UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de emisiones del transporte interurbano de carga en camiones

Ricardo Quintero Giraldo

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2021

Análisis de emisiones del transporte interurbano de carga en camiones

Ricardo Quintero Giraldo

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería: Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director:

Dr. en Ingeniería, John Jairo Posada Henao

Codirector:

Ph.D, Carlos A. González-Calderón

Línea de Investigación:

Desarrollo y gestión de la infraestructura vial y de transporte

Grupo de Investigación:

Vías y Transporte (VITRA)

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2021

Dedicatoria

A toda mi familia por todo el apoyo brindado durante tantos años.

Agradecimientos

A todas y cada una de las personas que de uno u otro modo se vieron involucradas durante el tiempo que estuve realizando mis estudios. Especialmente a mi familia quienes siempre me apoyaron y aconsejaron en todas las decisiones que tomé.

Al profesor John Jairo Posada quién como director de tesis me asesoró y orientó en el desarrollo de esta. Me brindó su confianza para apoyarlo en trabajos de monitoria y proyectos con los cuales aumenté mi conocimiento en el sector transporte. Al Profesor Carlos González-Calderón quien desde el inicio de mis estudios en el programa de maestría asumió el rol de tutor y me orientó durante todo el trayecto de mi posgrado. Ambos me brindaron esa visión de investigador y siempre me motivaron a dar más de mí; junto con ellos pude realizar presentaciones a nivel internacional con las cuales se representó a la Universidad Nacional de Colombia.

Resumen

En la actualidad, el transporte de mercancías por medio de camiones es una de las actividades más comunes en los procesos de la cadena logística. El uso de este modo de transporte trae muchos beneficios, sin embargo, a éste también se le atribuyen algunas externalidades negativas como las emisiones, las cuales traen afectación al medio ambiente y la salud humana, motivo por el cual los últimos años se ha buscado la reducción en la emisión de dichos contaminantes. El presente trabajo, pretende analizar las emisiones producidas por las principales categorías de camiones usadas para el transporte interurbano de carga en Colombia. Para dicho análisis se asimilan algunas características de la operación, tales como tipo de carretera según la pendiente longitudinal y la curvatura horizontal de esta; tipo de vehículo utilizado; distancia recorrida y velocidad.

Para analizar dichas emisiones, se obtuvo un modelo matemático capaz de estimar las emisiones producidas por los camiones en el transporte de carga terrestre interurbano. El modelo se realiza principalmente partiendo del análisis de la cantidad de emisiones que se obtienen por simulación con el software HDM-4 desarrollado por el Banco Mundial. Las ciudades y tipos de vehículos con las cuales se obtiene el modelo son tomadas del Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga (SICE-TAC) desarrollado por el Ministerio de Transporte de Colombia en conjunto con empresas del sector privado y agremiaciones del sector carga del país.

Dentro de los hallazgos, se identificó la importancia de tener una clasificación de las carreteras, que no solo dependa de la pendiente longitudinal de ésta, sino también de aspectos relacionados con el alineamiento horizontal, como lo es la curvatura horizontal. Se identificaron también, cuáles de los camiones analizados son los más óptimos para el transporte de mercancía en las carreteras colombianas, en relación con el número de emisiones por tonelada transportada. Por otro lado, y con ayuda de las emisiones unitarias por tipo de camión según el tipo de carretera, se obtuvo un modelo el cual puede ser aplicado para predecir la cantidad de emisiones de ciertos contaminantes que se producen durante el transporte de carga por diferentes rutas de Colombia. La metodología aplicada en este trabajo puede ser aplicada en otras zonas de estudio con el fin de encontrar nuevos modelos.

Palabras claves: Camiones, Emisiones, Transporte de carga, Carreteras interurbanas.

Analysis of emissions from intercity freight transportation by trucks

Abstract

Goods movement by trucks is one of the most common activities in the processes of the logistics chain. The use of this mode of transport brings many benefits. However, some negative externalities such as emissions are also attributed to it. Also, those emissions affect the environment and human health. For that reason, the reduction in the emission have been studied in recent years. This paper analyzes the emissions produced by the main categories of trucks used for intercity freight transportation in Colombia. To do that, some characteristics were assimilated such as type of road based on longitudinal slope of the road and its curvature, type of vehicle, distance and speed traveled.

