tractocamión con remolque	2S1	27
	2S2	32
	2S3	40

VEHÍCULOS	DESIGNACIÓN	PBV MÁX [ton]
	3S1	29
	3S2	48
	3S3	52
Camión con semirremolque	R2	16
	2R2	31
	2R3	47
	3R2	44
	3R3	48
	4R2	48
	4R3	48
Camión con remolque balanceado	2B1	25
	2B2	32
	2B3	32
	3B1	33
	3B2	40
	3B3	48

Tabla 3. Designación de vehículos y PBV según legislación colombiana. Elaboración propia. (MinTransporte, 2014)

3.2.3. Vehículos de carga y motores

- **Vehículos de combustión interna (MCI)**

Los modos de transporte de carga son caracterizados por el tipo de vehículo y el medio por el que este se mueve de un lado a otro. En la actualidad, la mayoría de estos vehículos que transportan pasajeros y bienes, son propulsados por motores, en el mundo se han desarrollado gran cantidad de tecnologías de motores, dependiendo de su fuente de energía. En la primera parte de esta sección se explicarán las generalidades de los motores más ampliamente usados para dar tracción a los vehículos, estos son los motores de combustión interna.

Los **motores de combustión interna** (MCI) son aquellos que convierten la energía química de la oxidación de los **combustibles** con un **comburente** (aire), en energía térmica y luego en

energía mecánica o movimiento. La gran presión que se genera dentro del sistema hace mover las partes mecánicas de este, una parte de esta energía térmica se aprovecha en energía mecánica y el resto se disipa en calor. Este movimiento es lo que finalmente se termina convirtiendo en la propulsión de máquinas o vehículos como automóviles, camiones, trenes, aviones y barcos.

El motor de combustión interna tiene sus inicios en la segunda parte del siglo XIX, y coincide con el desarrollo del automóvil.

Los MCI, tienen varias clasificaciones, en las que se resalta por su tipo de ignición, por los ciclos (dos tiempos y cuatro tiempos), por la ubicación de las válvulas, su diseño (Reciprocantes y Rotatorios), por el proceso de admisión del aire, por el método de entrada del combustible y por el combustible que usan (**gasolina, diésel, gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), etanol, biodiesel o combustibles combinados**, entre otros) (Pulkrabek, 1997).

Según el tipo de ignición, se identifican los de **Ignición Forzada o por chispa** y los de **Ignición por Compresión**, en el tipo, es necesaria la presencia de una chispa, que es generada por una bujía, para iniciar la combustión de la mezcla del aire y el combustible dentro de la cámara de combustión del motor. Los segundos, la combustión se hace de forma autónoma debido a las altas temperaturas y altas presiones que se generan en el sistema de combustión.

La mayoría de los motores en la modernidad son de **Ciclo Otto**, el cual es de cuatro tiempos, su ignición es por chispa y el combustible que utiliza es la gasolina, estos son los motores que utilizan la mayoría de los automóviles o vehículos livianos de transporte de pasajeros y algunos vehículos de carga, aunque no es muy común. Otro ciclo muy común en los que se basan algunos MCI son los de **Ciclo Diésel**, estos son motores de ignición por compresión, de cuatro tiempos. Los motores diésel son muy utilizados para dar propulsión a los vehículos más grandes como camiones y autobuses. Los motores de **ciclo diésel** se caracterizan por tener mejores eficiencias y mayor torque (Pulkrabek, 1997).

Tanto la **gasolina** como el **diésel** son combustibles derivados del petróleo. La gasolina es una mezcla de varios hidrocarburos y es obtenida por un proceso de refinamiento llamado

destilación fraccionada. El **diésel** es un hidrocarburo líquido, que tiene varias clasificaciones según su peso molecular y viscosidad, y de esto dependen sus usos. El diésel es más pesado que la gasolina y tiene más poder calorífico (Pulkrabek, 1997).

3.3. Emisiones Motores diésel

En Colombia, la mayoría de los vehículos de carga funcionan con motores diésel, estos motores se identifican por tener una alta eficiencia, durabilidad y bajos costos de operación, así como la potencia necesaria para mover gran cantidad de peso. También se consideran como uno de los grandes generadores de contaminación ambiental por las emisiones de la combustión que realizan (Reşitoğlu, Altinişik, & Keskin, 2015).

A continuación se mencionan los principales gases de escape que emiten los motores diésel, los cuales producen una serie de impactos negativos tales como contaminación atmosférica, lluvia ácida, smog, malos olores y con ellos problemas para la salud de las personas y contribución al CC. La mayoría de los gases que se producen no son de la combustión estequiométrica, son separaciones del nitrógeno e impurezas que se hallan en el combustible y el aire, adicionalmente, debido a las condiciones donde se realiza la combustión depende que esta no se haga completamente, la composición común de los gases de escape de los motores diésel se resume en la figura 16.

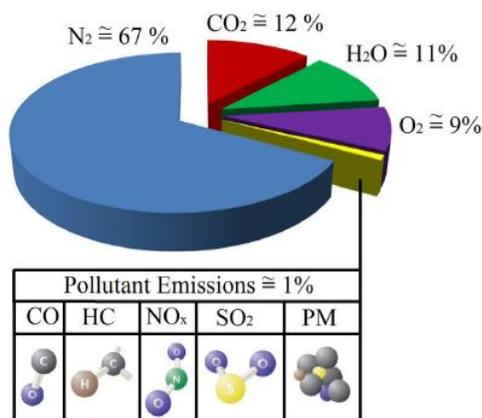


Figura 16. Composición de los gases del tubo de escape de los motores diésel (Reşitoğlu et al., 2015)

De la combustión de los MCI diésel se generan emisiones de los tres GEI y otros gases, que no contribuyen al efecto invernadero, pero que si generan molestias en la salud y son un gran problema en los grandes centros urbanos, donde suelen quedarse atrapados y alcanzar concentraciones peligrosas. A continuación se explicará un poco de los gases de escape que son generadores de EI y se explicarán brevemente los otros gases que están presentes en la combustión del diésel.

El **Dióxido de Carbono (CO₂)** no atenta contra la salud de las personas y animales pero es uno de los gases de escape que contribuyen al CG, de hecho, es el GEI más importante y es el que más se emite en la combustión del diésel (Iniestra & Franco, 2009). Este gas resulta de la combustión estequiométrica del diésel, por cada litro consumido de diésel se emiten alrededor de 2.7 kg de este gas. Se caracteriza por ser un gas incoloro, inodoro y no es inflamable. Desafortunadamente, los convertidores catalíticos no pueden reducir estas emisiones, contrario a los escapes de **Metano (CH₄)** y **Óxido Nitroso (N₂O)**, que si pueden disminuirse con un convertidor catalítico estos son otros gases que salen del tubo de escape de los vehículos con motor diésel (Natural-Resources-Canada, 2014). El Metano y el Óxido Nitroso son GEI, generados por una combustión incompleta. El CH₄ tiene un potencial de calentamiento 28 veces mayor al del dióxido de carbono, pero con la diferencia que este permanece en la atmósfera aproximadamente 12 años (Iniestra & Franco, 2009). El Metano es un gas incoloro y es inflamable (Natural-Resources-Canada, 2014). El Óxido Nitroso a veces es agrupado como un gas del grupo de los NO_x, es un GEI, y su potencial de calentamiento global es 310 veces mayor al del CO₂, y puede permanecer más de 100 años en la atmósfera. Este es incoloro y no es inflamable (Natural-Resources-Canada, 2014).

En el grupo de gases contaminantes producto de la combustión, que generan efectos negativos de forma local como ciudades, se encuentran el **Dióxido de Azufre (SO₂)**, **Monóxido de Carbono (CO)**, **Hidrocarburos (HC)**, **Óxidos de nitrógeno (NO_x)**, **Ozono (O₃)**, **Material Particulado (MP)**, la mayoría de estos gases afectan la salud de las personas, sobre todo afectando al sistema respiratorio, algunos como el Dióxido de azufre y Óxidos de nitrógeno, son precursores de la lluvia ácida. Uno de los más peligrosos es el Monóxido de Carbono, ya

que en altas concentraciones puede causar muerte de personas y animales por envenenamiento.

Los HC y NOx son generadores del ozono y el smog fotoquímico, los cuales en las zonas bajas de la atmósfera son dañinos para el sistema respiratorio y otros tejidos y es dañino también, para los árboles y cosechas. El **Material Particulado (MP)** son las partículas que tienen mayores impactos en la salud humana, Las emisiones de MP de los motores diésel son de seis a diez veces mayores a los de los motores a gasolina. El MP se divide según su tamaño en μm : PM10 y PM2.5, el último es el más peligroso pues se aloja en partes más internas del sistema respiratorio, aumentando factores de coagulación de la sangre y agravando enfermedades cardiovasculares (Iniestra & Franco, 2009), (Pulkrabek, 1997).

Así mismo, dependiendo de la tecnología del vehículo (estándar EURO para Colombia), su año de fabricación y su sistema de control de emisiones, serán la cantidad y tipo de emisiones de gases y partículas. También, a mayor peso y potencia tenga el vehículo, sus emisiones serán proporcionalmente mayores por kilómetro (km) recorrido.

Los factores de operación como velocidad del vehículo, su mantenimiento, la forma de operación por parte del conductor, el ambiente de operación como congestión o la infraestructura vial y las características del combustible, también son factores determinantes a la hora de calcular sus emisiones de gases contaminantes (Correa Espinal, Cogollo Flórez, & Salazar López, 2010).

3.4. Nuevas tecnologías

Debido a que los vehículos con MCI son ampliamente usados en el mundo, las emisiones de GEI y los demás gases contaminantes que se emiten por el escape han alcanzado proporciones inimaginables. Para disminuir dicha cantidad de emisiones se han venido ideando cambios y desarrollando nuevas tecnologías en el área automotriz. Mejoras en cuanto a consumo y aerodinámica en los vehículos convencionales, e innovación en motores con fuentes de energía alternativas más limpias, son algunas de las propuestas. A continuación se darán a conocer

estas iniciativas que podrán generar un cambio radical y positivo en la mitigación del CC y en las economías de los países.

En primera instancia, las investigaciones se han centrado en los factores que inciden en la eficiencia energética de los vehículos de carga como son las resistencias tractoras y la aerodinámica, la forma de conducción de las personas, el peso de la estructura de los vehículos y otros aspectos menores como los lubricantes, los neumáticos, eliminar los tiempos en ralentí, entre otros. A raíz de esto se están ingeniando nuevas tecnologías para así disminuir el consumo de combustible, disminuyendo costos y emisiones, también se está diversificando en la fuente de energía de tracción de los vehículos, estas estrategias se resumen en la tabla 5 (Villalobos & Wilmsmeier, 2016).

Reducción del consumo de combustible:	Mezcla de combustibles con bajo contenido de carbono:	Vehículos de combustible alternativo (AFVs):
Electrificación de los sistemas de propulsión	Etanol (e5/e10)	Gas o biometano natural comprimido o licuado
Construcción de peso ligero	Biodiesel (b7)	Etanol (E85 a E100)
Optimización de auxiliares	Accites vegetales hidratados (hvos)	Gas licuado de petróleo
Aerodinámicos	Biomasa-a-liquido (btl)	La electricidad y el hidrógeno a partir de fuentes de baja emisión de carbono
Resultado: Vehículos climáticos eficientes en energía		

Tabla 4. Medidas para mejorar la eficiencia energética y la emisión de GEI en vehículos automotores. (Villalobos & Wilmsmeier, 2016)

En cuanto a combustibles menos contaminantes, se han realizado muchos esfuerzos para impulsar el uso del **biodiesel** y el **gas natural comprimido (GNC)** y **licuado (GNL)**. La **movilidad eléctrica** y a partir de **hidrógeno** también están comenzando a ganar terreno con prototipos, precios competitivos y disponibilidad para la carga, también hay muchas otras iniciativas para disminuir el consumo de los vehículos automotores en un 50% para 2050 (FIA Foundation, 2009). A continuación se mostrarán algunas de las tecnologías que se están probando para tener camiones más limpios y eficientes:

Los **Vehículos de Carga súper eficientes (VCSE)** generalmente son autos híbridos equipados con MCI, pero con rendimientos de combustible muy superiores frente a los camiones convencionales, registrando consumos de hasta 42 km por galón en condiciones de prueba, en cuanto a vehículos livianos, ya se pueden encontrar en el mercado automóviles con rendimientos de 100 km por galón. La clave para lograr estos consumos y tener vehículos ultra eficientes se suele complementar el MCI con otros dispositivos que generen energía (Vehículos Híbridos) (Bartlett, 2019), también existen innovaciones en los sistemas mecánicos de los MCI como mejorar el balance térmico, reducir las fricciones internas, desconectar los cilindros, dotar a los vehículos con embrague electrónico y automático, entre otros (Redacción Interempresas, 2018).

Los **Vehículos de Carga Híbridos (VCH)** son aquellos que utilizan dos fuentes de propulsión, generalmente un MCI y otro tipo de sistema de movimiento como un motor eléctrico o celdas de hidrógeno, el sistema de apoyo se utiliza cuando el vehículo acelera o va a una velocidad moderada, y le da la capacidad al vehículo de no quemar combustible mientras está detenido, el motor eléctrico se carga con la marcha o con frenos regenerativos. Los vehículos híbridos pueden contar con MCI a gasolina, diésel, GLP y Biocombustibles. También hay un tipo llamados “Plug-in” los cuales cuentan con un banco de baterías que se cargan conectándolos a una fuente de energía eléctrica externa, también cuentan con un MCI pero este funciona como fuente de energía de apoyo cuando las baterías se descargan, diferente a los vehículos híbridos convencionales (Agarwal & Dev, 2013). Debido a que los motores se complementan, el MCI puede ser más pequeño y esto genera rendimientos de 6 a 11% más que en un vehículo convencional (Lizette, Torre, & Domínguez, 2013).

Un ejemplo de VCH, es el prototipo que la cadena Walmart está desarrollando en conjunto con varios fabricantes de camiones, es conocido como WAVE (*Wal-Mart Advanced Vehicle Experience*). Este concepto tiene como fuentes de propulsión una micro-turbina que funciona con GNC, GNL o biocombustibles, la cual mantiene las revoluciones por minuto (RPM) en un punto óptimo y un motor eléctrico con baterías, que maneja la aceleración y desaceleración del vehículo (LA Times, 2015).

Los **Vehículos de Carga Eléctricos (VCE)** se caracterizan porque su fuente de propulsión es un motor 100% eléctrico que extrae la energía de un banco de baterías, las cuales se cargan conectándolas a una fuente de energía eléctrica externa, lo que se conoce como estación de recarga de vehículos, que puede estar en la ciudad como una estación de servicio de combustibles líquidos o en los hogares con conexión a la red eléctrica. También existen vehículos eléctricos conectados a la red eléctrica por medio de una catenaria, como los trenes y tranvías, y otros que utilizan **celdas de combustibles**, los cuales son dispositivos que, mediante una reacción electroquímica, generan energía eléctrica (Chan & Wong, 2004).

La movilidad eléctrica tiene sus inicios hace más de 100 años, pero frente a los vehículos de MCI tuvo la desventaja de la autonomía y el costo, lo que dejó a los vehículos eléctricos rezagados, solo hasta la crisis del petróleo en 1970, en el que los precios de los combustibles fósiles aumentaron drásticamente, la humanidad se volvió a interesar en los vehículos eléctricos, pero por la competencia con las compañías petroleras de nuevo se volvió a desincentivar los desarrollos en esta área (US-Department-of-Energy, 2015). En los últimos años, debido al CG y a la CA en las grandes urbes, los vehículos eléctricos han vuelto a coger fuerza. Los gobiernos están apostándole e incentivando su uso para mitigar las emisiones de GEI del escape de los vehículos, y se ha estado consolidando como una opción para todo tipo de personas y usos, como el transporte de carga, debido a que sus precios se han vuelto más competitivos al igual que su autonomía. Actualmente, los vehículos eléctricos presentan gran cantidad de ventajas respecto a los convencionales, son más eficientes, no producen emisiones y se integra con las fuentes renovables no convencionales de energía (López & Galarza, 2016).

Muchas compañías fabricantes de automóviles y motores, están desarrollando VCE, con motores que pueden otorgar muy buen torque lo que posibilitaría llevar más peso, con grandes autonomías (hasta 800 km por carga de energía) y tiempos de carga muy reducidos (1 hora) (Tesla, 2019).

Los **Vehículos de Carga de hidrógeno (VCHi)** utilizan **Hidrógeno (H₂)** como combustible, este puede ser generado a partir de muchos métodos y de diferentes compuestos, ya que a pesar de su abundancia en la naturaleza no se encuentra en su estado puro. Este combustible puede ser utilizado en MCI, mezclado o de forma individual, se puede generar energía eléctrica mediante oxidación en celdas de combustible (esta es la tecnología que utilizan la mayoría de los vehículos comerciales), por fusión nuclear y puede ser utilizado, inclusive, para fabricar otros combustibles sintéticos. Los primeros desarrollos que se dieron con el Hidrógeno datan de fechas posteriores a la primera guerra mundial y su uso es muy extendido en la industria química, actualmente hay muchos vehículos moviéndose con este combustible como buses, trenes y automóviles sin producir emisiones.

El H₂ se puede producir por medio de procesos termoquímicos, electrolíticos, biológicos y por descomposición foto-catalítica y biológica del agua. Este combustible se identifica por tener más energía que otros: 1 kg de Hidrógeno tiene casi el triple de energía que 1 kg de gasolina, por ejemplo. Lamentablemente, en la actualidad la producción de H₂ se realiza a partir de combustibles sólidos, lo que hace que su ciclo de vida no sea muy amigable con el medio ambiente, por esta razón se está impulsando la extracción de este del agua, lo que haría que este combustible sea más verde y renovable, aunque todavía sigue siendo un procedimiento ineficiente y costoso. Uno de los mayores retos para la expansión del uso del Hidrógeno como fuente de energía para vehículos es la gran inversión que se debe hacer en la estaciones de carga (Vásquez & Salinas, 2018). Los vehículos de carga de celdas de hidrógeno no se han hecho esperar, como el Nikola One, este tipo de camiones prometen tener una autonomía de hasta 1.200 km y con cargas de combustible en 15 minutos (Nikola-Corp, 2019).

Como se explicó anteriormente uno de los causantes de la ineficiencia energética son la forma de conducción de las personas y la aerodinámica de los vehículos (López & Galarza, 2016), por lo tanto los fabricantes de camiones están desarrollando **Vehículos de Conducción Autónoma (VA)**, provistos de sensores y cámaras, que conducen en los puntos de máxima eficiencia del

motor y están conectados a la red para conocer el tráfico vehicular y así evitar desperdiciar energía en congestiones. También, los nuevos diseños de la estructura de los camiones se fabrican en base a mejorar la resistencia al viento y disminuir el consumo de combustible, haciéndolos más **Aerodinámicos**, además de aprovechar las ventajas de materiales más livianos como la fibra de carbono como lo hace el camión WAVE (Transmetrics Corp., 2018)

Los vehículos como siempre los hemos conocido, están comenzando a cambiar de manera drástica en pro del cuidado del medio ambiente, es evidente que con estos nuevos desarrollos tecnológicos no solo se estará mejorando la calidad de aire o mitigando el CC, sino que también abre la ventana para que el transporte de carga sea más eficiente y menos costoso, se concluye que los cambios generados con el fin de mitigar las emisiones de GEI traerá consigo grandes beneficios en otros aspectos de la economía y en las vidas de las personas.

En el siguiente capítulo, se realizará la revisión de los trabajos académicos relacionados con la presente tesis, en las que se evalúan políticas de mitigación del CC, con respecto a las emisiones generadas por el transporte de mercancías, y se comentarán las principales características de dichos trabajos.

4. Revisión de la literatura

A continuación se realiza una síntesis de algunos trabajos de investigación que abordan una evaluación de políticas de mitigación de GEI para el sector transporte, más específicamente el de carga en diferentes países o regiones, analizados desde diferentes metodologías de modelación. La revisión se realizó entre los trabajos más recientes en el área y el objetivo fue, además de comprender la forma de abordar el problema, analizar las diferentes metodologías con sus ventajas y desventajas, identificar los principales retos en la materia y las conclusiones que las investigaciones han arrojado.

Los estudios realizados en cuanto al modelado de políticas y escenarios de reducción de emisiones de CO_{2e} de forma puntual para el transporte de carga carretera son escasos, por lo que se presentarán aquellos que sean similares a lo que se pretende en este trabajo, y las metodologías presentadas.

Las entidades gubernamentales también han realizado análisis de iniciativas que pretenden objetivos semejantes, estos estudios se analizarán en el capítulo de metodología, ya que son un punto de partida importante para la selección de las políticas y de cómo será su implementación.

Los trabajos de investigación más recientes en transporte y contaminación se dividen en dos grupos grandes: los que estudian el transporte urbano y la contaminación atmosférica (bien sea de pasajeros y carga) sin embargo, el sistema de transporte de pasajeros termina siendo el foco de los estudios ya que el mayor número de viajes que se realizan en una ciudad o área metropolitana son los de personas. Y aquellos trabajos que se centran en cambio climático, en donde se estudian las emisiones de GEI provenientes del transporte (pasajeros y carga) y estrategias para mitigar dichas emisiones.

Un ejemplo de investigaciones del primer grupo, es el de Martínez-Jaramillo y otros, (Martínez-Jaramillo, Arango-Aramburo, Álvarez-Uribe, & Jaramillo-Álvarez, 2017) donde realizan un análisis de gases contaminantes provenientes de las fuentes móviles para la ciudad

de Medellín mediante un modelo construido en la plataforma *Long-range Energy Alternatives Planning System (LEAP)* donde se puede realizar análisis a sistemas energéticos y de transporte por escenarios, en este trabajo concluyen que el aumento en infraestructura para el transporte público de pasajeros y de carga es una de las estrategias que más ayudarían a reducir las emisiones de gases contaminantes, para el caso de carga se plantea la construcción de un sistema férreo multipropósito urbano. También concluyen que la modernización tecnológica de los vehículos y los combustibles son claves para disminuir la contaminación en las grandes centros urbanos, aunque estas iniciativas no fueron modeladas.

Vafa-Arani y otros (Vafa-Arani, Jahani, Dashti, Heydari, & Moazen, 2014), hicieron un análisis similar, en este caso para Teherán (Irán), por medio de la metodología de Dinámica de Sistemas desarrollaron un modelo para estimar el comportamiento de los parámetros que afectan la contaminación del aire en esta ciudad y evaluaron políticas de mitigación. En este estudio, además del sector transporte (carga y pasajeros), también se incluyó la contaminación causada por la industria. Concluyeron que los cambios en los combustibles y el desarrollo del transporte público son estrategias casi que obligatorias para alcanzar los objetivos.

Como se explicó anteriormente, el otro gran grupo son los estudios que analizan el sector transporte en el ámbito nacional, algunos se centran en pasajeros, otros en carga y otros en ambos, aquí los estudios se concentran en mitigar las emisiones de GEI, con el fin de que los países cumplan los compromisos de reducción de emisiones.

Javid y otros (Javid, Nejat, & Hayhoe, 2014) analizan el potencial de mitigación de CO_{2e} de estrategias de reducción, evasión y reemplazo asignadas para Estados Unidos, evaluándolas bajo dos escenarios regionales: ciudad mediana y un área metropolitana, bajo un Proceso Jerárquico Analítico (*Analytic Hierarchical Process*) que es un abordaje multi-criterio, a esta metodología se le complementó con encuestas realizadas a profesionales de ciencias del clima y transporte. Se concluyó que el escenario óptimo de reducción de emisiones contenía una mezcla de las estrategias, y que este permitía mitigar el 17% de las emisiones para el 2030.

Otros estudios como los de (Luo et al., 2016) evalúan políticas para reducir las emisiones de GEI del ámbito nacional pero cerrando la evaluación a ciertas regiones, en este analizan diferentes políticas de mitigación de emisiones para el transporte de carga en todos sus modos, y lo compararan con los factores socioeconómicos de 3 regiones de China por medio de la metodología LMDI (*Log Mean Divisia Index*), se concluyó que una mayor participación del modo férreo es importante para el crecimiento sostenible de las regiones. El reto es mejorar la calidad de la información y conocer el impacto del costo de la implementación de las iniciativas, también resaltaron la importancia de la entrada de nuevas tecnologías más limpias.

Para la evaluación de un corredor importante de carga, Van der Merwe y otros (van der Merwe, Lewis, Cohen, & Naudé, 2015), realizan el modelado mediante Dinámica de Sistemas bajo escenarios de distintos porcentajes de reparto modal entre transporte carretero y férreo, para un corredor específico de transporte de mercancías en Suráfrica, teniendo en cuenta las opiniones de los diferentes tomadores de decisión en el subsector. Evalúan la entrada del modo férreo a diferentes tasas, y concluyen que un reparto modal con mayor participación de este modo es necesario para el desarrollo de la región y para la mitigación de GEI, el trabajo futuro propone definir el impacto de los costos de implementación y precisar la confiabilidad del transporte de carga por vía férrea ya que esta es una limitante para los tomadores de decisión.