To analyze emissions, the author found a mathematical model capable of estimating the emissions produced by trucks in intercity freight transportation. The model is carried out based on the analysis of the emissions by the HDM-4 software developed by the World Bank. The cities and types of vehicles with which the model is developed are taken from the Efficient Cost Information System for Freight Transportation Vehicles (SICE-TAC) developed by the Ministry of Transportation of Colombia in conjunction with the different actors of the logistic chain.

As a result, the author mentions his point of view about the importance of having a road classification which not only depends on the longitudinal slope of the road, but also on aspects related to horizontal alignment such as the mean horizontal curvature of the road. It was also identified the optimal trucks for goods movement in Colombian highways, in relation to the number of emissions per ton transported. In addition, the model found could be applied to predict the number of tons of emissions that are emitted in freight transportation through different routes in Colombia. The methodology used in this thesis can be applied in other study areas to find new models.

Keywords: Trucks, Emissions, Freight transportation, intercity roads.

Tabla de contenido

Pág.

Introducción **1**

1. Justificación **3**

2. Objetivos, alcance e hipótesis **5**
2.1 Objetivo general 5
2.2 Objetivos específicos 5
2.3 Alcance 5
2.4 Hipótesis 6

3. Marco teórico y estado del arte **7**
3.1 Elementos geométricos de las carreteras 7
3.2 Clasificación de las carreteras 7
3.2.1 Según su funcionalidad 8
3.2.2 Según pendiente del terreno 9
3.2.3 Características de las carreteras 10
3.3 Velocidades de diseño y velocidades de operación en un tramo homogéneo 14
3.4 Transporte de carga por carretera 15
3.4.1 Línea del tiempo del transporte de carga por carretera 16
3.4.2 Cadena del transporte 17
3.4.3 Tipos de vehículos para el transporte de carga 18
3.5 Contaminación por fuentes móviles 21
3.5.1 Impactos ambientales y en la salud humana producidos por el transporte 22
3.5.2 Estimación de emisiones vehiculares 26
3.5.3 Controles para motores 28
3.6 Modelos para estimar emisiones 28
3.6.1 MOtor Vehicle Emission Simulator (MOVES) – United States Environmental Protection Agency (EPA) 29
3.6.2 National Mobile Inventory Model (NMIM) – EPA 29
3.6.3 COPERT – European Environment Agency (EEA) 30
3.6.4 EMission FACtors (EMFAC) – California Air Resources Board (CARB) 31
3.6.5 Comprehensive Modal Emission Model (CMEM) – Universidad de California 31
3.6.6 International Vehicle Emissions Model (IVE) - Universidad de California Riverside 32

3.6.7 Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP)- Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo 33
3.6.8 MODelo de EMisiones vehicular (MODEM) – Universidad de Chile 33
3.6.9 Passenger car and Heavy-duty vehicle Emission Model (PHEM) - TU Graz...34
3.6.10 The Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA) - Agencias de Protección Ambiental de Alemania, Suiza y Austria 34
3.6.11 Highway Development and Management (HDM-4) - Banco Mundial 34
3.7 Ventajas y desventajas de los modelos para estimar emisiones 35
3.8 Software para el análisis de emisiones (HDM-4) 36
3.8.1 Historia del HDM-4 36
3.8.2 Análisis con HDM-4 y aplicaciones 38
3.8.3 Flota vehicular 39
3.8.4 Redes de carretera 41
3.8.5 Clasificación de la carretera según la geometría de la carretera 42
3.8.6 Velocidad vehicular 44
3.8.7 Efectos de las carreteras en los usuarios 45
3.8.8 Otros parámetros 46
3.9 Estimación de emisiones con HDM-4 46
3.10 Modelado de las emisiones 48

4. Metodología 49
4.1 Zona de estudio 49
4.2 Rutas para el análisis 50
4.2.1 Selección de rutas 50
4.2.2 Mapeo de la ruta 51
4.3 Tramos de carretera 51
4.4 Vehículos por estudiar 52
4.5 Obtención del modelo 52
4.6 Análisis de la información encontrada 53