Yu y otros (Yu et al., 2014) también realizan la evaluación sectorizada, en una ciudad portuaria de China, en este estudio utilizan la Dinámica de Sistemas para analizar el transporte terrestre implicado y su relación con la economía de la ciudad, con el fin de desarrollar un reparto modal que haga más sostenible y eficiente el sistema, se concluye pues, que una mayor inversión a futuro en el modo férreo generará los objetivos del puerto y no entrará en conflicto con la movilidad dentro de la ciudad.

Liu y otros (Liu, Mu, & Gong, 2017) abordan el problema con la misma metodología (DS), pero se centran en estudiar el sobrepeso de los camiones en los viajes intermunicipales, ya que las acciones de prohibición del gobierno Chino no han tenido resultados satisfactorios, y proponen una mejora en el reparto modal para solucionar este inconveniente logrando así, una mejor

sostenibilidad ambiental y un buen desempeño del sector. Se modelaron varios escenarios con la construcción de diferentes tipos de ferrocarril (dependiendo de su capacidad), y se concluye que se debería invertir en el ferrocarril de más capacidad, sin embargo, como trabajo futuro se desea modelar las acciones que tomarían transportadores con camión para competir contra el ferrocarril y las implicaciones socio-económicas que esto traería.

El trabajo Nocera y otros (Nocera & Cavallaro, 2016) se centra en el análisis del transporte de carga y sus emisiones de CO₂ Well-To-Wheel (De la fuente a la rueda) en una región continental que es compartida por varios países: los corredores transalpinos de Europa. También se realiza una evaluación económica vía *Meta-Regression*. En esta investigación evalúan la adopción de medidas como permisos para transitar, certificados de emisiones y un sistema de peajes diferenciados. Todos presentaban buena cantidad de reducción de emisiones, no obstante, los permisos para transitar arrojaban mejores resultados a 2030. Los investigadores destacan la dificultad de implementar medidas en una zona fronteriza como esta, debido a diferencias políticas y tecnológicas que son propias de cada país.

El estudio de Espinosa y otros (Espinosa Valderrama, Cadena Monroy, & Behrentz Valencia, 2019) se desarrollan un modelo para evaluar políticas bajo diferentes escenarios para el sector transporte, mediante un enfoque de costos técnico-financieros con el fin de evaluar políticas de mitigación de GEI a nivel país, para Colombia, entre las que se encontraban aumento en la eficiencia energética, renovación del parque automotor, inclusión de combustibles alternativos y cambios en el reparto modal, sin embargo, el escenario que arrojaba mejores resultados era cuando se mezclaban la implementación de varias iniciativas. Un punto importante de esta investigación, es que a diferencia de los otros trabajos similares, aquí se incluyeron los costos de implementación de varias políticas los cuales podrían llegar a ser de 0.5 a 4 veces el PIB nacional, y que esta es la principal barrera para que estas se den, también destacan la importancia del trabajo sinérgico de varios sectores de la economía y todas las partes interesadas para que su implementación sea eficaz.

Un trabajo donde también se hizo el análisis a nivel país es el de Barisa y otros (Barisa & Rosa, 2018), en este se aborda el problema mediante Dinámica de Sistemas, y el país de estudio es

Letonia. Al igual que la investigación realizada en Colombia, el escenario con combinación de políticas fue el que arrojó resultados más contundentes. Uno de los retos que destacan las autoras es la necesidad de realizar un análisis costo-beneficio de implementación, aunque resaltan que disminuir las emisiones traerá consigo una serie de beneficios económicos indirectos como disminución de enfermedades relacionadas y mejora del desempeño económico local.

(Sim, 2017) hace un abordaje similar para el transporte de carga carretero, modelando las diferentes alternativas que ha trazado el gobierno de Corea del Sur para dejar de emitir determinado porcentaje de GEI a la atmósfera a 2030, las cuatro alternativas van desde la menos a la más ambiciosa que es disminuir las emisiones en un 31,3% para el sector. La metodología usada es Dinámica de Sistemas, evalúa las combinaciones de reparto modal para tres tipos de camión y el transporte férreo. Se concluye que para alcanzar la meta más ambiciosa del gobierno el transporte por camiones debería disminuir su participación en el reparto modal del 80% a 50%, aumentando la participación del modo férreo al 50%. Debido a que este sería un cambio abrupto y difícil de cumplir debido a la inversión y tiempo, el autor recomienda bajar el objetivo de mitigación a un 25%. El trabajo a futuro será expandir el modelo para evaluar los modos aéreo y fluvial, así como estimar los costos que traería la implementación de las estrategias.

Hao y otros (Hao, Geng, Li, & Guo, 2015), realizan un conteo energético y de emisiones de CO_{2e} de todos los modos de transporte de carga en china, incluyendo los que mueven carga internamente y externamente, como marítimo y aéreo, utilizando una metodología desarrollada por la IEA (International Energy Agency) llamada Energy Model “MoMo”, en el cual primero contabilizan los consumos energéticos por modo y por tipo de combustible, el volumen, las distancias recorridas, el modo de transporte y las emisiones de CO_{2e}, también realiza un análisis con diferentes escenarios para observar los comportamientos de mitigación. Se concluye, como en estudios similares, que un escenario con mezcla de estrategias como cambio en el reparto modal, penetración de tecnologías más amigables con el medio ambiente,

mejora en la eficiencia energética y una mejor gestión de la demanda de carga serán las iniciativas que permitirán la reducción del 30% de las emisiones frente al escenario base.

Desde una perspectiva más empresarial y de coordinación logística, Pereira-Marcilio y otros (Pereira Marcilio et al., 2018) analizan la sostenibilidad medioambiental y de desempeño del transporte de mercancías, cuando las empresas utilizan como filosofía de producción *Lean Manufacturing* o “Producción sin desperdicios” y tienden a emitir más GEI debido a las frecuencias del transporte. El estudio se pregunta qué pasaría en las emisiones de gases y los tiempos de transporte si las empresas comienzan a implementar *Green Manufacturing* o “Manufactura verde” analizando diferentes escenarios usando la metodología de Simulación de Eventos Discretos (*Discrete-Event Simulation*), paralelamente se llevaron a cabo cuestionarios para conocer qué tan conscientes son las personas que utilizan *e-commerce* sobre el transporte de los productos que solicitaron, y que cambios, en tiempos y en costo estarían dispuestos a aceptar siempre y cuando el transporte sea más sostenible. Se llegó a la conclusión de que estas dos filosofías de manufactura se pueden establecer de determinada manera para que ambas generen valor en la sostenibilidad de la cadena de suministro, también se puede considerar cooperación de las empresas con los clientes para desarrollar estrategias logísticas eficaces y sostenibles medioambientalmente.

Aschauer y otros (Aschauer, Gronalt, & Mandl, 2015) modelan el funcionamiento del transporte de carga en general, e incluyen las externalidades positivas y negativas, como las emisiones de CO_{2e}. El propósito del trabajo es modelar por medio de dinámica de sistemas las interdependencias entre las estrategias logísticas y el transporte de mercancía, la mirada se centra en la toma de decisiones sobre la operación que generarán impacto sobre la cadena de suministro, y cómo hacerla más costo eficiente pero también más sostenible.

Otra de las investigaciones que vale la pena destacar son las de Ratanavaraha y otros (Ratanavaraha & Jomnonkwao, 2015), también analizan las emisiones del sector transporte general y políticas de mitigación, a diferencia de que en este trabajo comparan los resultados bajo cuatro diferentes metodologías: regresión Log-normal, Análisis de trayectoria, series de

tiempo y estimación de curva, analizando que factores son los que más inciden en las emisiones como PIB, población, configuración de la flota.

Dente y otros (Dente & Tavasszy, 2018) también evalúan políticas de mitigación de emisiones de GEI para el transporte de carga y los resultados son simulados y comparados bajo dos diferentes metodologías: EcoTransIT World Model y Ligterink Model.

Los diferentes estudios evaluados, realizan un análisis de las iniciativas o políticas que podrían ser implementadas en el sector transporte y en la mayoría de ellos abordan el problema realizando simulación de escenarios, a pesar de que estos estudios fueron realizados en distintos países bajo diferentes metodologías, con las particularidades de la actividad para cada caso, en la mayoría de las investigaciones coinciden que un escenario con una mezcla de iniciativas y cambios tecnológicos son el camino para alcanzar las metas que se han trazado los países para disminuir sus emisiones. Como conclusión también se resalta la importancia de diversificar el reparto modal, el ferrocarril parece ser una pieza clave para generar el cambio hacia la dirección correcta, acompañado, claro está, de la renovación de los vehículos, uso de combustibles alternativos, nuevas tecnologías vehiculares, hacer una mejor gestión de la demanda y mejorar la eficiencia de la cadena logística en factores como tiempos y recursos, también pueden aportar a la meta general. En la mayoría de los estudios que fueron revisados están destinados a evaluar las emisiones del transporte en general y terminan haciendo hincapié en el transporte de personas, tanto a nivel local y nacional. Y aquellos que se centran en el transporte de carga de mercancías, se han realizado en otros países, ciertas regiones o corredores de transporte de carga diferentes a Colombia. En este trabajo, se se pretende evaluar estrategias o políticas bajo diferentes escenarios para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el transporte de carga carretera en todo el territorio nacional de Colombia.

En muchos de los trabajos la dinámica de sistemas es ampliamente utilizada para analizar el problema desde la perspectiva de probar políticas en diferentes escenarios, resaltando las

ventajas de dicha metodología para analizar sistemas que se caracterizan por tener funcionamiento complejo y en que intervienen muchos actores y factores.

A continuación se presenta la tabla resumen de los trabajos descritos anteriormente, organizados por año de publicación.

En el capítulo número cinco se presentarán los objetivos de esta tesis, separados en un objetivo general y tres objetivos específicos.

Autores y año	País/Región	Objetivo y metodología
Espinosa, Cadena & Behrentz, 2019	Colombia	Evaluación de políticas de mitigación de GEI mediante abordaje por análisis de escenarios y un Enfoque de Costos Técnico-financieros para el sector transporte terrestre en Colombia
Aiga & Marika, 2018	Letonia	Evaluación de políticas de mitigación de GEI mediante dinámica de sistemas para el sector transporte en Letonia.
Aiga & Marika, 2018	Letonia	Evaluación de políticas de mitigación de GEI mediante dinámica de sistemas para el sector transporte en Letonia.
Pereira, Rangel, Melo, Shimoda, Freitas & Almeida, 2018	Brasil	Desarrollar estrategias de sostenibilidad medioambiental y de desempeño para el transporte de carga terrestre en diferentes empresas que utilizan Lean Manufacturing como filosofía de producción mediante Simulación de Eventos Discretos (DES).
Dente & Tavasszy, 2018	Ninguno	Desarrollar un marco de referencia orientado a la evaluación de políticas, identificando factores que tienen impacto en las emisiones mediante los modelos EcoTransIT World y Ligterink.
Martínez Jaramillo, Arango-Aramburo, Álvarez-Uribe & Jaramillo-Álvarez, 2017	Colombia	Evaluación de estrategias de reducción de la contaminación atmosférica generadas por el transporte de pasajeros y carga por medio de la plataforma LEAP en el Área Metropolitana de Valle de Aburrá, Colombia.
Sim, 2017	Corea del sur	Construir un modelo de planeación para cuatro estrategias propuestas por el gobierno de Corea del Sur en materia de reducción de emisiones de carbono al 2030 para el transporte de carga carretera, mediante dinámica de sistemas.

Autores y año	País/Región	Objetivo y metodología
Liu, Mu & Gong, 2017	China	Evaluar distintas políticas de reparto modal para evitar la sobre carga de los camiones en China, logrando también la sostenibilidad ambiental y de desempeño en el sector, por medio de dinámica de sistemas.
Luo, Dong, Dou, Liang, Ren & Fang, 2016	China	Realizar un estudio comparativo de las características de las emisiones de GEI del transporte de carga, basándose en las desigualdades económicas y sociales de varias regiones de China, mediante la metodología LMDI, Gini Index y Curva de Lorenz.
Nocera & Cavallaro, 2016	Europa	Analizar las emisiones WTW de CO ₂ generado por el transporte de carga en los principales corredores transalpinos, y evaluar una serie de estrategias de reducción para esta región usando Meta-regression
Van der Merwe, Lewis, Cohen & Naudé, 2015	Sudáfrica	Evaluación de políticas de mitigación de GEI y sostenibilidad mediante dinámica de sistemas para un corredor terrestre de carga en Suráfrica.
Hao, Han, Geng, Yong, Li, Weiqi, Guo & Bin, 2015	China	Evaluación de políticas de mitigación de GEI del transporte de carga en China al 2050 mediante un Modelo de Movilidad
Ratanavaraha & Jomnonkwao, 2015	Tailandia	Predecir la cantidad de emisiones de CO ₂ del uso de la energía del sector transporte, como factores que inciden en estas, utilizando cuatro metodologías (Regresión Log-linear, Análisis de trayectoria, Series de tiempo y Estimación de curva)
Javid, Nejat & Hayhoe, 2014	Estados Unidos	Calificar y clasificar varias estrategias de mitigación de emisiones de GEI del transporte terrestre en Estados Unidos, mediante un Proceso Jerárquico Analítico y encuestas a expertos, aplicados a dos escenarios regionales.
Yu, Zhang, Kong, Bao, Wang, Ke & Ning, 2014	China	Analizar el reparto modal del transporte de carga terrestre en una ciudad portuaria de China, con el fin de simular las relaciones interactivas entre el sistema de transporte, la economía de la ciudad y la sostenibilidad, mediante dinámica de Sistemas.

Autores y año	País/Región	Objetivo y metodología
Aschauer, Gerald, Gronalt, Manfred; Mandl & Christoph, 2014	Ninguno	Encontrar aquellos parámetros entre la estrategia logística que afecta al sector transporte de carga, incluyendo externalidades positivas y negativas del sistema modelándolos mediante dinámica de sistemas.

Tabla 5. Tabla resumen de la revisión de la literatura, elaboración propia.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de diferentes políticas de reducción de gases de efecto invernadero en el transporte de carga por carretera en Colombia.

5.2. Objetivos específicos

1. Recolectar, clasificar y ordenar información sobre el transporte de carga, la eficiencia de los vehículos y sus emisiones por km recorrido.
2. Identificar políticas o tecnologías que ayuden a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de transporte de carga.
3. Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar políticas de reducción de gases de efecto invernadero en el transporte de carga por carretera en Colombia.

En el próximo capítulo se presentará la metodología que se utilizó en el desarrollo del presente trabajo, selección de las herramientas para modelar y simular, cómo se construyó el modelo, sus bases, su funcionamiento y cómo este fue implementado.

6. Metodología y Modelo de Simulación

En el capítulo 4 se describieron los trabajos que evaluaban políticas de mitigación o reducción de emisión de GEI en el sector transporte, bajo diferentes metodologías. Se concluyó que para realizar los cálculos de emisiones, las tendencias a futuro y evaluar políticas de reducción no existe una metodología única, hay muchas metodologías que aplican para abordar este tipo de investigaciones destacándose los modelos de optimización, metodologías basadas en simulación como dinámica de sistemas, análisis costo-beneficio, análisis de ciclo de vida, toma de decisiones multi-criterio, entre otras (Sayyadi & Awasthi, 2017).

La dinámica de sistemas es una de estas herramientas, que se ha generalizado para abordar estudios de análisis de políticas en diferentes campos debido a sus características, entre las que se resaltan la posibilidad de experimentar con políticas abstractas y permite plantear escenarios de “qué pasaría sí” (Yu et al., 2014).

La Dinámica de Sistemas se ha vuelto una herramienta popular para analizar el comportamiento y las interacciones en sistemas complejos en el tiempo, ayudando a la evaluación de políticas bajo diferentes escenarios de implementación (Sterman, 2000). Dichos sistemas tienen la propiedad de tener retroalimentación, retardos y relaciones no lineales (Barlas & Carpenter, 1990). Esta metodología ha sido utilizada para abordar gran cantidad de problemas en distintos ámbitos, entre los que se destacan el diseño de políticas exitosas dentro de empresas, configuración de políticas públicas e investigación de cambios en sistemas energéticos, de transporte, sociales, medioambientales, entre muchos otros, desde su nacimiento en 1960 (Sterman, 2000).

Sterman define al proceso de modelación de la Dinámica de Sistemas como una sucesión iterativa y cíclica que incluye las siguientes etapas: identificación del problema que se desea abordar, formulación de una hipótesis dinámica, formulación del modelo de simulación, validación de este modelo y diseño y evaluación de políticas según el fin del estudio, estas etapas se muestran en la figura 17 (Sterman, 2000).

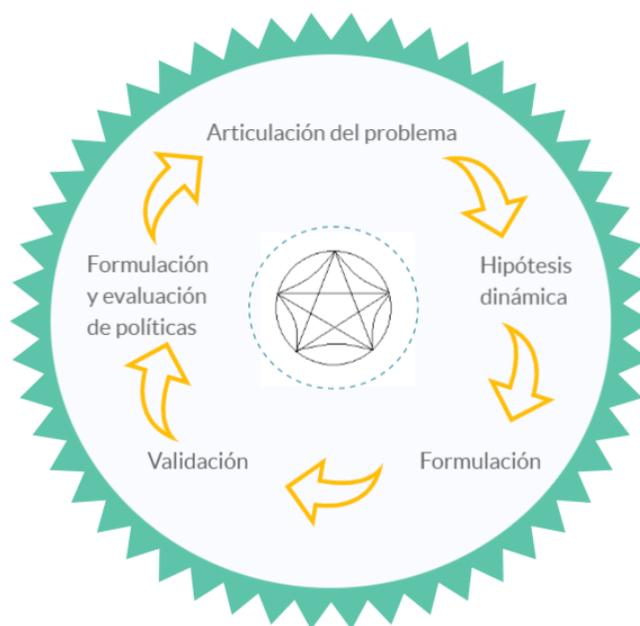


Figura 17. Etapa de modelado usando dinámica de sistemas. Adaptado de (Sterman, 2000)

Debido a las características y ventajas de esta metodología se selecciona para el desarrollo metodológico de este trabajo investigativo, estas se alinean con los objetivos propuestos, además que es ampliamente usada en el área de análisis, como se observó en la revisión de la literatura.

El transporte de carga en Colombia posee las características de ser un sistema complejo debido a que tiene muchos componentes que interactúan entre sí, que se retroalimentan, que muchas de sus relaciones no suelen ser lineales y exhibe un tipo de orden espontáneo, ya que está fuertemente ligado al desempeño económico del país, el cual se caracteriza por tener un comportamiento no lineal (Ladyman, Lambert, & Wiesner, 2012).

Una de las ventajas que ofrece la metodología de dinámica de sistemas, es que permite que la información sea limitada e imperfecta, y utiliza esta propiedad para entender los efectos de las decisiones en el sistema (Sterman, 2000).

A continuación se describirá y delimitará el modelo de simulación para evaluar políticas de mitigación de emisiones de GEI del transporte de carga por camiones en Colombia, se

describirá el desarrollo en cada una de las etapas de modelado, la fuente de los datos y del comportamiento. Primero, se comenzará explicando el propósito del modelo (articulación del problema) y la hipótesis dinámica.

6.1. Descripción del modelo

6.1.1. Propósito del modelo

En el capítulo de antecedentes se contextualizó y se dio una visión general del comportamiento en la actualidad del transporte de mercancías por carretera, de los factores y actores que intervienen en el sector, y sus externalidades negativas como las gran cantidad de emisiones de GEI, y la necesidad de reducirlas para contribuir con la mitigación del CC, en la que muchas naciones del mundo, como Colombia, se han comprometido. Por esta razón se creó el modelo, ya que el transporte de carga y pasajeros en Colombia es el tercer gran emisor de GEI, y aún hay muchas acciones e iniciativas que se pueden implementar en el país para mitigar dichas emisiones. Por eso se modeló la articulación del sub-sector mediante Dinámica de Sistemas a 21 años (2019 a 2040), en este horizonte se incluye el año de verificación de los compromisos del COP21 (Acuerdo de París) el cual es 2030 y se observa el comportamiento del sistema en los años posteriores con el fin de hallar la cantidad máxima de emisiones a ser evitadas a 2040, el paso de la simulación es anual.

Para elaborar el modelo causal se utilizó el software Vensim® y el desarrollo del diagrama de flujos y niveles, y las simulaciones se realizaron en Powersim Studio®.

6.1.2. Hipótesis dinámica

La hipótesis dinámica desarrollada se muestra en el figura 19, la cual cuenta con nueve ciclos de retroalimentación (cuatro de balance (B) y cinco de refuerzo (R)) que explican las relaciones causales de las variables que componen la dinámica del sistema del transporte de carga carretera para Colombia y que factores intervienen en las emisiones que genera la prestación de este servicio al país.

Grosso modo, el modelo describe el funcionamiento desde la necesidad de transportar mercancías o la demanda de este servicio, esta demanda se ve afectada por el crecimiento del país, pues a un mejor desempeño económico se generará un mayor consumo de bienes, materias primas, comida, servicios, entre otros. Por otro lado, se desarrolla un subsistema de oferta, en el que intervienen el número de vehículos de carga en el país, la capacidad de cada vehículo y los viajes que puede realizar anualmente. Los módulos del sistema se detallan en la figura 18.

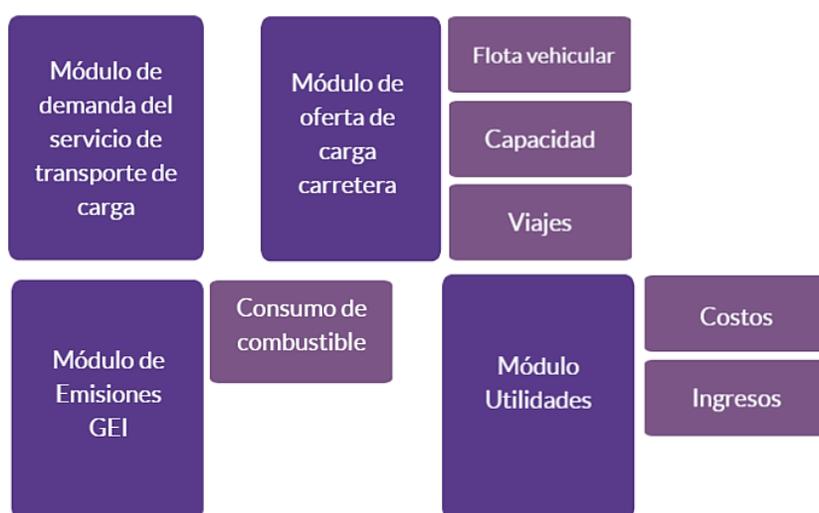


Figura 18. Subsistemas del modelo de transporte de mercancías y sus emisiones en Colombia, elaboración propia.

La oferta se ve afectada por la entrada y salida de vehículos, o la compra y desintegración de camiones, y este módulo, a su vez, depende de los costos asociados, ingresos y por ende las utilidades, que se retroalimenta de la dinámica entre la demanda y oferta. Por último, el subsistema de las emisiones de CO_{2e}, se relaciona con las variables como consumo de combustible, eficiencia del motor y eficiencia en la conducción de los vehículos. Hay muchos factores externos que afectan al sistema como son la calidad de la infraestructura y el costo promedio de un vehículo de carga, que dependen de otros sistemas o mercados, y no es posible

controlarlos desde la perspectiva de este sistema, pero que en el caso colombiano, generan impedimentos para el efectivo desempeño del sector.

Algunas variables como el “Factor de utilización” se utilizaron para realizar la calibración del modelo.

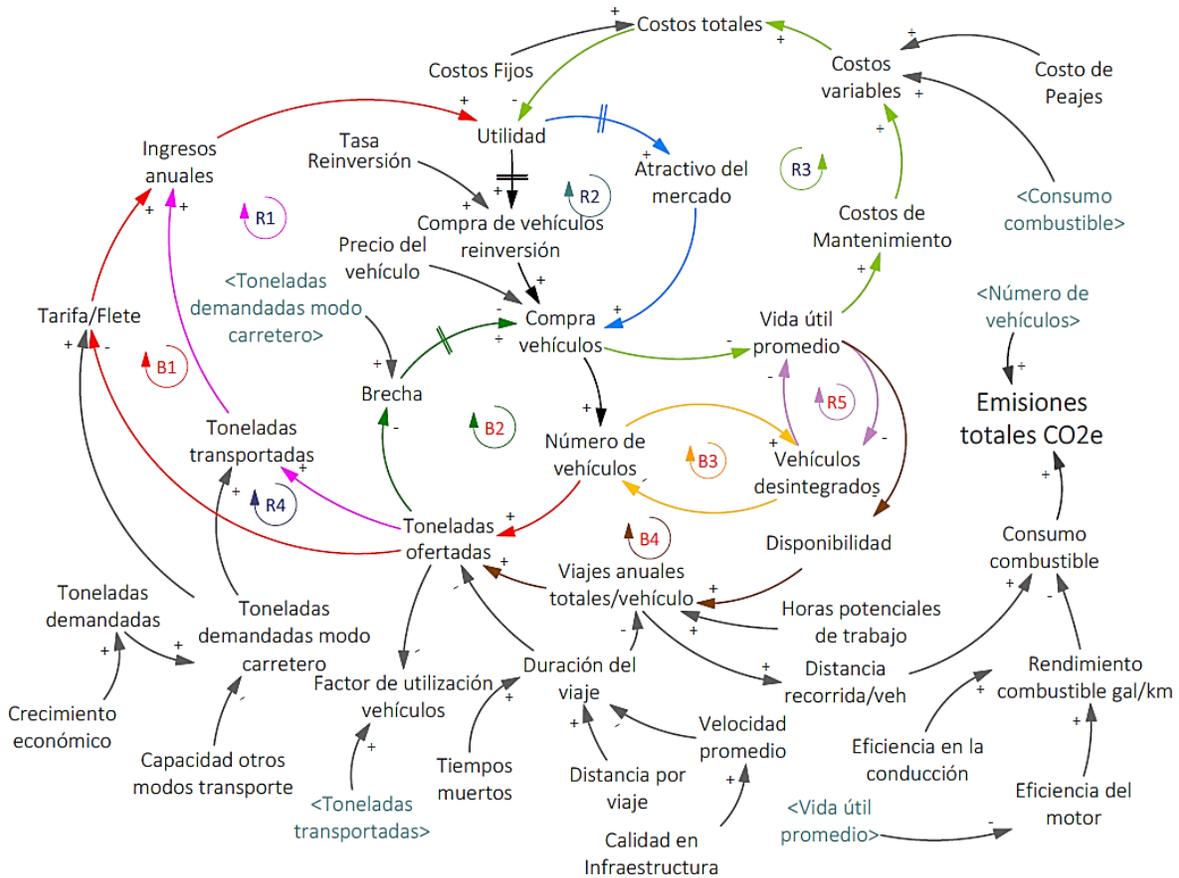


Figura 19. Hipótesis dinámica de las emisiones de GEI generadas por el transporte de carga carretero en Colombia, elaboración propia en Vensim PLE®.

A continuación se explicarán los ciclos de retroalimentación detalladamente.

6.1.2.1. Análisis por ciclos de retroalimentación

En la figura 20 se muestran los ciclos de retroalimentación B1, B2 y R1. El ciclo de balance 1 o “Ciclo de Tarifa” las utilidades se modifican en función de la tarifa que se cobre por tonelada transportada o lo que se conoce como “flete”, a más oferta menor será la tarifa y esto se verá

reflejado finalmente en la renovación de la flota o compra de nuevos camiones. En el caso del ciclo de refuerzo 1 o “Ciclo de Carga Transportada” en donde se observa que si se transporta gran cantidad de mercancías, las utilidades serán mayores y habrá más disponibilidad de dinero para comprar vehículos.

En el ciclo de balance 2 o “Ciclo de Brecha”, si la oferta es grande no habrá déficit de vehículos y por lo tanto no se comprarán más, este parámetro se contempla por si en algún momento del horizonte de simulación hay déficit de oferta, en este caso, necesariamente deberá reponerse el número de camiones.

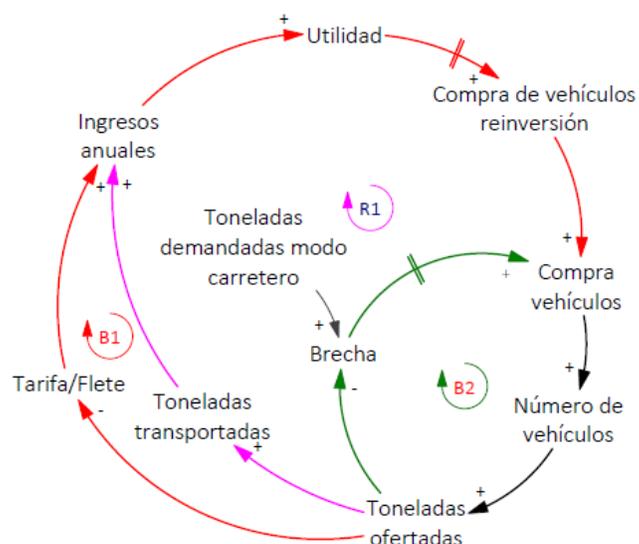


Figura 20. Ciclos B1, B2 Y R1.

Los ciclos de refuerzo 2 y 3, se detallan en el figura 21. El ciclo R2 o “ciclo de Atractivo del Mercado”, explica como la oferta de transporte de mercancías supera a la demanda, como resultado de esta relación, los precios caen, aun así, siguen entrando vehículos al sistema. A esta situación es lo que se conoce en el modelo como atractivo del mercado, ya que cualquier persona natural puede entrar a este, al desconocer las verdaderas condiciones, tienden a entrar comprando un nuevo camión, pues consideran que las utilidades son buenas. El ciclo R3 o “Ciclo de Costos y Reinversión”, en este se observa que la reinversión en nuevos vehículos depende de los costos variables, que a su vez se ven afectados por la mediana vida útil, ya que

a mayor sea la vida útil promedio de los camiones, mayores serán los costos de mantenimiento y menor la utilidad.

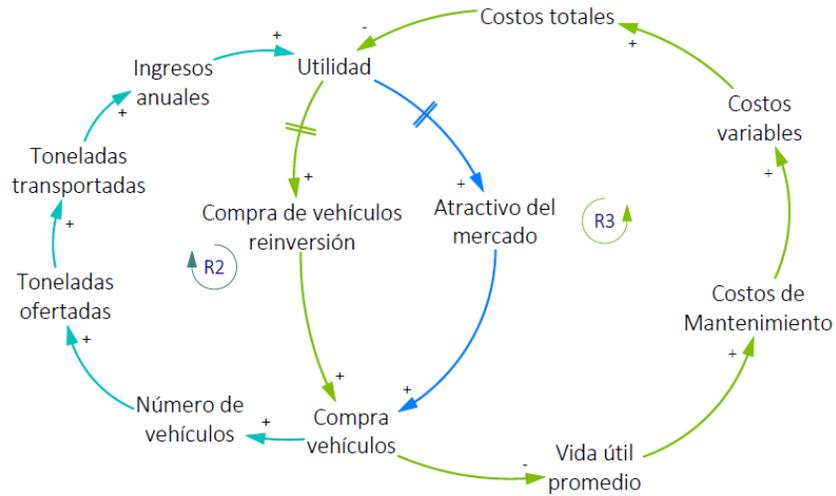


Figura 21. Ciclos R2 Y R3

Los ciclos B3 y R5, se relacionan entre sí, y explican como la flota vehicular se ve afectada por la desintegración o chatarrización, y esta a su vez depende de la vida útil promedio que aumenta si se compran y se desintegran pocos vehículos, ya que a más edad tenga la flota de camiones, menor será la tasa de desintegración y por ende crecerá la vida útil promedio de la esta, y así sucesivamente. Vehículos viejos traen consigo una serie de externalidades negativas como mayor contaminación, mayor riesgo de accidentalidad y mayor ruido. Por esto es que el ciclo B3 “Desintegración” genera balance en el sistema y mientras que el ciclo R5 “Vida útil promedio” la refuerza, el ciclo B4 o ciclo de Oferta revela como una mayor capacidad genera una mayor oferta, genera menores precios y menores utilidades lo que se traduce en menor compra de vehículos finalmente y una vida útil promedio del parque automotor que aumenta. Estos tres ciclos se muestran a continuación en el figura 22.

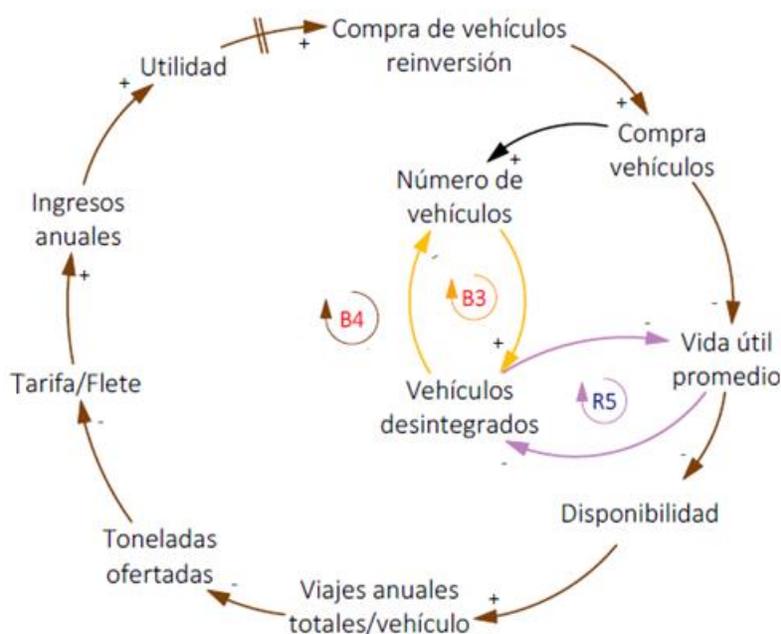


Figura 22. Ciclos B3, B4 Y R5

El ciclo R4 o Ciclo de viajes que se detalla en el figura 23, tiene relaciones similares al ciclo B5, sin embargo, sin importar el flete, en este ciclo solo se tiene en cuenta cuanta la carga que mueven los vehículos, lo que se traduce en mayor trabajo y mayor flujo de dinero, lo que termina en mayores tasas de renovación vehicular y menor vida útil promedio.

En general el modelo y la estructura del sistema de transporte de carga carretero en Colombia, obedece a las leyes de demanda y oferta, y al ser un mercado de libre entrada este se debería regular por sí solo, pero con una alta oferta y con infraestructura precaria, el sector no se caracteriza por tener grandes utilidades, y como se observó en los ciclos, la vida útil promedio está ligada a estas y debido a estos factores Colombia cuenta con una vida útil promedio que supera por mucho a la de los países de la región. Esto genera grandes ineficiencias y emisiones de GEI muy altas.

En el siguiente apartado se explicará el diagrama de flujos y niveles, y se contextualizará sobre cómo se fue desarrollando el modelo para posteriormente realizar las simulaciones pertinentes.

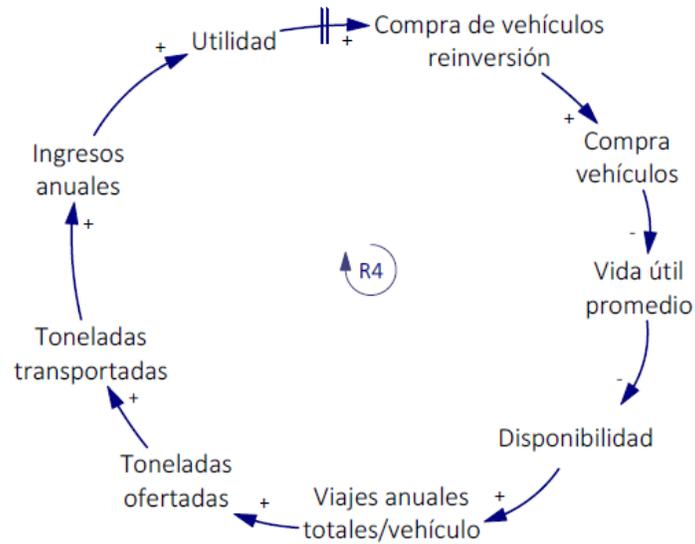


Figura 23. Ciclo R4

6.1.3. Diagrama de flujos y niveles

Al igual que el diagrama causal, el de Flujos y Niveles, también se encuentra separado por módulos, los cuales se presentarán y se explicarán con detalle a continuación mediante 8 figuras, junto a las principales ecuaciones utilizadas para relacionar las variables, luego se continuará con la explicación de cómo se realizó la validación de este.

Módulo Demanda-Oferta

Este módulo está compuesto por tres subsistemas principales, los cuales son generación de la demanda, generación de la oferta y generación de viajes que se observan en los figuras 24 y 25. La forma en que se genera la demanda del servicio de transporte de carga en el país está dada por el comportamiento económico del mismo, como se explicó anteriormente, a un mejor desempeño económico se espera que la población consuma más bienes y servicios y las empresas aumenten sus producciones y generen más carga, por lo cual es una relación directa.

Se espera, pues, que el país continúe en crecimiento. Para el caso del modelo se utilizó un crecimiento económico constante para el horizonte temporal del mismo, esta tasa de crecimiento fue generada a partir de datos históricos de crecimiento otorgados por el Banco de la República de Colombia (BanRep) y el Banco Mundial, con datos desde el año de 1980 hasta el 2018, dando como resultado un crecimiento del PIB promedio de 3,5%.

En Colombia el Ministerio de Transporte (Mintransporte) recolecta datos de los viajes de transporte de mercancías a la entrada y salida de las ciudades más importantes del país, con el fin de generar las matrices Origen-Destino (O-D), conocer la cantidad de carga que se moviliza, los tipos de vehículos utilizados para este fin, tipos de productos y otros datos. De las matrices generadas por Mintransporte de los años 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2014, se realizó una estimación de la demanda de la carga para el año de inicio que es 2019.

La capacidad de otros modos de transporte, es una variable que para el caso base no se tiene en cuenta, se utilizará para aplicar una política en donde los otros modos de transporte de carga como el ferroviario y el fluvial, con los pronósticos que brinda el Departamento Nacional de Planeación para el 2030, disminuirán la participación del modo carretero a un 66%. De La resta de la carga demandada y la capacidad de otros modos de transporte, finalmente obtenemos la carga que se transportará por modo carretero.

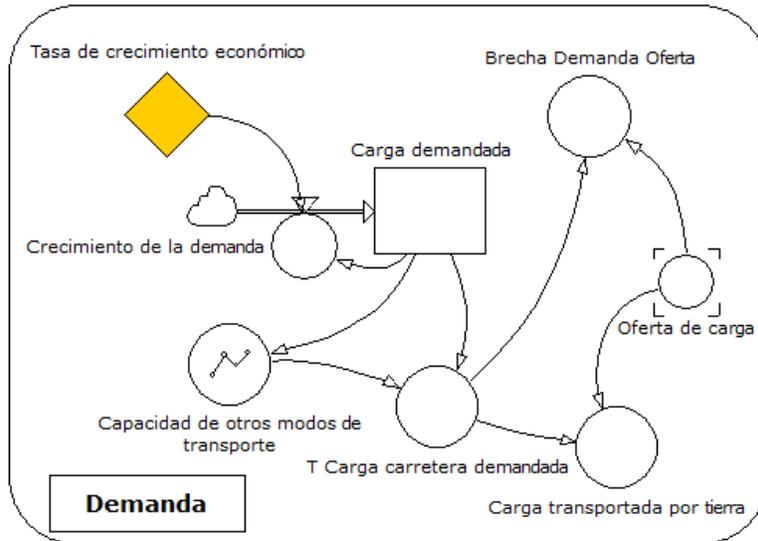


Figura 24. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Demanda-Oferta: Subsistema de Demanda.

Los subsistemas de oferta y generación de viajes están estrechamente relacionados, de los viajes que puede realizar un vehículo al año, de su capacidad de carga y la totalidad del parque vehicular de carga del país se halla la oferta total de carga, esta relación se observa en la ecuación 1. De la correlación entre la demanda y la oferta se calcula la “brecha” que calculará el exceso o la carencia de oferta de transporte de carga en el país en un año específico.

La generación de viajes de un vehículo al año, se calcula con las variables como velocidad promedio (km/h), distancia promedio de la ruta (km), tiempos muertos por viaje (h), la disponibilidad del vehículo (%) o el tiempo que el vehículo se encontrará en labores de mantenimiento, esta disponibilidad será inversamente proporcional a la vida útil promedio de los vehículos, es decir, entre más antiguo sea el camión estará menos disponible, relación mostrada en las ecuaciones 2 y 3. La velocidad promedio es un dato obtenido de varias fuentes y se ponderaron los datos por tipo de camión y tipo de terreno, esta ponderación arrojó como resultado una velocidad promedio de 32km/h, ya que esta variable depende de varios factores como es el tipo de vehículo de carga, la topografía y el estado de la carretera, la velocidad promedio se conecta con una variable llamada “Infraestructura vial” que podrá mejorar o empeorar en el tiempo, dichas relaciones se pueden observar en a figura 25.

Ecuación 1. Oferta de Carga

$$OC [t] = CV * PAC * VA$$

Donde:

OC: Oferta de Carga [t]

CV: Capacidad Vehicular [t]

PA: Parque Automotor de Carga

VA: Viajes Anuales

Ecuación 2. Generación de Viajes anuales

$$VA = (HPT * D) / DV \text{ (1)}$$

Donde:

VA: Viajes Anuales

HPT: Horas Potenciales de Trabajo [h]

D: Disponibilidad [%]

DV: Duración del Viaje [h]

Ecuación 3. Duración de un viaje

$$DV[h] = (TM + (DV/VP))$$

Donde:

DV: Duración del Viaje [h]

TM: Tiempos Muertos [h]

DV: Distancia del Viaje [km]

VP: Velocidad Promedio [km/h]

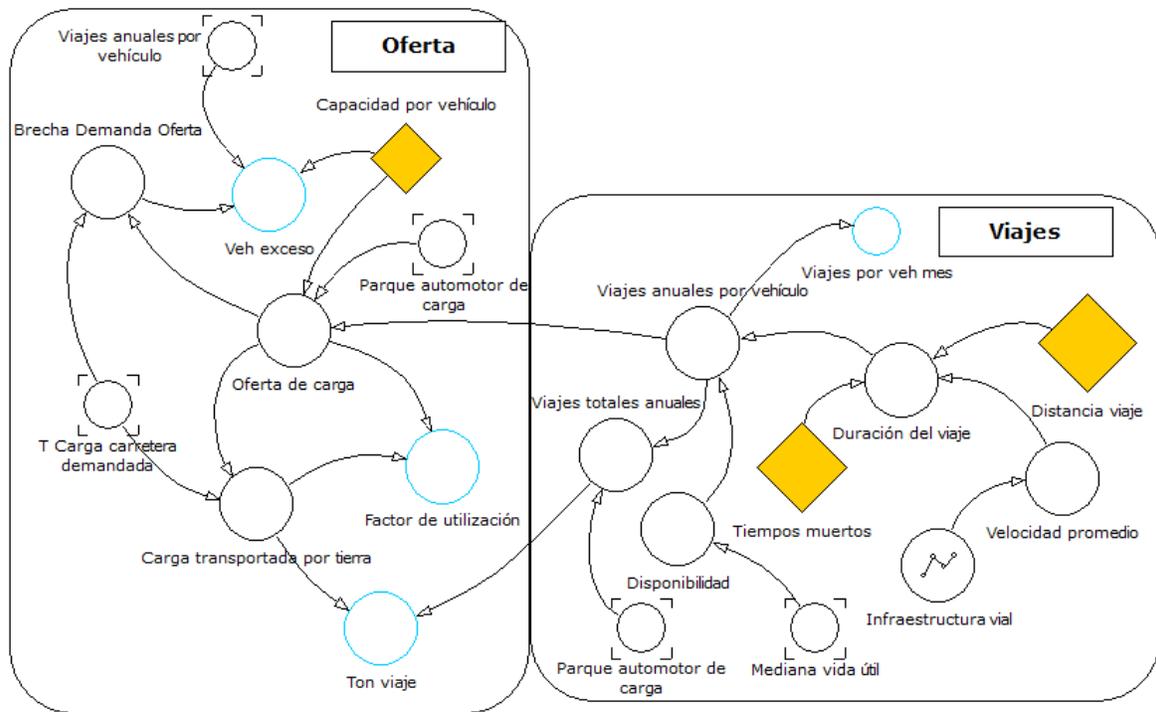


Figura 25. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Demanda-Oferta: Subsistema de Oferta y generación de viajes.

Módulo Costos, Ingresos y Utilidades

El módulo de costos está compuesto por los subsistemas de costos fijos y variables, que se muestran en las figuras 26 y 27, los costos fijos se consideraron mensuales e incluyen costos como salario, seguro de los vehículos y amortización de préstamos, estos se llevan a un costo por tonelada (\$/t) ya que las tarifas son cobradas en estas unidades, ver ecuación 4. Los costos variables son los que se generan en cada viaje y agrupan al costo del combustible, al costo de los peajes y al mantenimiento (cambio de llantas, lubricantes y repuestos), a este último ítem se le adicionó un costo extra ocasionado por la antigüedad de los camiones, ya que a más edad tenga el vehículo más mantenimientos debe realizársele, estos se llevaron a las unidades de (\$/t), esta relación se observa en la ecuación 5.

Ecuación 4. Costos Fijos por tonelada transportada

$$CF [$/t] = CFM/CTM$$

Donde:

CF: Costos Fijos [\$/t]

CFM: Costo Fijo Mensual [\$/mes]

CTM: Carga transportada al mes [t/mes]

Ecuación 5. Costos variables por tonelada transportada

$$CV[$/t] = ((CVV * VM) + CCM + CA)/CTM$$

Donde:

CV: Costos Variables [\$/t]

CVV: Costos Variables por Viaje [\$/viaje]

CCM: Costo Combustible al Mes [\$/mes]

CA: Costo Antigüedad [\$/]

CTM: Carga Transportada al Mes [t/mes]

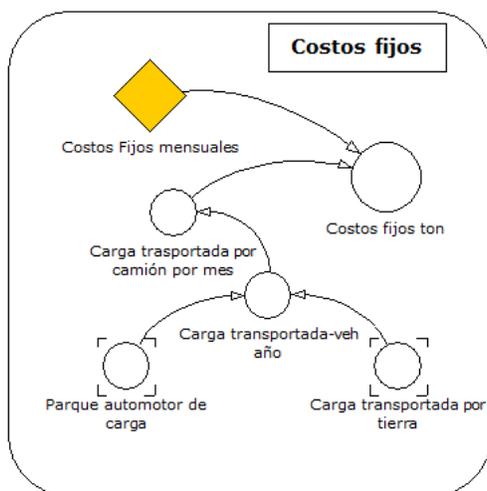


Figura 26. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de costos: Subsistema de Costos fijos.

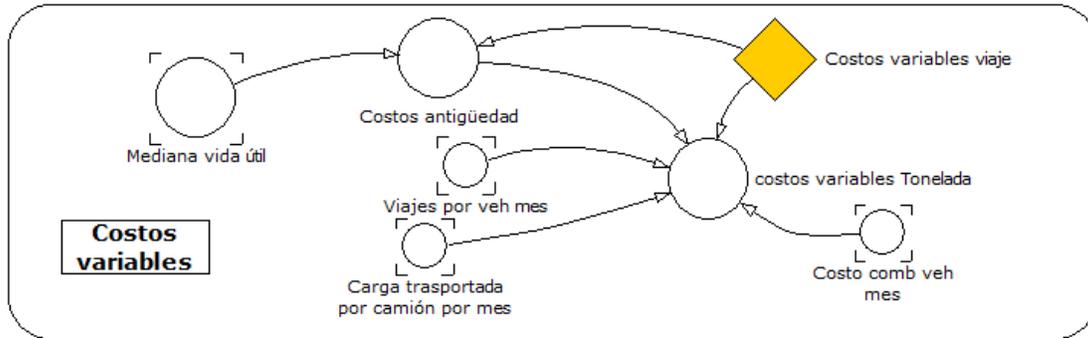


Figura 27. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de costos: Subsistema de Costos variables.

El tercer módulo que se describe en el figura 28, es el de ingresos, estos son generados por la carga que se transporta y por la tarifa que se cobra por cada tonelada (\$/ton), ver ecuación 6, la tarifa o flete se calcula a partir de un parámetro que se conoce como “precio justo del flete” y es lo que debería recibir el transportador por cada tonelada que transporta, pero esta tarifa se ve afectada por la relación que hay entre la demanda y la oferta, entre la oferta sea mayor, menor será la tarifa que se cobrará, debido a la competencia que se genera.

Ecuación 6. Ingresos

$$I[\$] = T * CT$$

Donde:

I: Ingresos [\$]

T: Tarifa o Flete [\$/t]

CT: Carga Transportada [t]

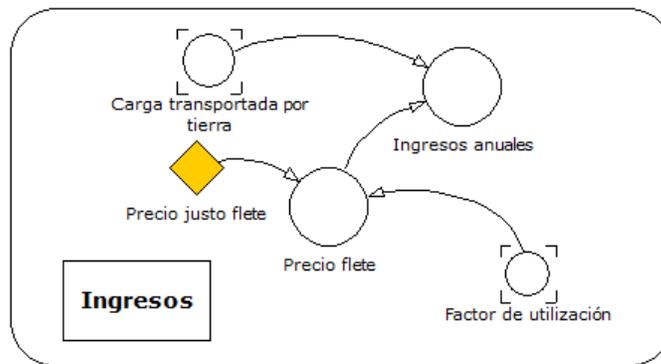


Figura 28. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de ingresos.