5. Desarrollo de la metodología 55
5.1 Análisis de la zona de estudio 55
5.2 Vehículos más usados en el transporte de carga en Colombia 58
5.3 Contaminación en Colombia por fuentes móviles 60
5.4 SICE-TAC 62
5.5 Rutas Para el Transporte Interurbano de Carga en Colombia según datos oficiales 64
5.5.1 Ciudades que generan y atraen carga 65
5.5.2 Red vial por donde circula la carga en Colombia 66
5.5.3 Distancias entre ciudades y tipo de carreteras 67
5.5.4 Puntos de control en la ruta 69
5.5.5 Velocidad, tiempo de viaje y rendimiento de combustible 70
5.6 Propuesta de clasificación de carreteras teniendo en cuenta aspectos geométricos 71
5.6.1 Clasificación actual 71
5.6.2 Necesidad de nueva clasificación 72
5.6.3 Posibles combinaciones para clasificar carreteras 73

5.6.4 Clasificación propuesta 74
5.7 Velocidad de camiones según clasificación de carreteras propuesta 76
5.7.1 Velocidad de diseño de carreteras en Colombia 76
5.7.2 Uso de GPS para medir velocidad 77
5.7.3 Velocidades INVIAS 78
5.7.4 Velocidades propuestas 79
5.8 Metodología para clasificar un tramo de carretera según propuesta 82
5.8.1 Rutas con uso de GPS 83
5.8.2 Simulación de rutas 84
5.8.3 Alineamiento horizontal de la carretera 87
5.8.4 Casos de aplicación 88
5.9 Transito Promedio Diario (TPD) 89
5.9.1 TPD - Estaciones INVIAS 89
5.9.2 Propuesta de TPD específico en una ruta 91
5.9.3 Propuesta de TPD genérico 93
5.10 Obtención de modelo para estimar emisiones 94
5.10.1 Parámetros generales de entrada en HDM-4 94
5.10.2 Resultados obtenidos 97
5.10.3 Modelo para estimar emisiones 100

6. Análisis de resultados 107
6.1 Emisiones producidas en tipos de carretera propuestas en la investigación 107
6.2 Emisiones producidas en tipos de carretera usadas por el Ministerio de Transporte 116
6.3 Comparación de emisiones obtenidas por tipos de carretera propuestos y usados por el Ministerio de Transporte 120
6.4 Aplicación del modelo según tipo de carretera, TPD y tipología del camión.... 123
6.5 Relación entre peso neto transportado y las emisiones producidas 124
6.6 Reducción en las emisiones producidas por el transporte interurbano de carga por carretera 125

7. Conclusiones y recomendaciones 129

Bibliografía 137

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Clases de vehículos en Estados Unidos 20
Figura 2. Vehículos de carga en Australia 21
Figura 3: Emisiones en vehículos de carretera 23
Figura 4. Dimensiones del transporte 25
Figura 5. Categoría según tipo de vehículo 40
Figura 6. Alineamiento horizontal del tramo 43
Figura 7. Alineamiento vertical del tramo 44
Figura 8. Peralte 44
Figura 9. Consumo de combustible según aceleración del vehículo 47
Figura 10. Consumo de combustible según la velocidad del vehículo 47
Figura 11. Puertos en Colombia 56
Figura 12. Unión de corredores logísticos de carga terrestre en Colombia 57
Figura 13. Vehículos usados para el transporte de carga seca en 2018 59
Figura 14. Vehículos usados para el transporte de líquidos en 2018 59
Figura 15. Vehículos más usados en el transporte interurbano de carga en Colombia 60
Figura 16. Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector transporte en Colombia 61
Figura 17. Proyección a 2040 de GEI del sector transporte en Colombia 62
Figura 18. Datos de entrada SICE-TAC 64
Figura 19. Parámetros de distancia y velocidad SICE-TAC 64
Figura 20. Ciudades referentes para el transporte de carga en Colombia 66
Figura 21. Red vial transporte de carga en Colombia 67
Figura 22. Velocidades de camiones INVIAS 79
Figura 23. Velocidades propuestas 82
Figura 24. Perdida de señal GPS 84
Figura 25. Ruta Bogotá - Buenaventura 85
Figura 26. Perfil longitudinal 85
Figura 27. Simulador GPS 86
Figura 28. Ruta simulada en Map Source 86
Figura 29. Curva del alineamiento horizontal 87
Figura 30. Clasificación vehículos en conteos INVIAS 89
Figura 31. Información gráfica de la estación de conteo 90