El módulo de utilidades presenta las utilidades totales del sector al año (\$/año), y de estas dependerá la entrada de nuevos vehículos al sistema, si hay buenas utilidades como para invertir en vehículos, mayor será la compra de camiones al año. Esta está dada de los ingresos menos los costos anuales (ver ecuación 7) y un porcentaje de estas se va acumulando hasta que pueda ser utilizada para la compra de nuevos vehículos de carga y también se utiliza para definir la entrada de vehículos como atractivo del mercado, es una forma de explicar cómo las personas externas perciben las posibles utilidades del sector y por esto desean entrar y al no haber barreras o regulación para la entrada, entran libremente. Esta relación se muestra en la figura 29.

Ecuación 7. Utilidad Anual

$$UA [\$] = IA - CA$$

Donde:

U: Utilidad Anual [\$]

IA: Ingresos Anuales [\$]

CA: Costos Anuales [\$]

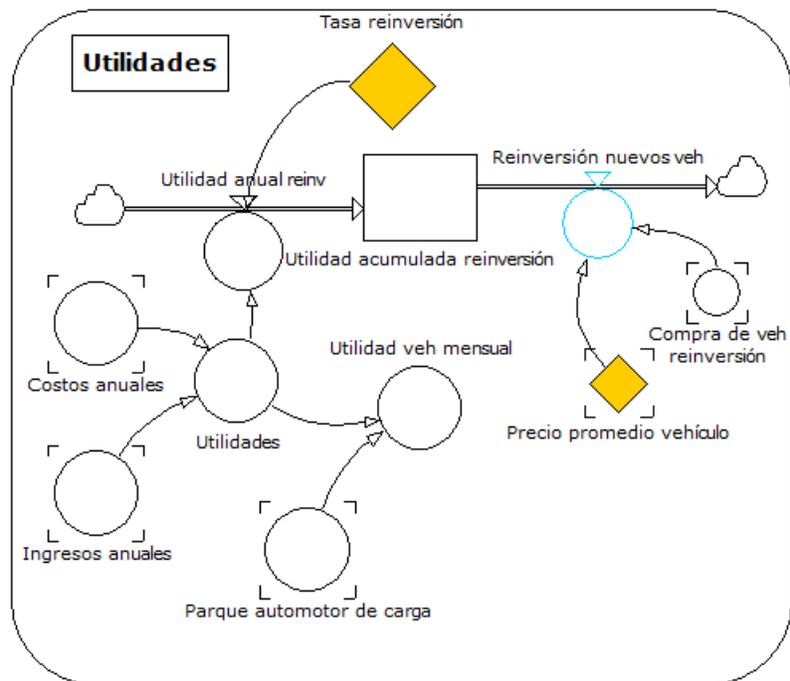


Figura 29. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Utilidades.

Módulo Flota vehicular convencional

El Módulo de Flota vehicular convencional, está integrada por dos subsistemas, uno de vehículos recientes que se muestra en el figura 30, que son los aquellos que han entrado desde el 2014 y aún no es tiempo de desintegrarlos más los que van a comenzar a entrar en el 2019, y el otro subsistema están aquellos que deberían estar desintegrándose o a punto de hacerlo, que se detalla en el figura 31.

La compra de vehículos se realiza mediante tres mecanismos: “Brecha”, en caso de que haya déficit de vehículos en el sistema para suplir la demanda, “Reinversión” que utiliza un porcentaje de las utilidades acumuladas para la renovación de la flota y por último el “Atractivo del mercado” que son vehículos de carga que ingresan al sistema por la entrada de un nuevo competidor que externamente considera que el mercado es bueno, y para calcular esto se consideró un porcentaje de los ingresos para este fin, ya que desconocen bien la estructura de costos.

Para la desintegración vehicular o la salida de vehículos porque ya cumplieron una vida útil, salen del sistema a una tasa que depende proporcionalmente de la edad media de la flota, y esta edad, a su vez, está ligada a que tan cubiertos están los costos frente a los ingresos, como se muestra en la ecuación 8.

Ecuación 8. Desintegración vehicular

$$VD = VC_a/VUP$$

Donde:

VD: Vehículos Desintegrados

VC_a: Vehículos convencionales antiguos

VUP: Vida Útil Promedio [años]

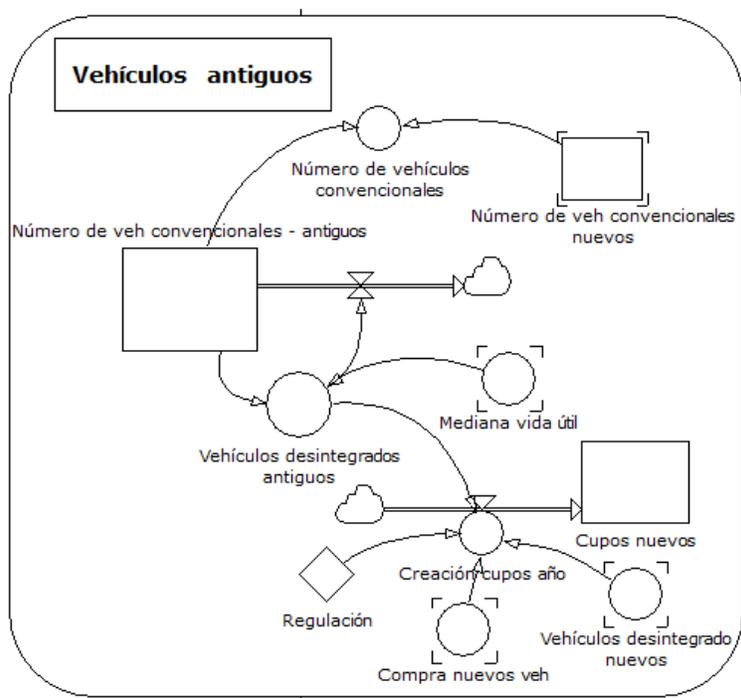


Figura 30. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Flota vehicular convencional. Subsistema de vehículos nuevos.

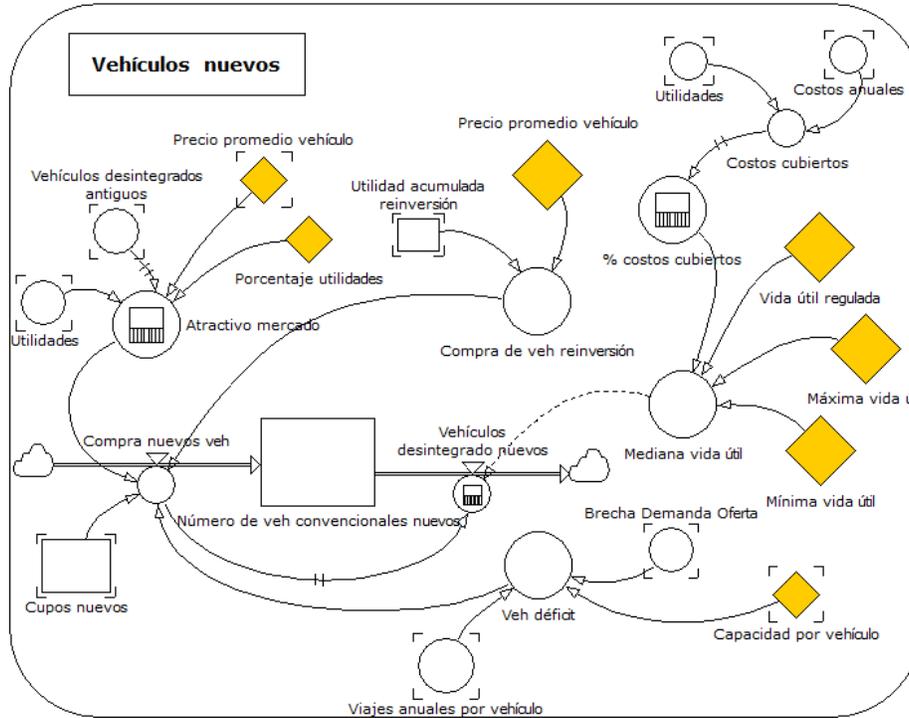


Figura 31. Diagrama de flujos y niveles. Módulo de Flota vehicular convencional. Subsistema de vehículos antiguos.

Módulo de emisiones de CO_{2e}

Finalmente, en el figura 32, está la forma en que se calculan las emisiones de CO_{2e} que produce toda la actividad del transporte de carga carretera en Colombia durante un año. Las emisiones dependen inversamente del rendimiento del combustible (km/gal) y proporcionalmente al consumo del parque automotor anualmente (gal/año), ver ecuación 9, el rendimiento se ve afectado por la edad del vehículo, pues a más antigüedad del vehículo menor será la eficiencia del motor por desgaste del mismo. Se calculan las emisiones del metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂) (ver ecuación 9) y finalmente se igualan y totalizan en CO_{2e} (Dióxido de carbono equivalente) para hacerlo se utiliza la ecuación 10.

Ecuación 9. Consumo de combustible por vehículo

$$CC [gal/año] = DV/RC * VA$$

Donde:

CC: Consumo de Combustible [gal/año]

RC: Rendimiento del combustible [km/gal]

VA: Viajes al año

DV: Distancia del viaje [km]

Ecuación 10. Cálculo de emisiones de cada uno de los GEI

$$Emisiones\ GEI\ [t\ GEI/año] = CC * FE * PCG$$

Donde:

CC: Consumo de Combustible [gal/año]

FE: Factor de Emisión [t GEI/gal]

PCG: Potencial de Calentamiento Global GEI

Ecuación 11. Cálculo de emisiones CO_{2e}

$$Emisiones\ de\ CO_{2e}\ [t\ CO_{2e}/año] = E(CH_4) + E(N_2O) + E(CO_2)$$

Donde:

E (CH₄): Emisiones de CH₄ [t]

E (N₂O): Emisiones de N₂O [t]

E (CO₂): Emisiones de CO₂ [t]

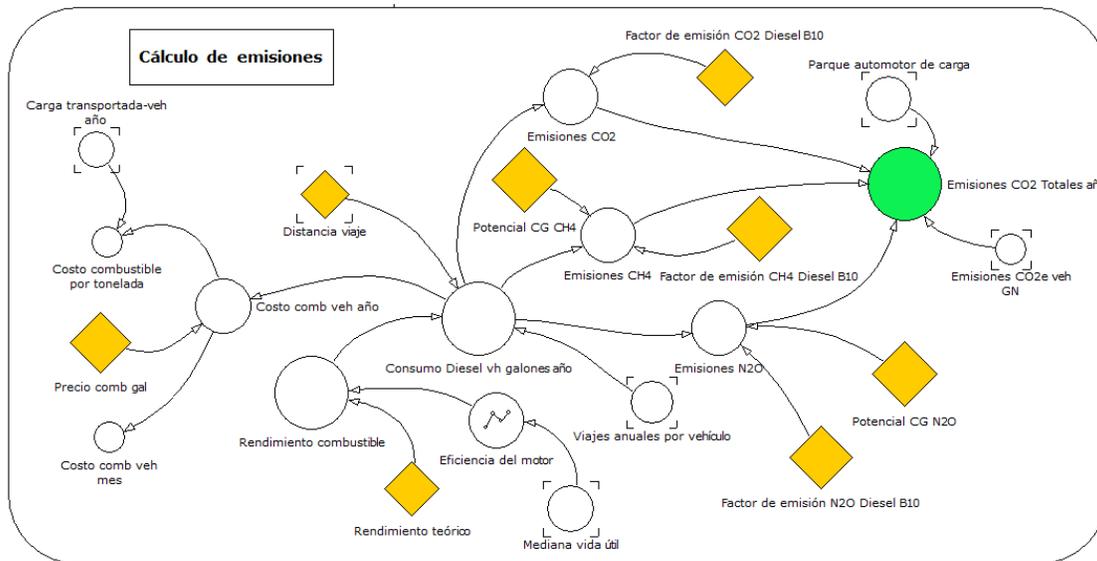


Figura 32. Diagrama de flujos y niveles. Módulo cálculo de emisiones de CO_{2e}.

6.1.3.1. Supuestos y especificaciones

- El horizonte del modelo son 21 años, el año de inicio es 2019 y el año final es 2040.
- El conteo de las emisiones es solo para los viajes realizados dentro del territorio nacional.
- Las emisiones de GEI solo son de viajes realizados para el transporte de carga por carretera o viajes intermunicipales, no se cuentan las emisiones de los viajes urbanos.
- Un viaje se considera como el recorrido de la ciudad de origen a la ciudad destino, no incluye el regreso.
- El parque automotor o la flota analizada son los vehículos de carga que viajan por carreteras y son aquellos que pueden cargar más de 10 toneladas.
- Las emisiones de los otros modos de transporte no se incluyen o contabilizan en el modelo.
- Se toma como supuesto que toda la flota de carga del país se mueve con motores de combustión interna tipo Diésel y este es el combustible que consumen.
- El crecimiento económico de Colombia se toma constante en todo el horizonte de tiempo de simulación del modelo.

- La distancia recorrida, los tiempos muertos, las horas potenciales de trabajo, precio del vehículo, precio del combustible, costos fijos mensuales y costos variables de los peajes de la ruta se tomaron promedio y constantes en el tiempo.
- Los datos fueron recolectados de fuentes gubernamentales, asociaciones de empresarios como la ANDI, asociaciones de transportadores de carga como Defencarga y Colfecar, empresas del sector como Soluciones Logísticas Botero Soto y personas que han tenido gran experiencia en el sector como Juan Guillermo Mesa Peláez, en Cummins. Se dio la oportunidad de tener entrevistas con Juan Guillermo Mesa y en Soluciones Logísticas Botero Soto con Hernán Pérez y Andrés Santos, los cuales, desde su experiencia brindaron sus conocimientos en el área, desde el tema de costos, mantenimiento, legislación del sector, conocimiento técnico de los vehículos hasta en nuevas tecnologías.
- Los factores de emisión (Diesel B10) y el potencial de calentamiento global para los gases CH₄, CO₂ y N₂O se tomaron como valores de referencia de FECOC, 2016 e IPCC, 2015.

6.2. Validación del modelo

Existen muchas metodologías para corroborar la validez de un modelo en dinámica de sistemas, entre las más utilizadas se destacan las pruebas a la estructura, pruebas del comportamiento y pruebas de precisión de patrones de comportamiento entre otras (Barlas, 1996). Finalmente lo importante no es afirmar si el modelo es completamente válido o no, el objetivo de la validación y verificación consta de conocer si el modelo tiene credibilidad para medir o probar el objetivo para el cual ha sido construido (Balci, 1990). A continuación se describen las metodologías que se utilizaron para validar el modelo desarrollado y se compara con el comportamiento del sistema real.

6.2.1. Validación de la estructura

6.2.1.1. Validación de la consistencia dimensional

Para verificar la consistencia dimensional del modelo y asegurar que los flujos y niveles tuvieran las unidades correctas, se realizaron verificaciones a las ecuaciones propuestas para modelar el comportamiento del sistema real y se verificaron que las unidades de entrada entregaran las correctas unidades de salida de los niveles. Adicional a estas verificaciones por parte de quienes desarrollaron el modelo, la herramienta utilizada para crear el modelo (Powersim Studio 10®) tiene como requerimiento la consistencia en las unidades para realizar las simulaciones. En el anexo 1 se encontrarán dichas ecuaciones y sus unidades de medida.

6.2.1.2. Verificación de los parámetros

Para la construcción del modelo se consultaron diferentes fuentes fiables entre las que se encuentran reportes de entidades gubernamentales o de asociaciones que estudian el sector, como entrevistas con actores de este, con el fin de conocer los datos del funcionamiento real del sistema de transporte de carga carretera en Colombia en los últimos años. En algunos casos debido a que los datos pertenecían a años anteriores al del inicio del modelo se estimaron para este año (2019). La recolección de los datos y su fuente se dan a conocer en la tabla 7.

Parámetro	Valor	Unidad	Significado	Fuente
Crecimiento económico anual	3,5	%	Es el porcentaje de crecimiento en el PIB nacional, se calculó a partir de los datos de 1980 hasta el 2018, como un promedio.	Cálculos propios a partir de Banrep, 2018 & BM, 2019
Demanda de carga nacional	231.116.941	Toneladas	Es el porcentaje de crecimiento en el PIB nacional, se calculó a partir de los datos de 1980 hasta el 2018, como un promedio.	Cálculos propios a partir de MinTransporte, (2005-2014)

Parámetro	Valor	Unidad	Significado	Fuente
Número de vehículos de carga	224.881	Camiones o vehículos de carga	Son los vehículos que realizan carga interurbana, los vehículos son aquellos que pueden cargar más de 6 toneladas.	Cálculos propios a partir de Runt, 2019
Velocidad promedio	32	km/h	Es la velocidad promedio que alcanzan los camiones en carretera en Colombia.	ANDI, 2018 & Botero Soto, 2019
Distancia del Viaje	588	km	Es la distancia promedio por ruta que recorren los vehículos de carga en Colombia.	Cálculos propios a partir de MinTransporte, (2005-2014)
Tiempos muertos	21	horas	Son los tiempos que se pierden cuando los vehículos realizan una entrega, en estos tiempos se cuenta el cargue, el descargue, tiempos de espera y otros tiempos extra.	Defencarga, 2017
Edad promedio de la flota	23,2	años	Es la edad promedio que tiene toda la flota de vehículos de carga en Colombia.	Andemos, 2017 & DNP, 2018
Horas potenciales de trabajo	8760	horas	Son el máximo de horas al año que un vehículo de carga puede trabajar, independientemente del número de conductores.	Cálculos propios
Mínima vida útil	5	años	Es el uso mínimo que se le da a un vehículo de carga nuevo.	Defencarga, 2017

Parámetro	Valor	Unidad	Significado	Fuente
Máxima vida útil	30	años	Es el uso máximo que se le da a un vehículo de carga.	Defencarga, 2017
Disponibilidad vehículo nuevo	98	%	Es el tiempo disponible máximo con el que cuenta un vehículo de carga, este porcentaje disminuye al aumentar la edad del vehículo debido al tiempo en que debe estar en mantenimiento.	Botero Soto, 2019
Costos fijos	2.500.000	COP	Son los costos administrativos que deben pagarse todos los meses como seguros y salarios.	SICE-TAC, 2019 & Botero Soto, 2019
Costos variables (Mantenimiento y peajes)	404.026	COP/km	Son los costos que dependen de la producción o viajes que realiza un vehículo de carga en un periodo de tiempo.	SICE-TAC, 2019 & Infotrip, 2019
Consumo de combustible diésel anual	894.779.504	Galones	Es el consumo que todo el parque automotor de carga consume al año en Colombia.	UPME, 2015
Rendimiento de Combustible	10	km/gal	Es la cantidad de combustible que utiliza un vehículo de carga al recorrer 1 km.	Cálculos propios a partir de Infotrip, 2019 & UPME, 2016
Capacidad Vehículo	23	Toneladas	Es el promedio de la capacidad vehicular de los camiones de carga en Colombia.	RNCD, 2019 & TCC, 2019

Parámetro	Valor	Unidad	Significado	Fuente
Factor emisión CO ₂ Con diésel comercial	10,277	kg/gal	Permiten calcular la cantidad de emisiones de un GEI generadas en la combustión de determinado combustible.	IPCC, 2015
Factor emisión NH ₄ Con diésel comercial	0,37	g/gal	Permiten calcular la cantidad de emisiones de un GEI generadas en la combustión de determinado combustible.	IPCC, 2015
Factor emisión N ₂ O Con diésel comercial	0,37	g/gal	Permiten calcular la cantidad de emisiones de un GEI generadas en la combustión de determinado combustible.	IPCC, 2015
Potencial Calentamiento global N ₂ O	265		Es la cantidad de energía que puede retener determinado GEI en términos de CO ₂ e.	IPCC, 2015
Potencial Calentamiento global NH ₄	28		Es la cantidad de energía que puede retener determinado GEI en términos de CO ₂ e.	IPCC, 2015
Costo Combustible Diésel promedio	8.538	COP/galón	Es el costo promedio de un galón de Diésel en Colombia para el año 2018.	Cálculos propios a partir de MinMinas, 2018
Compra de vehículos anual	{15137, 5645, 6308, 4510, 2383, 1643, 2322 }	Unidades	Venta anual de vehículos de carga mayor de 10,5 toneladas para [2012-2018] en Colombia.	Andemos, 2019

Parámetro	Valor	Unidad	Significado	Fuente
Vehículos desintegrados anual	{1516, 3267, 4864, 3781, 2554}	Unidades	Desintegración anual de vehículos de carga con capacidades mayor a 10,5 toneladas en Colombia de [2012-2016].	DNP, 2018
Precio vehículo	285.200.000	USD	Precio promedio de un vehículo con capacidad de carga de 20 a 25 toneladas.	Mesa, 2019

Tabla 6. Especificaciones de los parámetros del modelo, elaboración propia.

6.2.1.3. Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento

Pruebas de los límites del modelo

Dentro del modelo interactúan variables endógenas y exógenas, en este apartado se analizan estas y se decide si se debe prescindir o incluir ciertas relaciones, es decir, conocer cuáles son los límites del modelo, si las variables que se están estudiando son realmente pertinentes y cuales se deben excluir. El modelo es el resultado del comportamiento económico, este funcionamiento es resultado del desempeño de diferentes sectores en la economía de un país y por lo tanto, el crecimiento económico se considera una variable exógena, así como el Precio de los Vehículos de Carga, que está estrechamente ligado a la Tasa Representativa del Mercado y debido a su volatilidad no es un punto de estudio del modelo.

La infraestructura vial es una variable es muy importante para el sector y es un punto neurálgico para la eficiencia del desempeño de este, pero la forma en que se formuló no estudia como interviene su calidad en el conteo de emisiones de GEI. Los Tiempos Muertos, es otra variable exógena, que podría mejorarse con estrategias logísticas pero que no cobran relevancia en el objetivo del trabajo, y así como la cantidad de utilidad para reinvertir y el precio justo de la tarifa o flete, estas son supuestos de referencia que podrían tener un mejor comportamiento, pero no le compete a este estudio.

Las variables endógenas a analizar en el modelo son las emisiones de CO_{2e}, el consumo de combustible, la flota vehicular y su edad, el comportamiento de los costos al incluir las políticas y la relación demanda-oferta.

Se definieron así las variables con el fin de no extralimitar al modelo y caer en detalles innecesarios a la hora de establecer las políticas dentro del sector, lo cual causaría distracciones del objetivo principal (Valencia & Obando, 2017).

Prueba de condiciones extremas

Con el fin de verificar que el modelo muestre un comportamiento lógico, algunas de las variables o parámetros se sometieron a adoptar valores extremos que muestren salidas razonables de acuerdo con los cambios realizados (Valencia & Obando, 2012). Las variables seleccionadas para adoptar valores extremos fueron Crecimiento Económico, Flota Vehicular y compra de vehículos.

- **Demanda de transporte de carga anual cero y crecimiento económico cero**

Como no hay demanda nacional anual de transporte de carga ni tampoco crecimiento económico, la carga que transportan los camiones también será cero y por lo tanto la actividad económica no generará emisiones de GEI, este comportamiento se observa en las figuras 33 y 34.

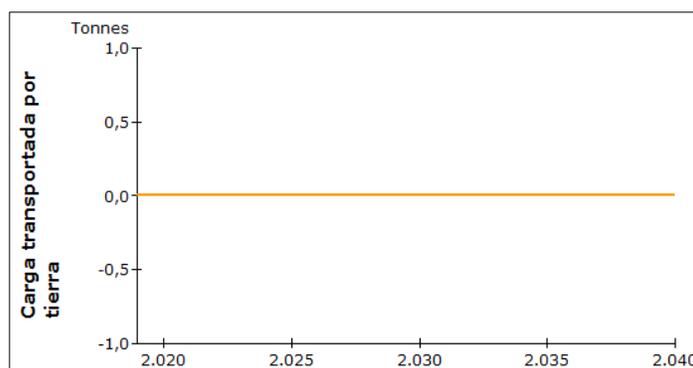


Figura 33. Carga transportada por modo carretero con demanda de carga y crecimiento económico cero.

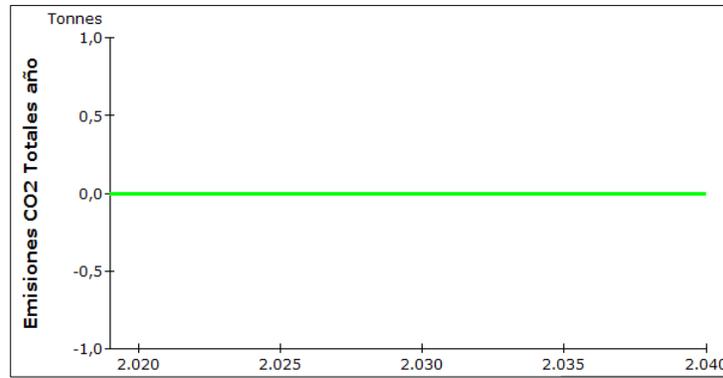


Figura 34. Emisiones de CO₂e con demanda de carga y crecimiento económico cero.