Figura 32. Carreteras donde se tiene registros de conteos vehiculares 91
Figura 33. Configuración vehicular para carga transportada en 2017 95
Figura 34. Cantidad estimada de HC emitido por un camión 110
Figura 35. Cantidad estimada de CO emitido por un camión 110
Figura 36. Cantidad estimada de NO_x emitido por un camión 111
Figura 37. Cantidad estimada de PM emitido por un camión 111
Figura 38. Cantidad estimada de CO_2 emitido por un camión 112
Figura 39. Cantidad estimada de SO_2 emitido por un camión 112
Figura 40. Cantidad de emisiones (g/veh-km) de un camión en carreteras tipo 1 115
Figura 41. Cantidad de NO_x (g/veh-km) de un camión en carreteras tipo 1 115
Figura 42. Cantidad de CO_2 (g/veh-km) de un camión en carreteras tipo 1 116
Figura 43. Toneladas totales de contaminante diarias ruta Bogotá – Buenaventura 121
Figura 44. Toneladas totales de NO_x diarias ruta Bogotá – Buenaventura 121
Figura 45. Toneladas totales de CO_2 diarias ruta Bogotá – Buenaventura 122

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Clases de carreteras Manual Interamericano 10
Tabla 2. Carreteras Clase 0 11
Tabla 3. Carreteras Clase I 12
Tabla 4. Carreteras Clase II 12
Tabla 5. Carreteras Clase III 13
Tabla 6. Carreteras Clase IV 14
Tabla 7. Camión vs Tractocamión 18
Tabla 8. Semirremolque, Remolque y Balancín 18
Tabla 9. Configuración vehículos de carga 19
Tabla 10. Ventajas y desventajas de los modelos para el transporte interurbano de carga 35
Tabla 11. Criterios para análisis multicriterio con HDM-4 38
Tabla 12. Flota vehicular usada por HDM-4 40
Tabla 13. Tipos de carretera para HDM-4 según geometría 44
Tabla 14. Movimiento de toneladas en Colombia por modo de transporte 58
Tabla 15. Ciudades referentes para el transporte de carga en Colombia 65
Tabla 16. Distancia de Armenia a otras ciudades 68
Tabla 17. Ejemplo puntos de control de rutas 70
Tabla 18. Velocidad promedio según el tipo de camión y tipo de carretera 70
Tabla 19. Rendimiento promedio de combustible según tipo de vehículo y tipo de carretera 71
Tabla 20. Tipos de carretera en Colombia según pendiente longitudinal 72
Tabla 21. Tipo de curvaturas según HDM-4 73
Tabla 22. Posibles tipos de geometría al combinar INVIAS con HDM-4 73
Tabla 23. Tipos de carretera propuestos 74
Tabla 24. Mapa de calor - Tipos de carreteras 75
Tabla 25. Descripción de tipo de carretera propuestas 75
Tabla 26. Clasificación propuesta para las carreteras según su geometría 75
Tabla 27. Velocidad de diseño carreteras colombianas 77