- **Flota vehicular igual a cero**

Al no contar con flota vehicular de carga ni con crecimiento de esta, no hay oferta para transportar mercancías y por lo tanto no se generarán emisiones, como se muestra en las figuras 35 y 36.

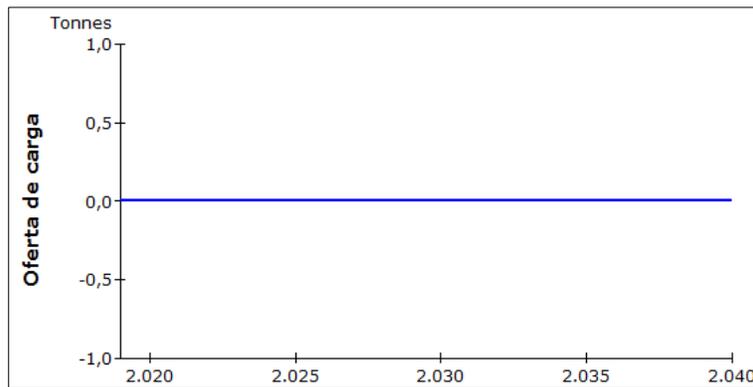


Figura 35. Oferta de carga con flota vehicular y compra de vehículos igual a cero

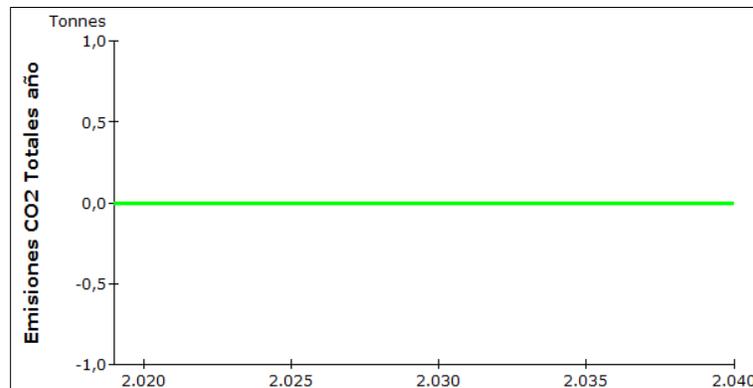


Figura 36. Emisiones de CO₂e con flota vehicular y compra de vehículos igual a cero.

6.2.2. Validación del comportamiento

6.2.2.1. Error de integración

Esta prueba propone verificar la fiabilidad del modelo realizando cambios los pasos temporales de simulación 1 año a 1, 10, 20 y 30 días y en el método de integración (Euler y Runge-Kutta de segundo, tercer y cuarto orden), los resultados se presentan en las figuras 37 y 38, respectivamente.

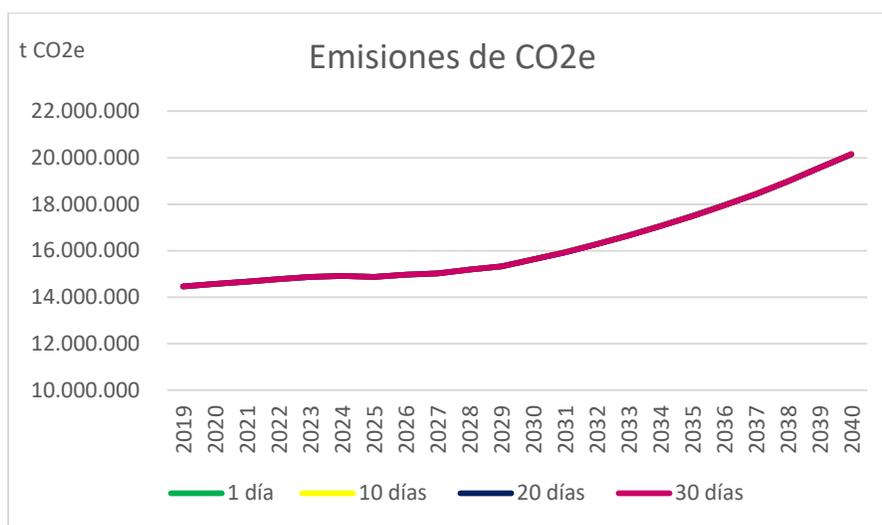


Figura 37. Emisiones de CO2e. Sensibilidad al paso de tiempo. Elaboración propia.

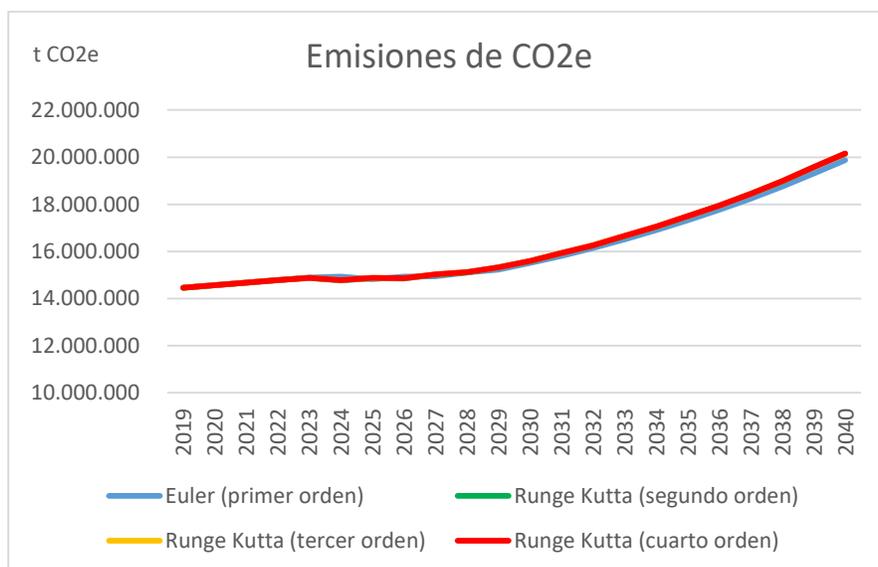


Figura 38. Emisiones de CO2e. Sensibilidad al método de integración. Elaboración propia.

Cuando se realiza la simulación haciendo cambios en el método de integración, hay cierta sensibilidad cuando se hace con el método de Runge Kutta de cuarto orden, arrojando una varianza máxima de 1,45% al final del período de simulación, esta situación se observa en la figura 38. Para el caso del cambio del paso de simulación, no se presenta gran sensibilidad al cambio en este como se observa en la figura 37.

6.2.3. Análisis de sensibilidad

Dentro del modelo se encontraron cuyo valor futuro es incierto, ya que dependen de varios factores externos, comportamientos sociales y económicos. Entre ellos se destacan el crecimiento económico del país y el precio de los vehículos de carga. El crecimiento económico, hace referencia al desarrollo de un país en términos de su Producto Interno Bruto, este depende de cómo es el comportamiento de toda la estructura económica, los precios del petróleo, las decisiones políticas internas entre otras (Vallejo-Zamudio, 2017). Por su parte, en el modelo, el precio de los vehículos de carga en Colombia, dependen de forma directa de la Tasa Representativa del Mercado, que depende de la relación demanda-oferta de la divisa de referencia (BanRep, 2019a).

Por esta razón, se realizó el análisis de sensibilidad con respecto a estos dos parámetros, para el caso del crecimiento se tomaron valores inferiores y superiores con respecto al valor de referencia del modelo que es un crecimiento de 3,5% anualmente en todo el horizonte del modelo, se realizaron simulaciones si el crecimiento del país es de 4% y 5% y por el otro lado, si el desempeño económico de Colombia no es muy bueno, creciendo solo al 1% y al 2%.

Para el caso del valor del vehículo y la TRM, varía el costo en porcentajes dados, que disminuyen o aumentan el precio establecido para un vehículo de carga en el modelo que es 285'200.000 de pesos colombianos (COP). Los resultados se presentan en las figuras 39 y 40.

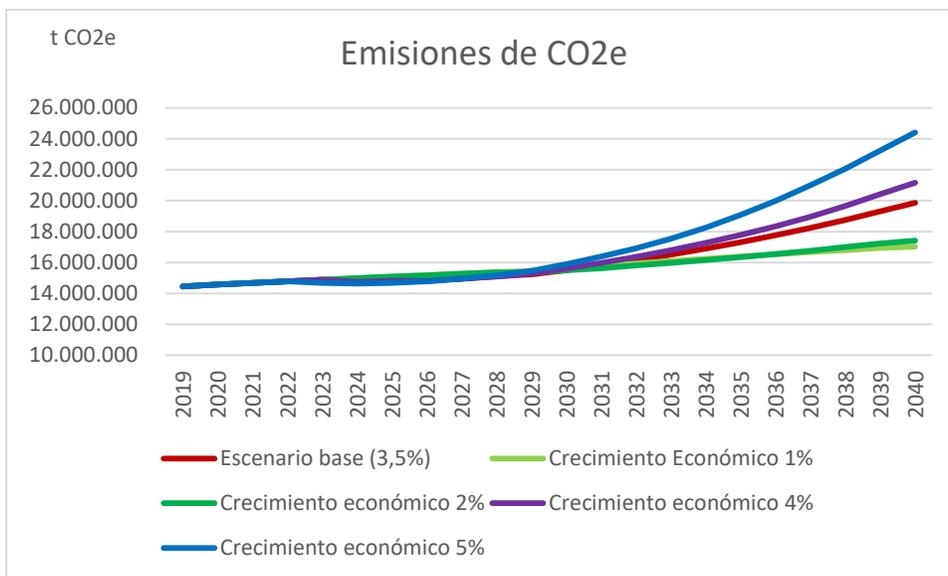


Figura 39. Emisiones de CO_{2e}. Cambio en el crecimiento económico del país. Elaboración propia.

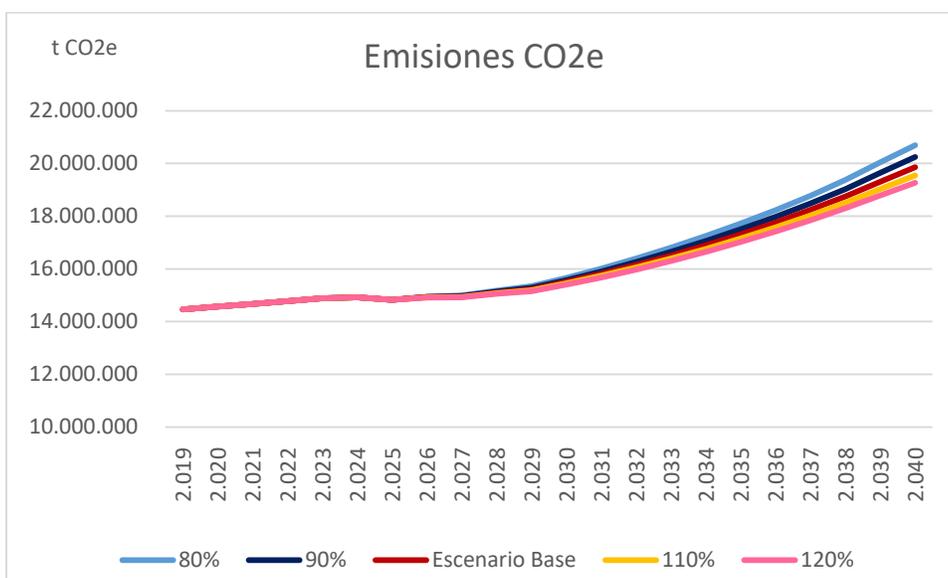


Figura 40. Emisiones de CO_{2e}. Cambio en el precio de los vehículos de carga. Elaboración propia.

Se concluye que el modelo es más sensible a los cambios en el crecimiento de la economía que al cambio en los precios de los vehículos, sin embargo en ambos casos las emisiones sufren cambios al distorsionar dichos parámetros, sobre todo al final del horizonte de simulación, si el crecimiento de la economía crece, las emisiones de GEI crecen, contrario a la relación que se presenta con el precio de los vehículos de carga, si el precio de estos disminuyen las

emisiones tienden a aumentar. Sin embargo todos los datos presentan consistencia en la forma de comportarse.

Conclusiones del capítulo

En este capítulo se realizó un resumen del proceso de creación del modelo, partiendo desde la hipótesis dinámica, analizando el diagrama de flujos y niveles, las principales ecuaciones del modelo y la explicación de las relaciones causales del mismo. Después se presenta el proceso de validación del modelo mediante pruebas a su estructura, consistencia dimensional, comportamiento y sensibilidad, y se verificó el desempeño del modelo para su objetivo el cual es evaluar políticas de mitigación de gases de efecto invernadero para el transporte de carga carretero en Colombia.

Análisis de resultados

A continuación se describirá el proceso de la selección de las políticas o estrategias de mitigación, las cuales pueden ser de índole regulatorio, económico, tecnológico y de conocimiento (Hubenthal, 2010). En la primera parte se describirá el escenario base, y más adelante se describirán las políticas y los escenarios que se analizaron en el modelo de simulación, se presentará el comportamiento de los subsistemas en cada uno de los casos.

6.3. Análisis del caso base

El modelo está dividido en cuatro módulos o subsistemas principales, para el caso base no hay ninguna política o regulación que esté afectando al subsector, este se define como un mercado de competencia perfecta, el cual se debería regular por sí solo y no debería tener ninguna intervención gubernamental.

6.3.1. Emisiones de CO_{2e}

Debido al mal comportamiento económico y financiero por el que está atravesando el transporte de mercancías carretero, en el corto y mediano plazo, las emisiones también se ven afectas y en la primera década no hay un crecimiento pronunciado de dichas emisiones, sin embargo, cuando las condiciones del sector mejoran, se ve como la emisiones comienzan a crecer a una mayor tasa, alcanzando las 20,1 millones de toneladas de CO_{2e} para el 2040, esto representa un crecimiento de las emisiones de GEI del subsector de un 39,3% en el horizonte de tiempo de estudio, el comportamiento de las emisiones se muestra en la figura 41.

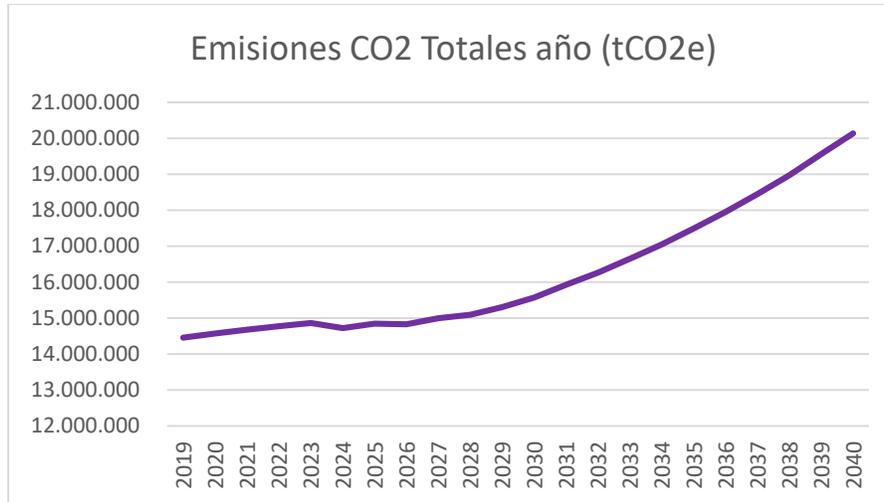


Figura 41. Comportamiento de las emisiones de CO_{2e} para el transporte de carga carretera en Colombia, escenario BAU. Elaboración propia.

6.3.2. Demanda-Oferta

En este subsistema, que se muestra en la figura 42, interactúan los parámetros de demanda y oferta, el primero ligado al crecimiento económico y el segundo al número de viajes potenciales que puede realizar en un año la flota de vehículos de carga del país, con relación a la flota y a la calidad de la infraestructura, para el escenario base, se apoyó en el supuesto de que la infraestructura va a mejorar y por lo tanto los vehículos van a poder viajar a mejores velocidades, al igual que la flota va creciendo como lo muestran las estadísticas. La oferta de transporte de mercancías es tan alta que con las tasas de crecimiento y desintegración actuales, la demanda nunca superará a la oferta, sin embargo la brecha tenderá en el mediano plazo a cerrarse, pero esto generará mejores condiciones y por ende más entrada de vehículos, lo que hará que esta brecha vuelva a abrirse.

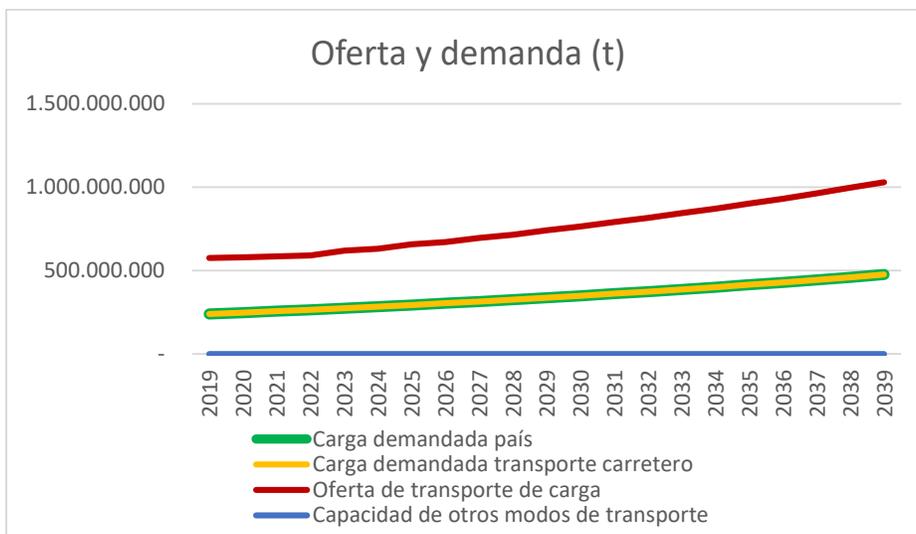


Figura 42. Oferta vs demanda. Elaboración propia.

6.3.3. Costos, ingresos y utilidades

Con los datos de costos y tarifa recolectados, dentro del modelo se identifican muchas ineficiencias e imperfecciones, pues para los primeros años los ingresos son menores que los egresos o los costos, como se ve en la figura 43, y a pesar de la precaria situación en la que se encuentra el rubro la entrada de nuevos vehículos continua.

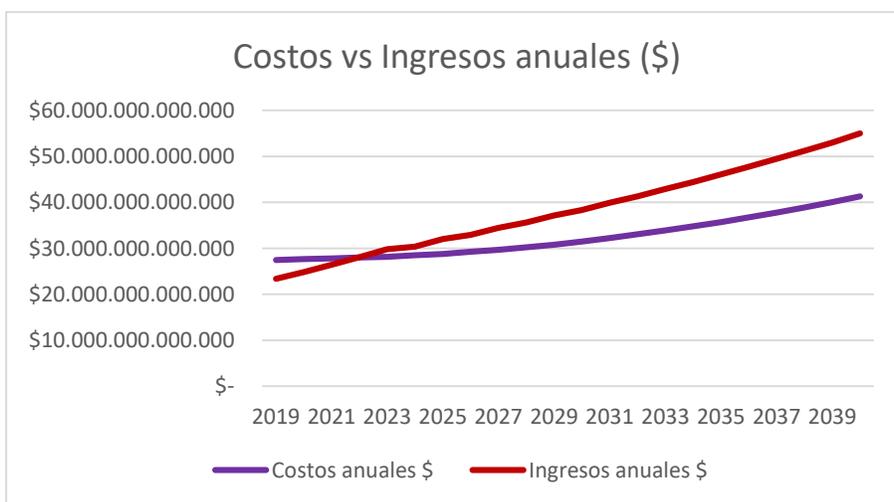


Figura 43. Costos anuales vs Ingresos anuales. Elaboración propia.

En el año 2022, debido a que la compra de vehículos no es elevada en el corto plazo, se da una disminución de la oferta, esto ocasiona que haya una mejora en las tarifas y que se generen más utilidades.

Esta entrada de vehículos se da por lo que se conoce como atractivo del mercado, los nuevos competidores entran al mercado sin conocer la realidad del subsector. A pesar de esto, llega un momento en que se empiezan a dar utilidades, y es donde comienzan a entrar vehículos por reinversión. Nunca se da una carencia de vehículos. Debido a las ineficiencias logísticas y económicas del transporte de carretero antes mencionadas, con las condiciones actuales no se alcanza a generar utilidades suficientes en los primeros años de modelación.

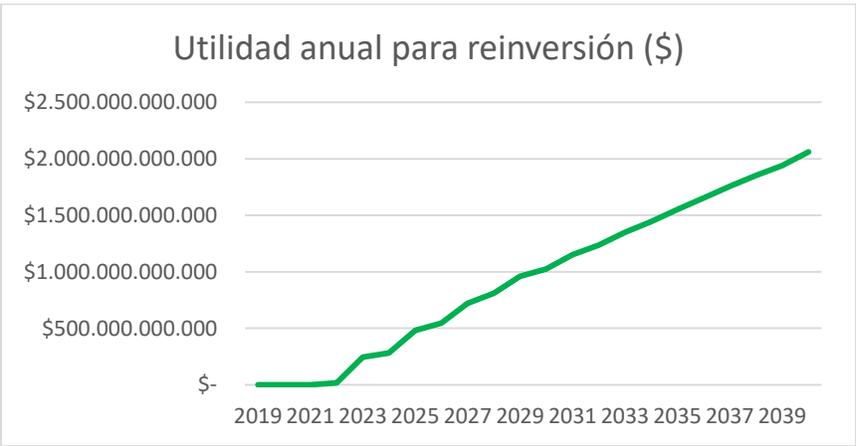


Figura 44. Utilidad anual para reinvertir. Elaboración propia.

6.3.4. Flota vehicular convencional

La flota se comporta dependiendo de las tasas de desintegración y compra de vehículos de carga, estas tasas no presentan un patrón regular a lo largo del paso del tiempo, pero en la mayoría de años la compra es mayor que la desintegración de los vehículos. Estas estadísticas se pueden ver en el Anexo 1. La desintegración depende de la edad de la flota promedio, que con la tasa de desintegración actual, esta edad irá disminuyendo gradualmente al pasar los años, ya que la compra de vehículos en el corto plazo no será tan alta. Adicional a esto, cabe recordar, que los vehículos que se desintegran son los que fueron comprados antes del 2014. Los vehículos que se compraron posterior a este año se consideran como nuevos. El

comportamiento de la flota de carga del país en el horizonte de modelación se detalla en la figuras 45 y 46.

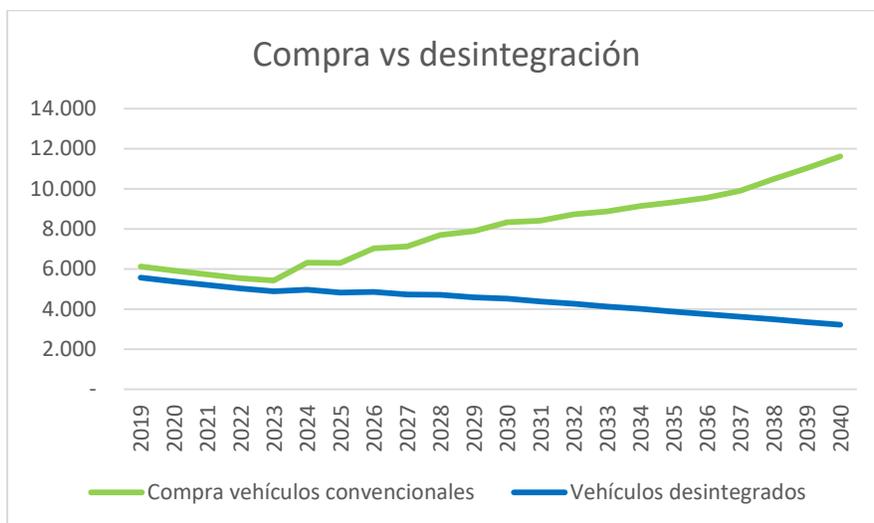


Figura 45. Compra vs desintegración vehicular. Elaboración propia.

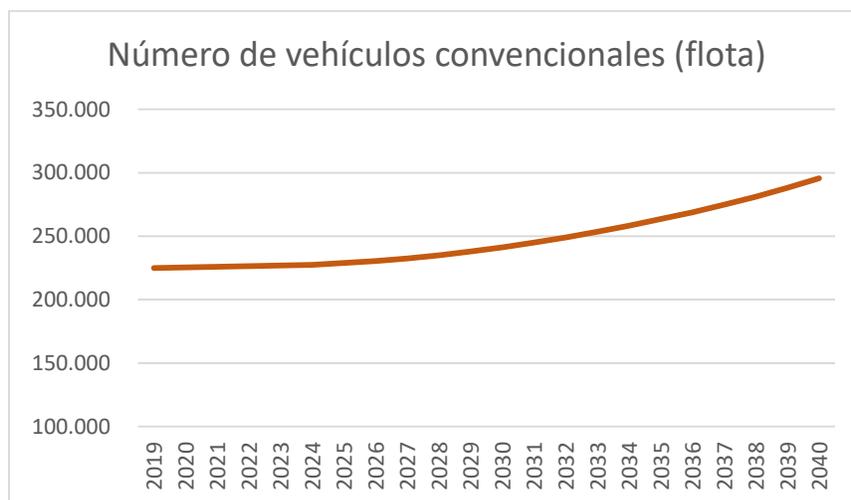


Figura 46. Comportamiento de la flota de vehículos de carga convencionales. Elaboración propia.

6.4. Diseño de escenarios y políticas

No solo en Colombia el transporte de carga carretera es una actividad que genera grandes emisiones de GEI, otros países han venido implementando diferentes estrategias para la mitigación del Cambio Climático (CC) en el desarrollo de esta actividad. Ya que las emisiones

y el consumo de combustibles son proporcionales, muchos países han apuntado a mejorar la eficiencia energética del sector, pues así, al disminuir el consumo de combustible, disminuyen las emisiones generando ahorros para la cadena productiva, un ejemplo de este tipo de estrategias se conoce como “Smart Way” en Estados Unidos, en el que mediante la cooperación entre diferentes actores de la industria, las empresas y transportadores se comprometieron con el objetivo, a cambio de flexibilidad financiera, para adquirir dispositivos (vehículos) más eficientes (US EPA, 2010).

Los instrumentos educativos pueden ser un factor clave en el aumento de la eficiencia, ya que una adecuada gestión del mantenimiento y un buen desempeño de la conducción (Ecodriving), son cambios en el comportamiento de los transportadores conductores que son necesarios para obtener un mejor rendimiento de combustible (Hubenthal, 2010).

Hay otros tipos de políticas que se pueden aplicar, como son las medidas económicas, por ejemplo en Colombia ya se cobra el impuesto al carbono, cobro que se encuentra dentro del precio del combustible que paga el consumidor, sin embargo, como ya se vio, el subsector se caracteriza por tener un desempeño económico pobre, los márgenes son muy pequeños como para penalizar al modo carretero, por otro lado se encuentran los incentivos, los cuales serían útiles para renovar la flota o invertir en nuevas tecnologías.

Los cambios tecnológicos, es otro de los instrumentos para lograr el objetivo, por la magnitud del problema, en el mundo se vienen generando muchas iniciativas e innovaciones para los camiones de carga, que se mencionaron en el capítulo cuatro, como son las nuevas fuentes de energía de propulsión y la automatización de la conducción. Lamentablemente, muchas de las nuevas tecnologías apenas están en período de prueba, y aún no es posible saber, para Colombia, cuando serán tecnologías asequibles para los empresarios y dueños de los vehículos. En la actualidad, ya se comercializan en el país vehículos de carga a gas, eléctricos e híbridos y en su mayoría realizan entregas urbanas.

Las herramientas regulatorias, son aquellas que son normatividad para regular, poner orden y justicia a los sectores económicos, cuando hay imperfecciones en el mercado, para el caso de

la actividad de transporte de carga, algunas estrategias regulatorias que se pueden implementar serían el de limitar la vida útil de los vehículos de carga o regular el crecimiento del parque automotor, como se ha hecho en los países de la OCDE (Hubenthal, 2010).

Considerando todos los tipos de estrategias que pueden ser implementadas en el caso Colombiano y aquellos cambios que eventualmente se van a dar en el país, se formularon cuatro diferentes escenarios, los cuales se muestran en la figura 47 y se propusieron dos políticas de regulación.

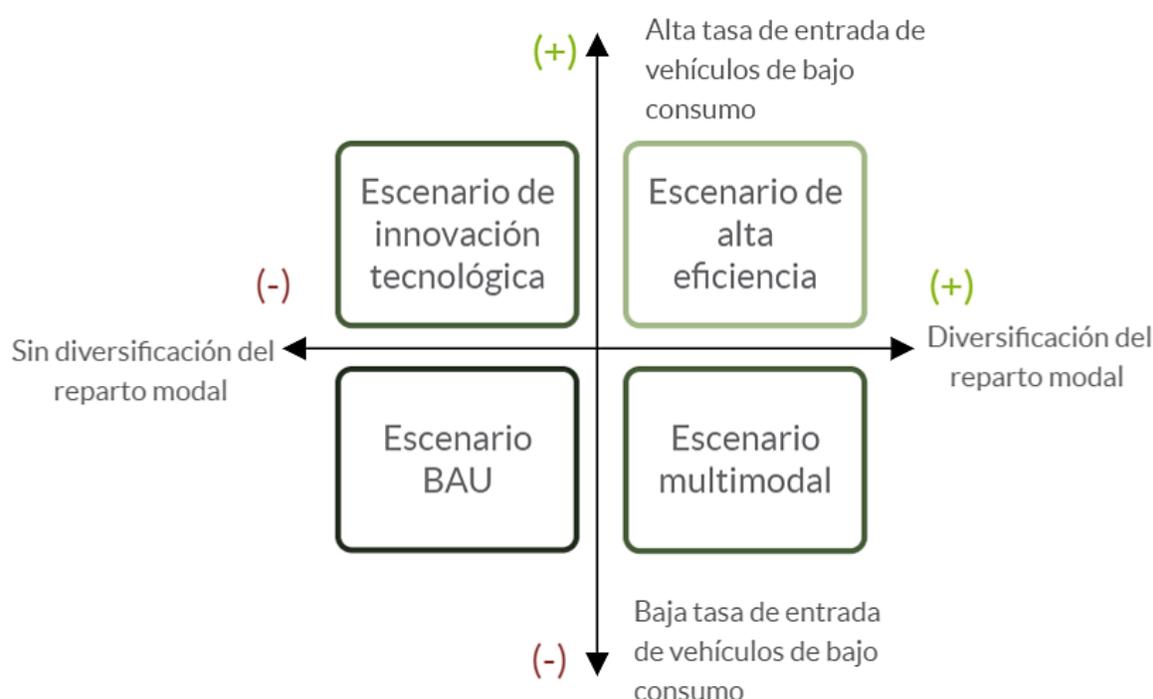


Figura 47. Escenarios para valuación de políticas para reducción de emisiones del transporte de carga carretera en Colombia. Elaboración propia.

Los diferentes escenarios se plantean a partir de dos ejes que representan la alta o baja entrada de un cambio, en el eje X se encuentra la diversificación del reparto modal y en el eje Y se encuentra la entrada de camiones con nuevas tecnologías con rendimientos del combustible mucho mayor al de los vehículos convencionales.

En cuanto a la entrada de nuevas tecnologías no se seleccionó aquellos que son cero emisiones, como los eléctricos o los de celdas de combustibles, pues debido a las condiciones de la red vial

de Colombia (condiciones de alta montaña y recorridos muy extensos) aún no se garantizan su adecuada implementación en el país, por esta razón se seleccionó la entrada de vehículos híbridos, que se llamarán con el nombre de “Vehículos de bajo consumo”. La razón es que los motores de camiones de carga pesada está migrando hacia tecnologías híbridas, como se pudo observar en la sección 3.4.

Los escenarios conformados por las condiciones antes descritas, conforman los cuatro escenarios de estudio, el escenario base o BAU, un escenario donde los otros modos de transporte como el férreo y el fluvial tienen mucha más participación en el reparto modal robándole demanda al modo carretero, según las primeras estimaciones que considera el DNP (escenario multimodal), el escenario innovación, en el cual no se favorecerían los otros modos, pero con ayuda de las nuevas tecnologías el modo carretero sería mucho más sostenible y el último el cual se caracterizaría por su eficiencia en el transporte, ya que habría diversidad en los modos para transportar las mercancías y vehículos nuevos mucho menos contaminantes (escenario de alta eficiencia).

Para la selección de las políticas, se analizaron aquellas que podrían generar grandes efectos positivos para el conteo de emisiones de GEI, enfocadas en el regular el parque automotor de carga, por medio de poner un tope de vida útil para estos vehículos y limitar el crecimiento de la flota.

La política 1, tiene que ver con la creación de unos cupos que se generan al desintegrar un camión de carga, esta política puede tener variantes, las cuales dependen del tiempo que se implemente la norma y del número de vehículos que pueden entrar por un dado número de vehículos que salen o se desintegran. Para este caso, la política tendrá una vigencia de 5 años, iniciando desde el 2020 al 2025, y por dos camiones que se desintegren se creará un cupo para un nuevo camión.

La política 2, consiste en limitar la vida útil de los vehículos, la vigencia de esta política será todo el horizonte temporal del modelo y esta regulación de vida útil será de 15 años, es decir, cuando el vehículo cumpla esta edad, deberá desintegrarse.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos al implementar dichas políticas en el modelo, se hará énfasis en las emisiones de GEI y en las utilidades.

6.5. Análisis de resultados

En este apartado se presentan los resultados de mitigación de GEI, bajo los diferentes escenarios, seguido del comportamiento de las emisiones de CO_{2e} aplicando las políticas 1, 2 y una mezcla de ellas y finalmente, un escenario con la mezcla de todas las iniciativas que podrán impactar favorablemente a la cantidad de emisiones de GEI que genera el transporte de carga en el país. Los resultados de la implementación de las diferentes estrategias y políticas se comparan con el escenario base o BAU.

6.5.1. Resultados para los diferentes escenarios y políticas

Las políticas implementadas en el modelo son medidas regulatorias, con el fin de limitar la cantidad de entrada de nuevos camiones, por medio de unos cupos que se crean año a año por la salida o desintegración de los camiones más antiguos, de esto trata la medida 1 (P1), los cupos se comportan 2 a 1, es decir, por la salida de 2 vehículos de carga se crea 1 cupo para que entre uno nuevo. La medida se proyectó de esta manera, debido a que, una medida 1 a 1, no generaba mayores cambios comparado con el escenario base. La implementación de la medida regulatoria solo aplica para un intervalo de tiempo, el cual está comprendido entre 2020 y 2025.

La política 2 (P2), aumenta la tasa de desintegración al regular la vida útil máxima de los camiones, esta política ataca al envejecimiento por el que está pasando el parque automotor de carga colombiano, previniendo externalidades negativas tales como mayor proporción en las emisiones de gases contaminantes y reduciendo la accidentalidad, esta se aplica a todo el horizonte del modelo.

En la figura 48, se registran los resultados de las emisiones generadas por la actividad económica, bajo el escenario BAU implementando las políticas P1 y P2, y la mezcla de estas dos y la figura 49, muestra el comportamiento de las utilidades al aplicar la normatividad, en

ambas figuras se comparan los diferentes casos con el base o BAU. El escenario BAU, como su nombre lo indica es el escenario actual, si no hubiesen cambios al 2040.

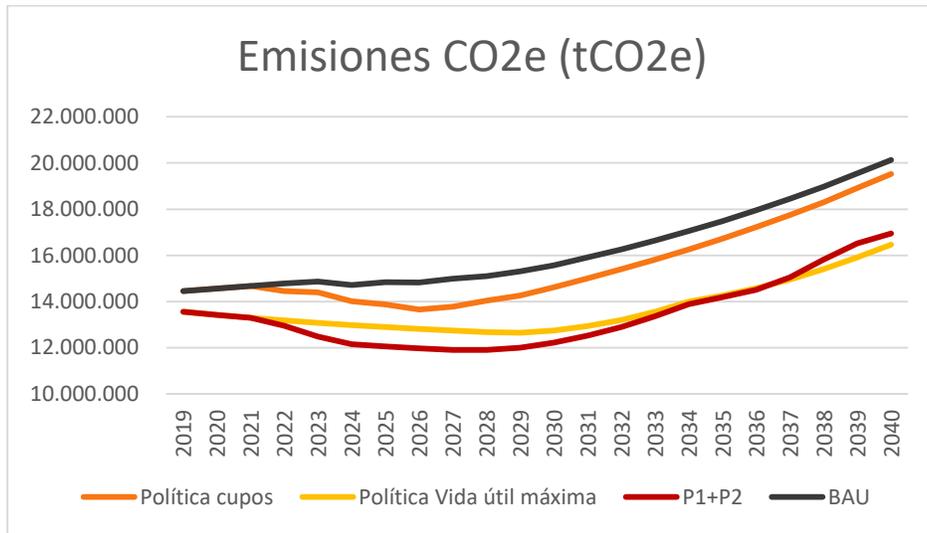


Figura 48. Emisiones de CO_{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo escenario base y políticas. Elaboración propia.

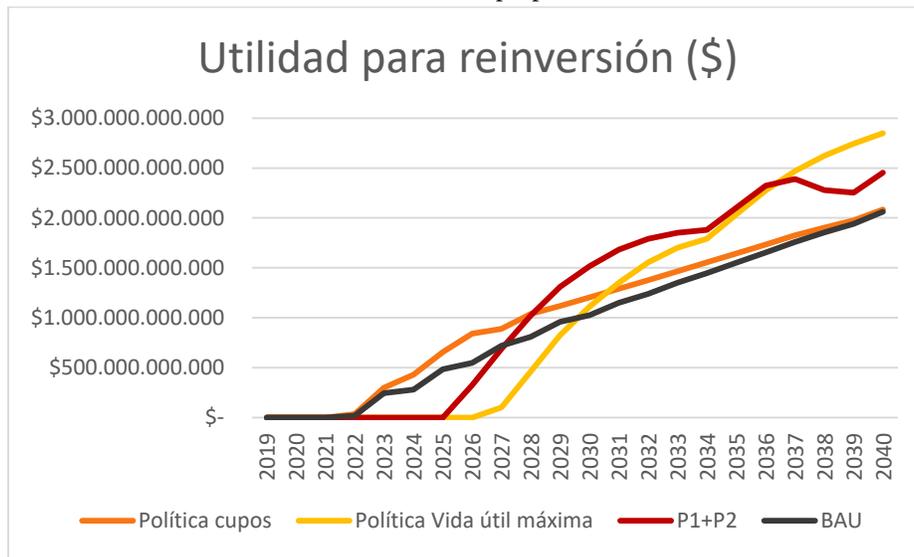


Figura 49. Utilidad para reinversión del sub-sector escenario base y políticas. Elaboración propia.

Se observa que, la política de limitar la máxima vida útil de los camiones y la combinación de ambas políticas son las que arrojaron mejores resultados en cuanto a disminución de emisiones. Sin embargo, la política de máxima vida útil genera un efecto muy negativo en las utilidades del sector, si bien, la desintegración se eleva, la flota trata de recuperarse y unos

vehículos más nuevos, traen consigo mayor disponibilidad para realizar viajes, lo que finalmente se traduce en un aumento de la oferta. Para el último año de simulación, esta renovación de parque automotor genera un buen aumento de las utilidades.

Resulta contraintuitivo que la combinación de políticas en el escenario BAU tenga un comportamiento más pobre que solo si se aplica la política de vida útil máxima, esto se da porque la política de cupos funciona solo en el intervalo de 2020 a 2025, y de este último año hacia el futuro la flota tiende a recuperarse por las utilidades acumuladas que quedan de este período.

El “escenario multimodal”, supone mayor participación de otros modos de transporte menos contaminantes, como el férreo y el fluvial, según las estimaciones del Departamento Nacional de Planeación de Colombia, la participación del modo carretero pasará de 73% a 2019 a 66% en 2030, según estos datos, se plantea un crecimiento proporcional para el 2040, es decir, para 2020 se supone una reducción de la demanda por modo carretero del 7%, para 2030 del 14% y para 2040 del 20%.

En las figuras 50 y 51, se muestran cuáles fueron los resultados de la aplicación de cada una de las políticas y la mezcla de ellas en el escenario multimodal y se comparan con el mismo, respecto a las emisiones de CO_{2e} y a las utilidades.

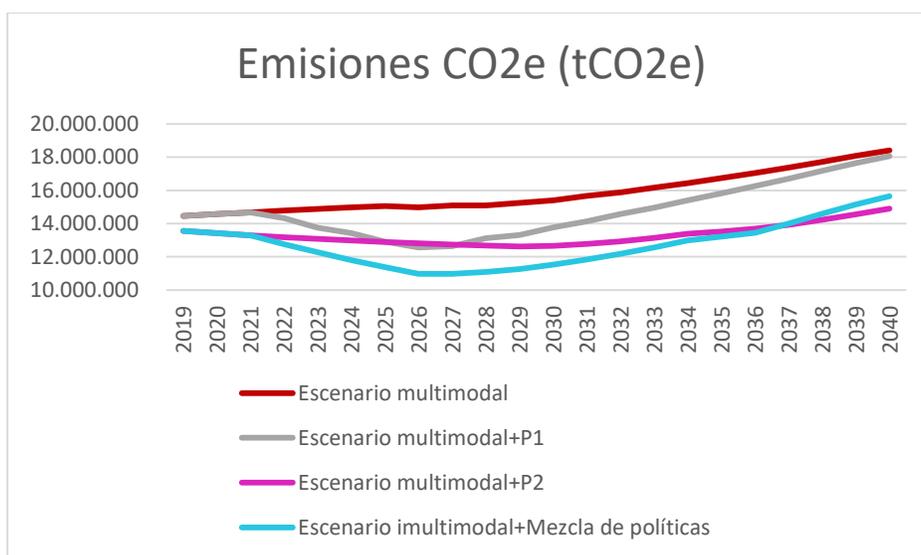


Figura 50. Emisiones de CO_{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo escenario multimodal e implementación de políticas. Elaboración propia.

El escenario multimodal más la implementación de la política 2 o de regular la vida útil es que le presenta mejor comportamiento en cuanto a las emisiones del subsector al final del horizonte de modelación, sin embargo tiene el peor rendimiento con respecto a las utilidades. Si se aplican ambas políticas al escenario multimodal tendrá una buena reducción de emisiones y el comportamiento de las utilidades será bastante mejor.

Como sucede en el escenario BAU, la mezcla de políticas no tiene tan buenos resultados como la política de regulación de la vida útil, ya que, como se dijo anteriormente, el rendimiento de la política de cupos no funciona tan bien por solo hacerse en un intervalo de tiempo dado.

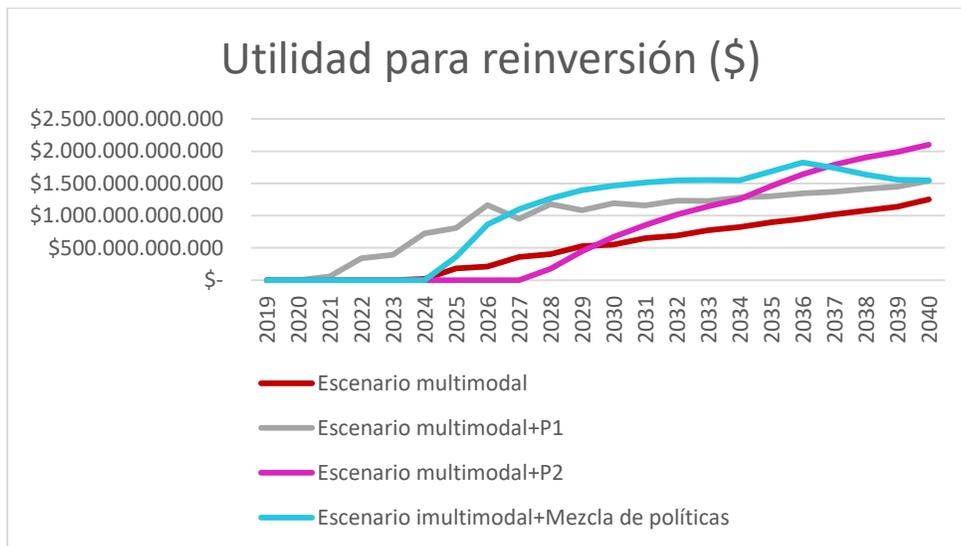


Figura 51. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo escenario multimodal e implementación de políticas. Elaboración propia.

El “escenario de innovación” consta de la entrada de vehículos de carga de bajo consumo de combustible, híbridos, a partir del año 2025, como una selección de los propietarios de los vehículos equiparando los costos fijos y variables tanto de los camiones de bajo consumo como los convencionales, según esto, la probabilidad de que una empresa o persona compre un vehículo de bajo consumo es del 42% y la probabilidad de compra de un vehículo convencional es del 58%, estos porcentajes se calcularon basados en los costos variables y fijos de cada tipo de vehículo. En la figura 53 se muestra la tendencia de la utilidad para reinversión para dicho

escenario, se destaca el aumento de estas utilidades, ya que el consumo de diésel para recorrer una distancia dada será menor, por lo tanto los costos variables disminuirán, a pesar de que el costo del vehículo sea mayor, esto solo se ve reflejado en el interés de compra. El rendimiento de un camión súper eficiente o de bajo consumo puede llegar a ser de hasta 45 km/gal, sin embargo, para las condiciones de topografía y altura de las carreteras de Colombia, se supuso que el rendimiento solo sería de 25 km/gal. Esto genera muy buena mitigación de las emisiones ya que el consumo puede reducirse a la mitad o podría ser más en un futuro con los nuevos avances, esto se ve en la figura 52.

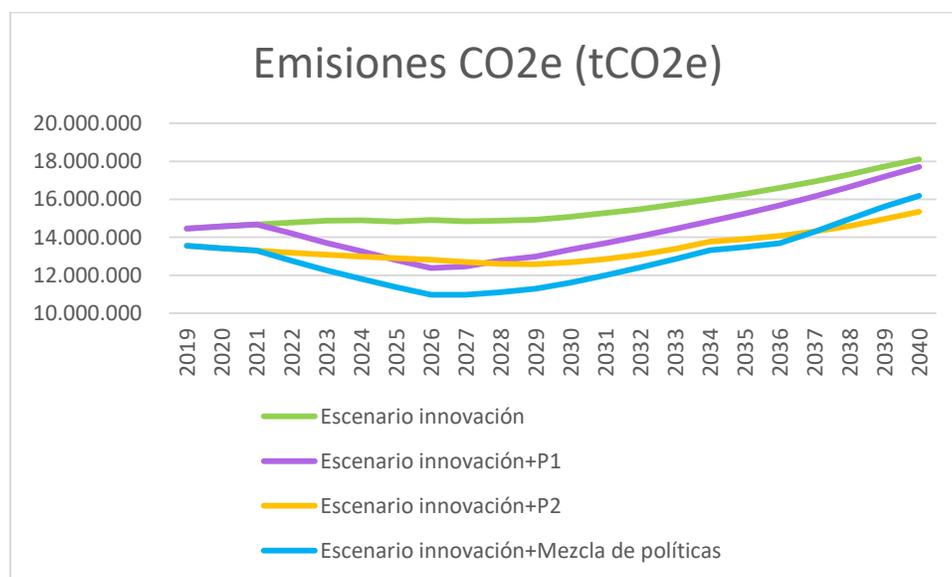


Figura 52. Emisiones de CO_{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo bajo escenario innovación e implementación de políticas. Elaboración propia.

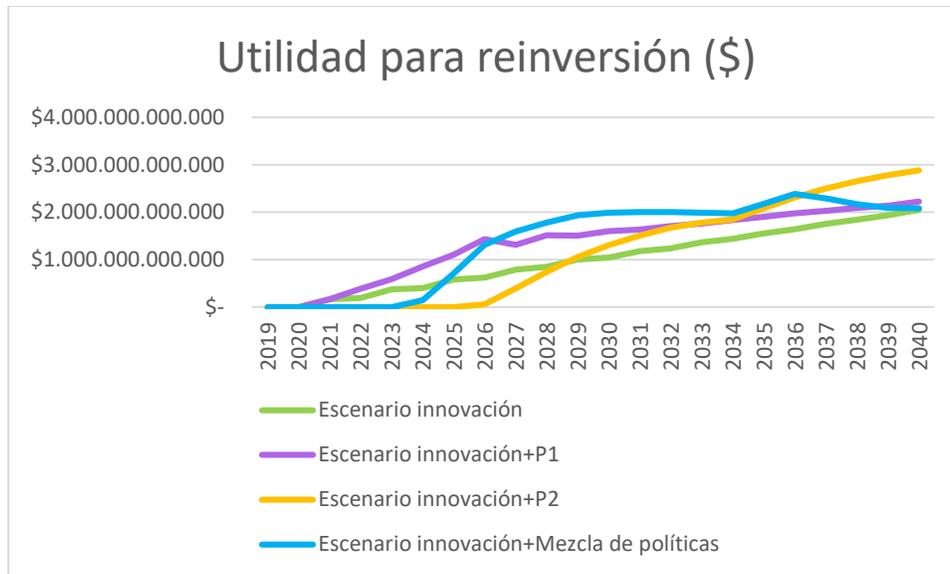


Figura 53. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo bajo escenario innovación e implementación de políticas. Elaboración propia.

Como se puede observar, la mezcla de políticas y el escenario innovación muestran un buen comportamiento tanto en la mitigación de emisiones como en las utilidades. Cuando se aplica la política 2, se mitiga de buena manera las emisiones y las utilidades en un principio son muy bajas, sin embargo presentan un buen comportamiento al final del horizonte.

El “escenario de alta eficiencia”, plantea la ocurrencia de los dos escenarios descritos en todo el horizonte del modelo. Este escenario es el que obtuvo mejor desempeño en cuanto a la reducción de emisiones para el 2040, alcanza a mitigar las emisiones de GEI un 16%. También registra un buen desempeño económico, ya que con la participación de los vehículos de bajo consumo de combustible se generan buenos ahorros. Los escenarios de innovación y multimodal consiguieron resultados similares a la hora de mitigar los GEI, sin embargo, el escenario multimodal representaría un riesgo para la estabilidad económica y financiera del sector, al quitarle demanda. Los resultados de la implementación del escenario de alta eficiencia y las políticas se muestran en las figuras 55 y 56.

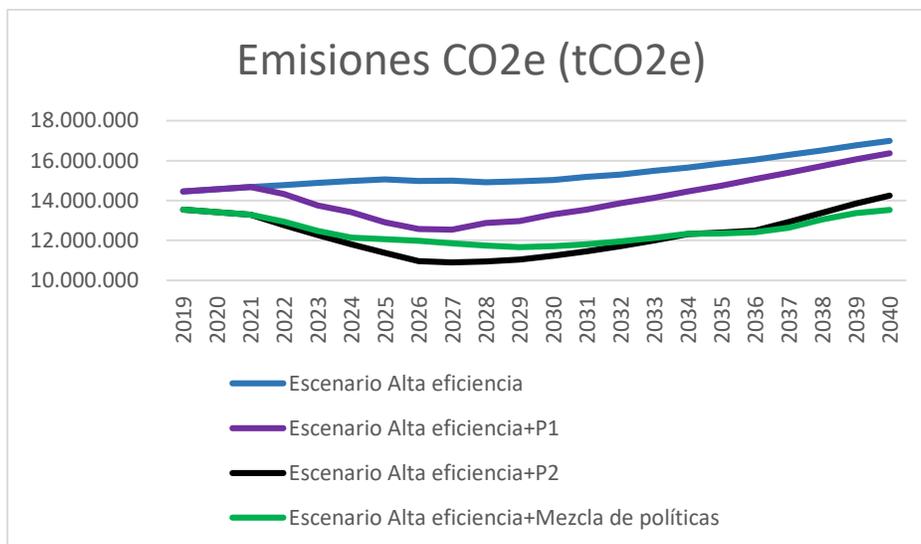


Figura 54. Emisiones de CO_{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo bajo escenario de alta eficiencia e implementación de políticas. Elaboración propia.

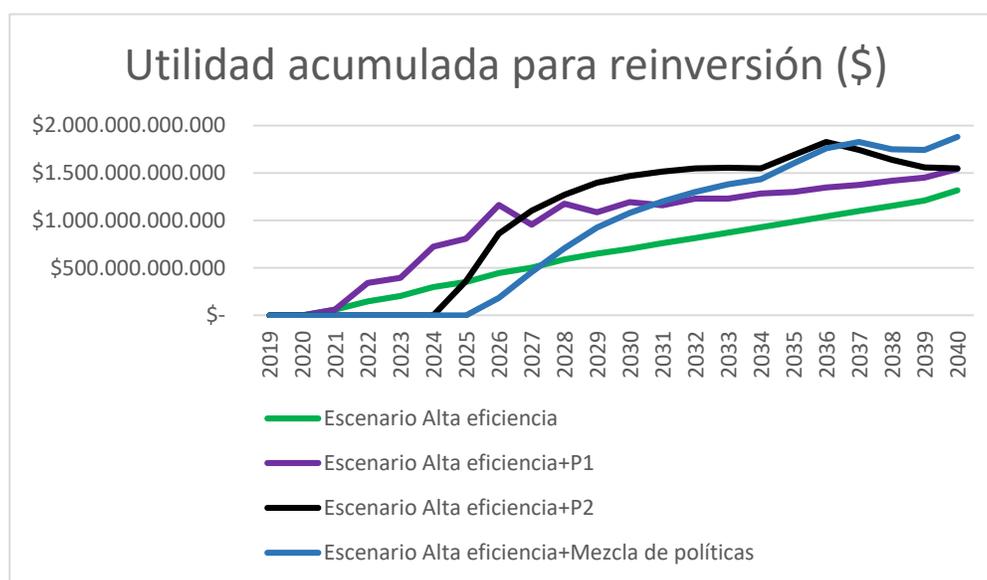


Figura 55. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo bajo escenario innovación e implementación de políticas. Elaboración propia.

Indudablemente, el escenario de alta eficiencia y la mezcla de las políticas permitirán cumplir e incluso sobrepasar los compromisos de Colombia a 2030, y lograr excelentes resultados a 2040. Es notable que los escenarios que mejor impactan las emisiones de CO_{2e}, tienen un

impacto negativo sobre las utilidades, no obstante, la entrada de vehículos más eficientes generará mejores utilidades en la actividad económica.

6.5.2. Resultados de la mezcla de iniciativas

Finalmente se comparan el escenario base y el escenario de alta eficiencia más la implementación de ambas políticas, los resultados se muestran en las figuras 56 y 57, tanto en la moderación de las emisiones de CO_{2e} como en las utilidades del sub-sector.

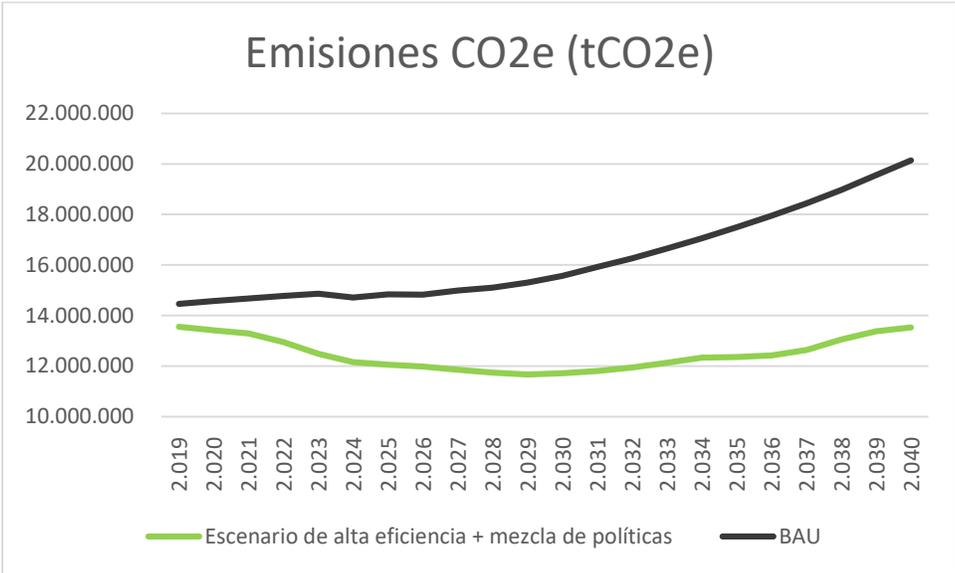


Figura 56. Emisiones de CO_{2e} del transporte de carga carretera en Colombia bajo la implementación de diferentes políticas regulatorias y escenarios. Elaboración propia.

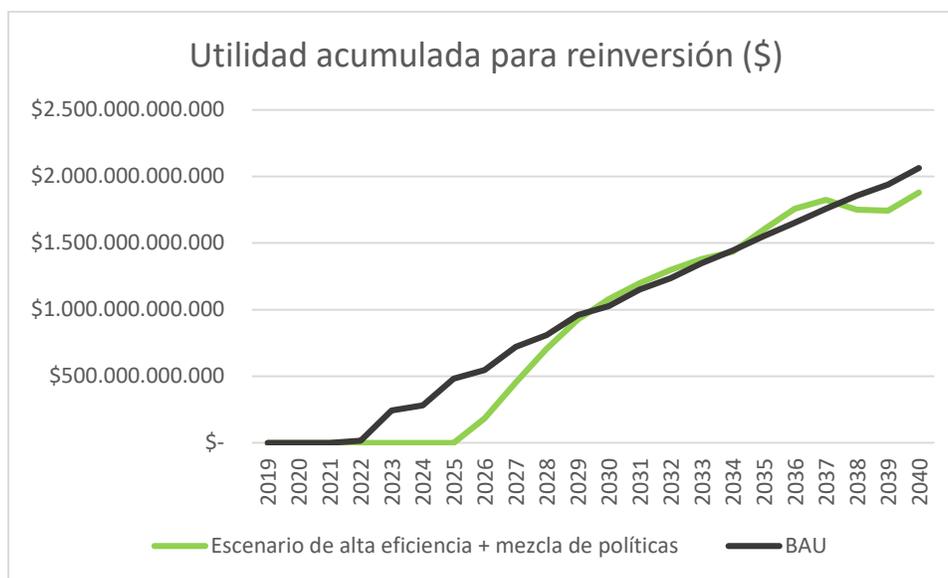


Figura 57. Utilidad para reinversión del sub-sector bajo la implementación de diferentes políticas regulatorias y escenarios. Elaboración propia.

La implementación de todas las estrategias ofrece resultados muy positivos para la reducción de emisiones, ya que se pueden disminuir estas en un 25% para el 2030 y 30% para el 2040, frente al escenario base, sobrepasando la meta actual nacional del 20% a 2030. Desafortunadamente, la mezcla de las alternativas tendría un impacto negativo en las utilidades del sector, aunque con la entrada de los vehículos de bajo consumo en 2025, se generarían mejores resultados en este sentido.

Se concluye en este capítulo, que es posible reducir las emisiones de GEI generadas por la actividad del transporte de carga carretero hasta en un 30%. Aún hay muchas más estrategias que se pueden implementar en el sector, si se quiere ser más agresivo en la mitigación del CG. En el capítulo siguiente, se expondrán las conclusiones de la investigación realizada, también se analizarán varios aspectos relevantes que deben ser tenidos en cuenta si las iniciativas estudiadas desean ser llevadas a la realidad en el país.

7. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

En la primera parte de este capítulo se describe de qué manera se cumplieron los objetivos propuestos para el desarrollo de la tesis. En la segunda parte se brindarán conclusiones sobre los resultados arrojados por el modelo de simulación, así como algunas recomendaciones que se generan a partir de las características del comportamiento del sistema. Finalmente se propone el futuro de la investigación frente a la mitigación del CC desde la actividad económica.

7.1. Reporte del cumplimiento de objetivos

A continuación se reportará como se cumplieron cada uno de los objetivos específicos, lo que garantiza el cumplimiento del objetivo general del presente trabajo.

Objetivo específico 1: “Recolectar, clasificar y ordenar información sobre el transporte de carga, la eficiencia de los vehículos y sus emisiones por km recorrido.”

Durante el desarrollo de la hipótesis dinámica del modelo de simulación, se analizó la realidad actual y la historia del transporte de carga por carretera en Colombia y las emisiones de GEI que genera la actividad, así mismo se investigó el funcionamiento del sub-sector y se recolectaron datos importantes para la creación del modelo, esta información se resume en los antecedentes, capítulo 2 y en la validación del modelo sección 4.2.

Objetivo específico 2: “Identificar políticas o tecnologías que ayuden a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de transporte de carga.”

Durante el estudio del funcionamiento del sistema de transporte de carga carretera en Colombia y otros países, se encontraron diferentes estrategias que se han implementado alrededor del mundo para mitigar las emisiones de CO_{2e} en dicho sector, el cumplimiento de este objetivo se resume en los capítulos de antecedentes, marco teórico y revisión de la literatura, donde se exponen las iniciativas observadas.

Objetivo específico 3: “Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar políticas de reducción de gases de efecto invernadero en el transporte de carga por carretera en Colombia.”

A través de la metodología de dinámica de sistemas, se desarrolló el modelo de simulación para evaluar varias de las políticas que se habían encontrado en otros estudios. Este modelo se validó para verificar su capacidad de implementar y probar las políticas y escenarios seleccionados según las características del sistema estudiado. Este objetivo se cumple mediante la modelación, capítulo 6, donde se describen las razones de la metodología utilizada, se describe la hipótesis dinámica, se exponen las ecuaciones que enlazan las variables y se verifica su validez para realizar la tarea objetivo.

Objetivo general: “Evaluar el impacto de diferentes políticas de reducción de gases de efecto invernadero en el transporte de carga por carretera en Colombia.”

Este objetivo reúne todo el trabajo realizado en el proceso investigativo que se llevó a cabo, sin embargo, el cumplimiento de este objetivo se resume en el capítulo 7, donde se seleccionan y se evalúan los escenarios de simulación y las políticas regulatorias a ser implementadas para la reducción de gases de efecto invernadero generados por el transporte de carga por camiones o carretero en el contexto colombiano.

En cuanto a las preguntas de investigación, con el desarrollo de la tesis se encontraron diferentes alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el mediano y largo plazo. Según el contexto del transporte de carga colombiano se encuentran diferentes alternativas muy favorables para alcanzar el objetivo y no desestabilizar económicamente a los actores de esta cadena como es la modernización tecnológica y la regulación de la vida de los camiones, los cuales son factores que inciden fuertemente en la gran cantidad de emisiones de CO_{2e}. También se observó que es posible cumplir los compromisos del país en materia de emisiones de GEI e inclusive ir más allá, con un adecuado manejo se podría hablar de reducir las emisiones del transporte de carga en el país en un 25% para 2030 y en un 40% para 2040.

7.2. Conclusiones

En esta sección se comparten los hallazgos más relevantes que dejan tanto los resultados del modelo de simulación, la revisión de la literatura como la revisión general del sistema estudiado.

En los antecedentes de la tesis se brinda el panorama general de la realidad de la actividad de transporte de carga en Colombia, en sus principales modos y sus externalidades negativas como las emisiones de GEI que genera el modo carretero, de esta manera se sensibiliza acerca del problema que existe en este sentido y de las acciones correctivas que se deben tomar al respecto. En el trabajo también se explican conceptos básicos para el entendimiento de las emisiones del transporte carretero, se realizó una revisión del estado del arte considerando investigaciones científicas recientes. Para cumplir los objetivos pactados, se desarrolló un modelo de simulación capaz de implementar diferentes escenarios y políticas de mitigación del cambio climático en función de la cantidad de emisiones de GEI que produce dicha actividad. Y se concluye que sí existen instrumentos políticos o estrategias capaces de disminuir las emisiones atribuidas en un horizonte dado, en los porcentajes asignados.

Durante la delimitación del problema en distintos escenarios del mundo, se concluye que las emisiones de GEI del transporte de carga carretera no es un problema exclusivo de Colombia, como se observó en la revisión de la literatura, es un problema de carácter mundial y presenta complicaciones similares, pero también con diferencias muy marcadas, ya que todos los países tienen regulaciones e infraestructuras distintas.

Se reconoce el compromiso de muchas naciones con la mitigación del CC. Durante la revisión de la literatura, se halló la evaluación de políticas y escenarios para la reducción de emisiones de CO_{2e} que se ha llevado a cabo para el sector transporte, en diferentes regiones o países bajo la mirada de diferentes metodologías, esto sugiere que no hay metodologías preestablecidas para el estudio de determinados temas y que resulta muy beneficioso el complemento entre ellas para encontrar posibles distorsiones y errores, y hacer hallazgos más contundentes.

El subsector de transporte de carga en Colombia se caracteriza en que su funcionamiento está supeditado a la toma de decisiones de muchos actores, y a pesar de que el mercado esté marcado por una alta competencia, presenta muchas imperfecciones, además, ha sido afectado por una serie de malas decisiones ocasionando que el sector se encuentre en un momento de utilidades muy bajas o casi nulas. Este comportamiento ha generado que la flota de camiones de carga se haya tornado tan antigua, que caminen por las carreteras vehículos en mal estado y que sus emisiones sean más altas que las de los sectores energético e industrial. Sin embargo, cualquier intervención que se deba realizar para alcanzar las metas propuestas en el Acuerdo de París, deben ser revisadas para que no provoquen una desestabilización financiera de la actividad, más bien, estas deberían ir acompañadas de incentivos o flexibilización en la financiación, como se ha realizado en otros países, arrojando excelentes resultados. Por lo tanto, debido a las bajas utilidades del sector, se considera erróneo imponer medidas regulatorias que penalicen la actividad, ya que serían muchas personas quienes se verían perjudicadas en sus ingresos.

Durante la evaluación de los escenarios y políticas regulatorias, y basados en estudios similares, se concluye que a pesar de una posible desestabilización económica del segmento causada por una mayor participación de los otros modos de transporte, es importante que modos más sostenibles económica y medioambientalmente entren en el reparto modal, de una forma escalonada, pues esto puede significar un mayor bienestar a la sociedad en general, quitando la dependencia del país al modo carretero y flexibilizando la actividad.

Sin embargo, realizando una exploración de las nuevas tecnologías, las cuales muchas están en fase exploratoria, se abren nuevas posibilidades que podrían permitir que el transporte de carga carretero en el mundo llegue a tener emisiones de contaminantes cercanas a cero, y a que sea altamente competitivo y eficaz, causado por un uso más eficiente de los combustibles, generando grandes ahorros en la actividad económica.

Una política de cupos, no presenta mayor relevancia si solo se hace en un intervalo de tiempo dado, tampoco puede ser implementado en todo el tiempo pues daría pie a una reducción

desmesurada de la flota, pero se abre la posibilidad de que este se pueda hacer en varios intervalos escalonados con el fin de estabilizar la relación demanda oferta y generar un parque automotor de carga más joven, ya que como se observa en el apartado de resultados, al aplicar la política en un intervalo de años solo causaría una reducción de la flota en esos años, dando así una acumulación de utilidades que serán utilizadas cuando acabe la regulación generando un crecimiento exponencial de la flota para los años posteriores.

La política de limitación de la vida útil puede generar muy buenos efectos en materia de reducción de emisiones, sin embargo, debe implementarse de manera precisa para no generar perturbaciones en la estabilidad económica del subsector.

Se concluye pues, que es posible alcanzar las metas trazadas por el gobierno del país en materia de reducción de emisiones, bajo la integración e implementación de diferentes estrategias e inclusive, es posible alcanzar metas más ambiciosas, con el correcto acompañamiento del estado y con la sinergia de los diferentes participantes del sector.

El modelo de simulación desarrollado en este trabajo, sirve como base para realizar evaluaciones futuras de otras políticas o escenarios de disminución de emisiones de GEI del transporte de carga carretero en Colombia y en países donde el sistema funcione de forma similar.

7.3. Trabajo futuro

En este trabajo se evaluaron la efectividad de ciertas estrategias de cambio y políticas regulatorias que pueden ayudar a alcanzar las metas propuestas por el gobierno de Colombia en materia de mitigación del Cambio Climático, no obstante, es importante destacar otras iniciativas que podrían cooperar en la reducciones de dichas emisiones, como aquellas que tienen que ver con el comportamiento y de educación, tales como son el “Ecodriving” o una correcta gestión del mantenimiento, ya que son estrategias que no necesitan grandes inversiones y que pueden generar resultados muy favorables. También, se podrían evaluar escenarios donde haya mayor participación de vehículos de carga con motores a GNC o GNL,

así como analizar la penetración de vehículos cero emisiones, como los de celdas de combustibles y eléctricos.

Con respecto a otros aspectos del modelo, sería interesante estudiar las emisiones de la actividad general, incluyendo las originadas por los otros modos como el férreo, el fluvial y el aéreo.

Como se observó en los resultados de la simulación, son notorias las imperfecciones económicas del transporte de carga carretera en Colombia, y sería interesante estudiar los trasfondos de esta circunstancia, para así evaluar políticas que ayuden a la estabilización económica del sector, ya que para que llegue a alcanzar un comportamiento sostenible, es necesaria una intervención en su competitividad, o entender cómo debería ser la relación demanda-oferta para un correcto y eficaz comportamiento de la actividad.

Por último, ya que los mayores costos de un transporte se generan en la “última milla”, es decir, cuando estos hacen recorridos en las zonas urbanas, se podrían estimar las emisiones en esta parte del transporte de mercancías, ya que es aquí donde se podrían encontrar mayor tasa de emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero por kilómetro recorrido.

7.4. Divulgación de resultados

- **Ponencias en eventos nacionales**

“Modelamiento mediante dinámica de sistemas para evaluación de políticas de reducción de emisiones de CO₂ generadas por el transporte de carga Colombia”. Autores: Susana Marín Valencia, Carlos Jaime Franco Cardona y Lorena Cadavid Higueta. XVI Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. Agosto 29-31. Manizales, Colombia. Ponente.

- **Ponencias en eventos internacionales**

“Evaluación de políticas de reducción de emisiones de CO₂ generadas por el transporte de carga en Colombia, una visión desde la Dinámica de Sistemas”. Autores: Susana Marín

Valencia, Carlos Jaime Franco Cardona y Lorena Cadavid Higuita. XVI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Octubre 17-19. Puebla, México. Ponente.

“Análisis de políticas de mitigación del cambio climático en el transporte de carga carretero en Colombia”. Autores: Susana Marín Valencia, Carlos Jaime Franco Cardona y Lorena Cadavid Higuita. XVII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Noviembre 13-15. Bogotá, Colombia. Ponente.

8. Referencias

- Agarwal, V., & Dev, M. (2013). Introduction to hybrid electric vehicles: State of art. In *2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCES.2013.6547512>
- ANDEMOS. (2014). *Sector Automotor. Reporte sector Automotor Diciembre 2014*. Bogotá.
- ANDEMOS. (2019). *Informe vehículos Julio 2019*. Bogotá.
- Aschauer, G., Gronalt, M., & Mandl, C. (2015). Modelling interrelationships between logistics and transportation operations – a system dynamics approach. *Management Research Review*, 38(5), 505–539. <https://doi.org/10.1108/MRR-11-2013-0271>
- Balci, O. (1990). Guidelines for successful simulation studies. In *1990 Winter Simulation Conference Proceedings* (pp. 25–32). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.1990.129482>
- BanRep. (2019a). ¿Qué es la tasa de cambio? Retrieved August 19, 2019, from <http://www.banrep.gov.co/es/contenidos/page/qu-tasa-cambio>
- BanRep. (2019b). *Boletín de indicadores económicos*. Bogotá.
- Barisa, A., & Rosa, M. (2018). Scenario analysis of CO₂ emission reduction potential in road transport sector in Latvia. *Energy Procedia*, 147, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.036>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1727\(199623\)12:3<183::aid-sdr103>3.3.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1727(199623)12:3<183::aid-sdr103>3.3.co;2-w)
- Barlas, Y., & Carpenter, S. (1990). Philosophical roots of model validation: Two paradigms. *System Dynamics Review*, 6.
- Bartlett, J. (2019). The Most Fuel-Efficient Cars. Retrieved July 15, 2019, from <https://www.consumerreports.org/fuel-economy-efficiency/the-most-fuel-efficient-cars-best-mpg/>
- Behrentz, E., Espinosa, M., Joya, S., Peña, C., & Prada, A. (2014). *Productos analíticos para apoyar la toma de decisiones sobre acciones de mitigación a nivel sectorial: Sector Transporte*. Bogotá, Colombia.
- Benitez-Piñeros, K. (2017a). Se han chatarrizado 26.852 vehículos de carga en 12 años, según cifras de Colfecar. *La República*.
- Benitez-Piñeros, K. (2017b, September 15). Sobreoferta de empresas y vehículos, uno de los problemas para los transportadores de carga. *La República*.
- Bocarejo, J. P. (2011, March 28). La tabla de fletes: regulación al revés.
- CEPAL. (2018). *Tecnología y recambio energético en el transporte automotor de América Latina*

y el Caribe.

- Chan, C. C., & Wong, Y. S. (2004). Electric vehicles charge forward. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(6), 24–33. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1359010>
- Clavijo, S., Vera, A., Malagón, D., Parga, Á., Joya, S., Ortiz, M. C., & Ordoñez, L. (2014). *Costos de transporte, Multimodalismo y la compatividad de Colombia*. Bogotá: ANIF.
- COLFECAR. (2018). Colfecar planea nueva política para impulsar programa de equipamiento vehicular. *El Container*, 182(2145–7956).
- Congreso de la República de Colombia. Ley 1819 de 2016 - Reforma Tributaria (2016).
- Correa Espinal, A. A., Cogollo Flórez, J. M., & Salazar López, J. C. (2010). Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. *Producción + Limpia*, 5, 95–112.
- Costa-Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería UniAndes*, 26, 74–80.
- Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 409–438. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00298-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00298-6)
- Delgado-Gómez, P. (2019). Gobierno incentivará chatarrización con exención total del IVA. *El Espectador*.
- Dente, S. M. R., & Tavasszy, L. (2018). Policy oriented emission factors for road freight transport. *Transportation Research Part D*, 61, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.021>
- DNP. (2011). *CONPES 3700*. Bogotá.
- DNP. (2019). *CONPES 3963*. Bogotá.
- Domínguez, J. C. (2018). La mezcla de biodiésel también subió al 10 %. *El Tiempo*.
- EditorialLR. (2018). Chatarrización, un asunto de modernización. *La República*.
- Eickemeier, P., Schlömer, S., Farahani, E., Kadner, S., Brunner, S., Baum, I., & Kriemann, B. (2014). *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York.
- Engine Mobile Filtration Team. (2015). Clearing the Air on Global Emissions Standards for On-Road Diesel Engines | Parker Hannifin. Retrieved August 21, 2019, from <http://blog.parker.com/clearing-the-air-on-global-emissions-standards-for-on-road-diesel-engines>
- EPM. (2015). Con flota a gas de Emvarias y estación de servicio La Tasajera, EPM aporta a la

- movilidad sostenible. Retrieved August 21, 2019, from <https://www.epm.com.co/site/home/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/con-flota-a-gas-de-emvarias>
- Espinosa Valderrama, M., Cadena Monroy, Á. I., & Behrentz Valencia, E. (2019). Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case study of the Colombian transport sector. *Energy Policy*, 124(August 2018), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.039>
- Felfle, A., Angulo, C., & Cardona, G. (2015). *Plan Maestro de Transporte Intermodal*. Bogotá, Colombia.
- FIA Foundation. (2009). *Making Cars 50% More Fuel Efficient by 2050 Worldwide 50BY50*.
- GSM, & Ministerio de transporte de Colombia. (2014). *PRESENTACIÓN RESUMEN Matriz O-D de Carga Colombia 2013*. Bogotá, Colombia.
- Hao, H., Geng, Y., Li, W., & Guo, B. (2015). Energy consumption and GHG emissions from China's freight transport sector: Scenarios through 2050. *Energy Policy*, 85, 94–101. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.05.016>
- Houghton, D. D. (2002). *INTRODUCTION TO CLIMATE CHANGE: LECTURE NOTES FOR METEOROLOGISTS*. Geneva.
- Hubenthal, A. (2010). Evaluación del sector transporte en Ecuador con miras a plantear medidas de mitigación al Cambio Climático. *United Nations Development Programme*, 1–24.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2010. Nivel Nacional - Regional, 15.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2016). *Inventario Nacional Y Departamental De Gases Efecto Invernadero - Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático* (Vol. 3). Bogotá, Colombia.
- Iniestra, R., & Franco, P. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas* (Primera). Ciudad de México: INE-SEMARNAT.
- Javid, R., Nejat, A., & Hayhoe, K. (2014). Selection of CO₂ mitigation strategies for road transportation in the United States using a multi-criteria approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 960–972. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.005>
- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2012). *What is a Complex System?*
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., & Et al. (2007). Historical Overview of Climate Change Science. In IPCC (Ed.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (pp. 95–122). Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Liu, P., Mu, D., & Gong, D. (2017). Eliminating overload trucking via a modal shift to achieve

- intercity freight sustainability: A system dynamics approach. *Sustainability (Switzerland)*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/su9030398>
- Lizette, H., Torre, M., & Domínguez, A. M. (2013). Desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión interna bajo condiciones de manejo en una ciudad mexicana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29, 219–230.
- López, G., & Galarza, S. (2016). *MOVILIDAD ELÉCTRICA OPORTUNIDADES PARA LATINOAMÉRICA*. Santiago de Chile.
- Luo, X., Dong, L., Dou, Y., Liang, H., Ren, J., & Fang, K. (2016). Regional disparity analysis of Chinese freight transport CO₂ emissions from 1990 to 2007: Driving forces and policy challenges. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.08.010>
- Martínez-Jaramillo, J. E., Arango-Aramburo, S., Álvarez-Uribe, K. C., & Jaramillo-Álvarez, P. (2017). Assessing the impacts of transport policies through energy system simulation: The case of the Medellín Metropolitan Area, Colombia. *Energy Policy*, 101(November 2016), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.026>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., ... Waterfield, T. (2018). *Global warming of 1.5°C: Summary for Policy Makers*. Geneva.
- Mejía, L. F. (2018). *Nueva visión de la política nacional de logística*. Bogotá.
- Mesa, J. G. (2019a). *Entrevista realizada a Juan Guillermo Mesa por Susana Marín-Valencia*. Medellín.
- Mesa, J. G. (2019b). *Entrevista realizada por Susana Marín-Valencia*. Medellín.
- MinAmbiente. (2013). Resolución 1111 de 2013. Bogotá.
- MinAmbiente. (2017). *PRINCIPALES PREGUNTAS FRENTE AL IMPUESTO NACIONAL AL CARBONO Y LA SOLICITUD DE NO CAUSACIÓN POR CARBONO NEUTRALIDAD (Decreto 926 de 2017)*. Bogotá.
- MinHacienda. Decreto 926 de 2017 (2017). Bogotá.
- Ministerio de transporte de Colombia, & ECDBC. (2014). *PLAN DE ACCIÓN SECTORIAL DE MITIGACIÓN (PAS) SECTOR TRANSPORTE*. Bogotá, Colombia.
- MinMinas. Decreto 2629 de 2007 (2007). Bogotá.
- MinTransporte. Resolución 4100 de 2014 (2014). Bogotá.
- MinTransporte. DECRETO 1120 DE 2019 (2019). Bogotá: MinTransporte.
- Mouthón, L. (2018). Transporte de carga con GNV, la nueva apuesta de Promigas. *El Heraldo*.
- NASA. (2019). Questions (FAQ) | Facts – Climate Change: Vital Signs of the Planet. Retrieved August 21, 2019, from <https://climate.nasa.gov/faq/>

- National Academies of Sciences. (2011). *Impacts of Public Policy on the Freight Transportation System*. Washington, D.C.: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14453>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). Ocean-Atmosphere CO₂ Exchange. Retrieved May 24, 2019, from <https://sos.noaa.gov/datasets/ocean-atmosphere-co2-exchange/>
- Natural-Resources-Canada. (2014). Learn the facts: Emissions from your vehicle.
- Nikola-Corp. (2019). Nikola One. Retrieved August 22, 2019, from <https://nikolamotor.com/one#motor-features>
- NOAA. (2019). ESRL Global Monitoring Division - Global Greenhouse Gas Reference Network. Retrieved August 21, 2019, from <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Nocera, S., & Cavallaro, F. (2016). Economic valuation of Well-To-Wheel CO₂ emissions from freight transport along the main transalpine corridors. *Transportation Research Part D*, 47, 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.06.004>
- Pachauri, R. K., Meyer, L., Hallegatte France, S., Bank, W., Hegerl, G., Brinkman, S., ... van Boxmeer, F. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report. IPCC*. Geneva: Gian-Kasper Plattner.
- Pardo, T. (2018). Impuesto nacional al carbono: ¿qué pasa con la plata? *El Tiempo*.
- Peet, K., Gota, S., Huizenga, C., Medimorec, N., Enriquez, A., Yiu, A., ... Cardama, M. (2018). *Transport and Climate Change Global Status Report 2018*.
- Pereira Marcilio, G., Rangel, J., De Souza, C., Shimoda, E., Freitas Da Silva, F., & PPeixoto, T. (2018). Analysis of greenhouse gas emissions in the road freight transportation using simulation. *Journal of Cleaner Production*, 170, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.171>
- Pulkrabek, W. W. (1997). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Prentice Hall.
- Ratanavaraha, V., & Jomnonkwao, S. (2015). Trends in Thailand CO₂ emissions in the transportation sector and Policy Mitigation. *Transport Policy*, 41, 136–146. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2015.01.007>
- Redacción Interempresas. (2018). 10 tecnologías para un futuro brillante de los motores de combustión y los cambios manuales - Automoción. Retrieved July 15, 2019, from <http://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/216273-10-tecnologias-para-futuro-brillante-de-motores-de-combustion-y-cambios-manuales.html>
- Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., & Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1), 15–27. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>

- Rodríguez, W., Villalva, D., & Saavedra, F. (2016). *Guía para los inventarios organizacionales de emisiones de GEI por uso de combustibles fósiles en actividades industriales y comerciales*. Bogotá, Colombia.
- RUNT. (2019). Estadísticas del RUNT. Retrieved August 21, 2019, from <https://www.runt.com.co/cifras>
- Savy, M. (2009). *Freight transport modes: Competition, cooperation or areas of advantage?* Brussels.
- Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1), 25-35. <https://doi.org/10.1080/02286203.2016.1219806>
- Scripps Institution of Oceanography. (2019). The Keeling Curve. Retrieved August 21, 2019, from <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>
- Shindell, D., Bréon, F., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., ... Midgley, P. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I*.
- Sim, J. (2017). The influence of new carbon emission abatement goals on the truck-freight transportation sector in South Korea. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.207>
- StadieSeifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2013.06.055>
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems, Thinking and Modeling for a Complex world*. Boston: McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601336>
- Stern, N. (2006). *STERN REVIEW: The Economics of Climate Change*. London.
- Tesla. (2019). Specification Tesla Semi. Retrieved August 22, 2019, from <https://www.tesla.com/semi?redirect=no>
- Transmetrics Corp. (2018). Top 5 Technology and Innovation Trends Revolutionizing Trucking Now - Transport, Logistics & Innovation. Retrieved July 15, 2019, from <https://transmetrics.eu/blog/top-5-technology-and-innovation-trends-revolutionizing-trucking-now/>
- UNFCCC. (1992). *UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*.
- UNFCCC. (2007). *CLIMATE CHANGE: IMPACTS, VULNERABILITIES AND ADAPTATION IN DEVELOPING COUNTRIES*. Bonn.
- UPME. (2013). *Escenarios de reducción de consumo energético en el sector transporte colombiano*. Bogotá.

- UPME. (2016). *PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2017-2022*. Bogotá, Colombia.
- US-Department-of-Energy. (2015). Timeline: History of the Electric Car | Department of Energy. Retrieved August 22, 2019, from <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>
- US EPA. (2010). SmartWay Transport Partnership. Retrieved August 19, 2019, from <https://www.epa.gov/smartway>
- Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S. (2014). A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 21–36. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2014.05.016>
- Valencia, A., & Obando, L. (2017). Aproximaciones a la validación en dinámica de sistemas. *Puente (Universidad Pontificia Bolivariana)*, 6(2), 61–68. <https://doi.org/10.18566/puente.v6n2.a06>
- Vallejo-Zamudio, L. (2017). El incierto crecimiento económico colombiano. *Apuntes Del Cenes*, 36. <https://doi.org/10.19053/01203053.v36.n64.2017.6511>
- van der Merwe, A. B., Lewis, Y., Cohen, B., & Naudé, L. (2015). System dynamics as a tool for exploring greenhouse gas emission mitigation potential in freight transport. *Civil Engineering : Magazine of the South African Institution of Civil Engineering*, 23(8), 28–32.
- Vásquez, R., & Salinas, F. (2018). *HIDRÓGENO Tecnologías del y perspectivas para Chile*. Santiago de Chile. <https://doi.org/Ministerio de energía Chile & GIZ>
- Villalobos, J., & Wilmsmeier, G. (2016). Estrategias y herramientas para la eficiencia energética y la sostenibilidad del transporte de carga por carretera. *Boletín FAL. CEPAL*, 5, 12.
- Vogt, V. (2018). Medellín recibe desde hoy diésel con menos azufre. *El Tiempo*.
- WMO. (2018). *WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No. 14 : The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017*. Geneva.
- Yu, B., Zhang, C., Kong, L., Bao, H.-L., Wang, W.-S., Ke, S., & Ning, G. (2014). System dynamics modeling for the land transportation system in a port city. *Modeling and Simulation International*, 90(6), 706–716. <https://doi.org/10.1177/0037549714533619>

A. ANEXO 1

Nombre	Unidad	Definición
Brecha Demanda Oferta	Tonne	'T de carga demandado por tierra'-'Oferta de carga'
capacidad de carga ideal	Tonne	'Capacidad por vehículo'*'Vehículos totales país'*(Horas potenciales de trabajo/'Duración del viaje')
Capacidad de otros modos de transporte	Tonne	GRAPH(TIME;2019;10;{0<<Tonne>>;'Carga demandada'*0,07;'Carga demandada'*0,14;'Carga demandada'*0,2//Min:0;Max:9000000//})
Capacidad por vehículo	Tonne	23
Carga demandada	Tonne	231116941
Carga transportada por tierra	Tonne	IF('T de carga demandado por tierra'=0<<Tonnes>>;0<<Tonnes>>;MIN('Oferta de carga';'T de carga demandado por tierra'))
Carga transportada-veh año	Tonne	IF('Vehículos totales país'=0;0<<Tonnes>>;'Carga transportada por tierra'/'Vehículos totales país')
Carga trasportada por camión por mes	Tonne	'Carga transportada-veh año'/12
Compra		New
Compra de veh reinversión		MAX('Utilidad acumulada reinversión'/'Precio promedio vehículo';0)
compra veh conv		IF (TIME>2020 AND TIME<2026;(MIN('Nuevos veh conv'*'Prob compra veh conv';Cupos1));('Nuevos veh conv'*'Prob compra veh conv'))
Consumo combustible vehículo BC	Gallon	(1/'Rendimiento combustible vehículo BC')*'Distancia viaje'*'Viajes anuales por vehículo'
Consumo Diesel vh galones año	Gallon	(1/'Rendimiento combustible')*'Distancia viaje'*'Viajes anuales por vehículo'
Consumo gas natural vehículo año		6300
Consumo veh BC viaje	Gallon	'Distancia viaje'/'Rendimiento Comb Veh BC'
Costo comb VBC viaje	COP	'Consumo veh BC viaje'*'Precio comb gal'
Costo comb veh año	COP	('Consumo Diesel vh galones año'+ 'Consumo combustible vehículo BC')/2*'Precio comb gal'

Nombre	Unidad	Definición
Costo comb veh mes	COP	'Costo comb veh año'/12
Costo comb viaje	COP	'Costo comb veh año'/'Viajes anuales por vehículo'
Costo combustible por tonelada	COP/Tonne	'Costo comb veh año'/'Carga transportada-veh año'
Costo fijo mes VBC		7409000
Costo fijo mes Veh BC	COP	7409000
Costo gasolina viaje		250000
Costo peajes veh BC viaje	COP	250000
Costo peajes viaje		250000
Costo total convencionales	COP	'Costos variables mes convencionales'+ 'Costos Fijos mensuales'
Costo total ton	COP/Tonne	'Costos fijos ton'+ 'costos variables Tonelada'
Costo variable viaje por tonelada	COP/Tonne	'Costos variables viaje'/'(Capacidad por vehículo'*Factor de utilización')
Costo veh bajo consumo		477000000
Costos antigüedad	year*COP	('Mediana vida útil'*0,001*'Costos variables viaje')
Costos anuales	COP	'Costo total ton'*'Carga transportada por tierra'
Costos cubiertos aux		Utilidades/'Costos anuales'
Costos Fijos mensuales	COP	2500000
Costos fijos ton	COP/Tonne	IF('Carga trasportada por camión por mes'=0<<Tonnes>>;0<<COP/Tonne>>';Costos Fijos mensuales'/'Carga trasportada por camión por mes')
Costos mensuales totales veh BC	COP	'Costo fijo mes Veh BC'+ (('Costo comb VBC viaje'+ 'Costo peajes veh BC viaje'+ 'Costos mtto veh BC viaje')*'Viajes anuales por vehículo'/12)
Costos mtto veh BC viaje	COP	122000
Costos totales mensuales veh convencionales	COP	'Costos Fijos mensuales'+ 'Costos variables convencionales mensuales'

Nombre	Unidad	Definición
Costos totales mes VBC		'Costo fijo mes VBC'+(('Mtto viaje'+ 'Costo peajes viaje'+ 'Costo gasolina viaje')*'Viajes por veh mes')
Costos variables convencionales mensuales	COP	'costos variables Tonelada'*'Carga trasportada por camión por mes'
Costos variables mes convencionales	COP	'costos variables Tonelada'*'Carga trasportada por camión por mes'
costos variables Tonelada	COP/Tonne	IF('Carga trasportada por camión por mes'=0<<Tonnes>>;0<<COP/Tonne>>>('Costo comb veh mes'+ 'Costos antigüedad'+ ('Costos variables viaje'*'Viajes por veh mes'))/'Carga trasportada por camión por mes')
Costos variables totales ruta	COP	'Costos variables viaje'+ 'Costo comb viaje'+ 'Costos antigüedad'
Costos variables viaje	COP	350000
Creación cupos año		(('Vehículos desintegrado nuevos'+ 'Vehículos desintegrados antiguos')/Regulación)
Crecimiento de la demanda	Tonne	'Tasa de crecimiento económico'*'Carga demandada'
cup		0
Cupos		0
Cupos disp		0
Cupos usados		DELAYPPL('compra veh conv';1;0)
Cupos1		IF (Cupos<0;0)
Desint		Veh*0,01
Desintegración BC		DELAYPPL('Nuevos vehículos de BC';'Mediana vida útil';0)
Disponibilidad		0,98-('Mediana vida útil'*0,015)*FC
Distancia viaje	km	588
Duración del viaje	hr	('Distancia viaje'/'Velocidad promedio')+ 'Tiempos muertos'
Eficiencia del motor		GRAPH('Mediana vida útil';5;5;{0,42;0,4;0,38;0,35;0,3;0,25//Min:0;Max:1//})
Emisiiones CH4 GN		'Consumo gas natural vehículo año'*'Factor de emisión CH4 Gas Nat'*'Potencial CG CH4'
Emisiones CH4	Tonne	'Potencial CG CH4'*'Factor de emisión CH4 Diesel B10'*'Consumo Diesel vh galones año'
Emisiones CH4 BC	Tonne	'Consumo combustible vehículo BC'*'Factor de emisión CH4 Diesel B10'*'Potencial CG CH4'
Emisiones CO2	Tonne	1*'Factor de emisión CO2 Diesel B10'*'Consumo Diesel vh galones año'

Nombre	Unidad	Definición
Emisiones CO2 BC	Tonne	'Consumo combustible vehículo BC'*'Factor de emisión CO2 Diesel B10'
Emisiones CO2 GN		'Consumo gas natural vehículo año'*'Factor Emisión CO2 Gas nat'
Emisiones CO2e BC	Tonne	('Emisiones CH4 BC'+ 'Emisiones CO2 BC'+ 'Emisiones N2O BC')*'Vehículos de BC'
Emisiones CO2e GN		(('Emisiones CH4 GN'+ 'Emisiones CO2 GN'+ 'Emisiones N2O GN')*'Vehículos Gas')
Emisiones CO2e todos los veh	Tonne	('Emisiones CO2e BC')+ 'Emisiones CO2e Veh conv'
Emisiones CO2e Veh conv	Tonne	(('Emisiones CH4'+ 'Emisiones CO2'+ 'Emisiones N2O')*'Número de vehículos convencionales')
Emisiones N2O	Tonne	'Consumo Diesel vh galones año'*'Factor de emisión N2O Diesel B10'*'Potencial CG N2O'
Emisiones N2O GN		'Consumo gas natural vehículo año'*'Factor Emisión N2O Gas nat'*'Potencial CG N2O'
Emisiones N2O BC	Tonne	'Consumo combustible vehículo BC'*'Factor de emisión N2O Diesel B10'*'Potencial CG N2O'
Factor de conversión	year	1
Factor de emisión CH4 Diesel B10	Tonne/Gallon	0,000000037
Factor de emisión CH4 Gas Nat		3,28225E-06
Factor de emisión CO2 Diesel B10	Tonne/Gallon	0,010277
Factor de emisión N2O Diesel B10	Tonne/Gallon	0,000000037
Factor de utilización		IF('Carga transportada por tierra'=0<<Tonnes>>;0;'Carga transportada por tierra'/'Oferta de carga')
Factor Emisión CO2 Gas nat		0,00197325
Factor Emisión N2O Gas nat		1,0725E-07
FC	1/year	1
FU ideal		'Carga transportada por tierra'/'capacidad de carga ideal'
Horas potenciales de trabajo	hr	8760

Nombre	Unidad	Definición
Infraestructura vial		GRAPH(TIME;2019;10;{1;1,1;1,3;1,4//Min:0;Max:2//})
Ingresos anuales	COP	'Precio flete'*'Carga transportada por tierra'
K		-0,8
kph	km/hr	1
Mediana vida útil	year	MIN(MIN(MAX('Máxima vida útil'/(1+'% costos cubiertos'); 'Mínima vida útil'); 'Máxima vida útil'); 'Vida útil regulada')
Mtto viaje		122000
Máxima vida útil	year	30
Mínima vida útil	year	5
New		ut/'Precio veh'
Nuevos veh conv		('Atractivo mercado'+ 'Compra de veh reinversión'+ 'Veh déficit')
Nuevos vehículos de BC		'Nuevos veh conv'*'Prob compra veh BC'
Número de veh convencionales - antiguos		167000
Número de veh convencionales nuevos		57881
Número de vehículos convencionales		'Número de veh convencionales nuevos'+ 'Número de veh convencionales - antiguos'
Oferta de carga	Tonne	('Capacidad por vehículo'*'Viajes anuales por vehículo'*'Vehículos totales país')
Porcentaje utilidades		0,1
Potencial CG CH4		28
Potencial CG N2O		265
Precio comb gal	COP/Gallon	8538
Precio flete	COP/Tonne	'Factor de utilización'*'Precio justo flete'
Precio justo flete	COP/Tonne	240000
Precio promedio vehículo	COP	285200000
Precio veh		250000000
Precio veh Bajo consumo		477000000

Nombre	Unidad	Definición
Prob compra veh BC		1-'Prob compra veh conv'
Prob compra veh conv		IF(TIME>2025; (('Costos totales mensuales veh convencionales'/1<<COP>>))^(K)/(((('Costos totales mensuales veh convencionales'/1<<COP>>))^(K))+((('Costos mensuales totales veh BC'/1<<COP>>))^(K))) ;1)
Probabilidad de compra veh BC		((('Costos totales mes VBC')^(-0,8))/((('Costo total convencionales'^(-0,8))+('Costos totales mes VBC')^(-0,8)))
Probabilidad de compra veh convencionales		((('Costo total convencionales')^(-0,8))/((('Costo total convencionales'^(-0,8))+('Costos totales mes VBC')^(-0,8)))
Reg		1
Regulación		2
Reinversión nuevos veh	COP	'Compra de veh reinversión'*'Precio promedio vehículo'
Relación desintegración y atractivo		IF ('Mediana vida útil'<16;('Vehículos desintegrado nuevos'+ 'Vehículos desintegrados antiguos')*0,7;('Vehículos desintegrado nuevos'+ 'Vehículos desintegrados antiguos')*1,1)
Rendimiento Comb Veh BC	km/Gallon	20
Rendimiento combustible	km/Gallon	'Rendimiento teórico'*'Eficiencia del motor'/0,25
Rendimiento combustible vehículo BC	km/Gallon	25
Rendimiento teórico	km/Gallon	10,4
T de carga demandado por tierra	Tonne	'Carga demandada'-'Capacidad de otros modos de transporte'
Tasa de crecimiento económico		0,035
Tasa reinversión		0,15
Tasa_1		Desint/Reg
Tasa_2		MIN(Tasa_1;Compra)
Tiempos muertos	hr	21
Ton viaje	Tonne	'Carga transportada por tierra'/'Viajes totales anuales'
ut		10000000000
Utilidad acumulada reinversión	COP	0

Nombre	Unidad	Definición
Utilidad anual reinv	COP	IF(Utilidades>o<<COP>>;Utilidades;o<<COP>>)*'Tasa reinversión'
Utilidad veh mensual	COP	Utilidades/'Vehículos totales país'/12
Utilidades	COP	'Ingresos anuales'-'Costos anuales'
Veh		200
Veh déficit		IF('Viajes anuales por vehículo'=o;o;MAX(('Brecha Demanda Oferta'/('Capacidad por vehículo'*'Viajes anuales por vehículo')));o))
Veh exceso		'Brecha Demanda Oferta'/('Capacidad por vehículo'*'Viajes anuales por vehículo')
Vehículos combustión interna		'Número de vehículos convencionales'+'Vehículos Gas'
Vehículos de BC		o
Vehículos desintegrado nuevos		DELAYPPL('compra veh conv';'Mediana vida útil';o)
Vehículos desintegrados antiguos		(('Número de veh convencionales - antiguos'/ 'Mediana vida útil'))*'Factor de conversión'
Vehículos Gas		o
Vehículos totales país		'Vehículos combustión interna'+('Vehículos de BC')
Velocidad promedio	km/hr	28*'Infraestructura vial'*kph
Viajes anuales por vehículo		IF(('Carga demandada'<=1<<Tonnes>>);o;('Horas potenciales de trabajo'*Disponibilidad)/'Duración del viaje')
Viajes por veh mes		'Viajes anuales por vehículo'/12
Viajes totales anuales		'Vehículos totales país'*'Viajes anuales por vehículo'
Vida útil regulada	year	15