Tabla 28. Ejemplo datos GPS de un camión 78
Tabla 29. Tipos de carretera evaluación económica INVIAS 79
Tabla 30. Ejemplo comparativo de opciones de velocidad para vehículo C2G 81
Tabla 31. Ejemplo de Transformación de coordenadas 83
Tabla 32. Ejemplo clasificación de ruta por tramos 88
Tabla 33. Ejemplo datos estaciones de conteo vehicular 90
Tabla 34. Ejemplo estaciones ruta Cartagena - Medellín 92
Tabla 35. Propuesta TPD para diferentes rutas 92
Tabla 36. Porcentaje de vehículos en propuesta de TPD genérico 93
Tabla 37. Número de camiones en propuesta TPD genérico 94
Tabla 38. Participación de carga movida en 2017 según configuración vehicular 95
Tabla 39. TPD usado en simulación con HDM-4 96
Tabla 40. Potencia de camiones 97
Tabla 41. Emisiones de un camión en carretera T1 98
Tabla 42. Emisiones de un camión en carretera T2 98
Tabla 43. Emisiones de un camión en carretera T3 98
Tabla 44. Emisiones de un camión en carretera T4 99
Tabla 45. Emisiones de un camión en carretera T5 99
Tabla 46. Emisiones de un camión en carretera T6 99
Tabla 47. Emisiones de un camión en carretera T7 100
Tabla 48. Emisiones de un camión C2G 107
Tabla 49. Emisiones de un camión C3 108
Tabla 50. Emisiones de un camión C4 y C2S2 108
Tabla 51. Emisiones de un camión C2S3 108
Tabla 52. Emisiones de un camión C3S2 109
Tabla 53. Emisiones de un camión C3S3 109
Tabla 54. Ejemplo de incremento de emisiones por cambio de curvatura media 113
Tabla 55. Ejemplo de incremento de emisiones por cambio de pendiente 114
Tabla 56. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C2G 117
Tabla 57. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C3 117
Tabla 58. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C4-C2S2 117
Tabla 59. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C2S3 118
Tabla 60. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C3S2 118
Tabla 61. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C3S3 118
Tabla 62. Ejemplo emisiones en trayecto de un camión C3S3 según SICE-TAC 119
Tabla 63. Ejemplo emisiones totales en trayecto con TPD de 6312 según SICE-TAC ... 119
Tabla 64. Toneladas totales de emisiones diarias del transporte de carga para la ruta Bogotá – Buenaventura 120
Tabla 65. Relación entre emisiones producidas por tipos de carretera propuesto y las usadas por el Ministerio 122

Tabla 66. Emisiones totales diarias en ruta Bogotá - Medellín con TPD de 2826 camiones 123
Tabla 67. Emisiones por tonelada transportada un camión en carretera T7 124
Tabla 68. Ejemplo reducción de emisiones por tonelada transportada en carreteras T1 .. 126

Introducción

El transporte de carga es fundamental no solo para el flujo de la economía, sino también para poder suplir muchas de las necesidades básicas que tiene el ser humano. En la actualidad, existen diferentes formas y medios de transporte para realizar el flujo de mercancías de un lugar a otro; algunas de estas formas de transporte se pueden complementar entre si dentro de un proceso de cadena logística, en el cual las ciudades juegan un papel muy importante, debido a su concentración poblacional.

Las ciudades pueden ser consideradas como grandes atractores y/o generadores de carga. Según datos de las Naciones Unidas, se espera que para el año 2050, aproximadamente el 66% de la población mundial viva en áreas urbanas (United Nations - Department of Economic and Social Affairs - Population Division, 2015), esto significa que muy probablemente con el transcurrir de los años, el transporte de mercancías hacia y desde las ciudades aumentará.

El transporte por carretera utilizando camiones, es el modo más usado en Colombia para transportar mercancías de una ciudad a otra (MinTransporte, 2018). Dichos vehículos aportan emisiones las cuales traen perjuicios para el medio ambiente y la salud humana. Sin embargo, la cantidad de emisiones producidas por cada viaje que realiza dicho sector en Colombia no es bien conocida. Las emisiones pueden variar por diferentes aspectos, por ejemplo, las características geométricas de la carretera tal como la pendiente longitudinal la cual es muy variable debido a las características topográficas del país.

El Ministerio de Transporte de la República de Colombia (Mintransporte), ha estudiado características y costos del parque automotor que circula en el país, logrando desarrollar el llamado Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga (SICE-TAC), con el cual se puede estimar el precio de los costos de operación del transporte automotor de carga; por lo cual, sirve como punto de partida para las negociaciones de transporte de mercancía entre las principales ciudades de Colombia. Para esto, tiene en cuenta 6 tipo de vehículos y 31 ciudades. Adicionalmente, Mintransporte creó el Portal Logístico de Colombia, el cual contiene información relevante a los procesos de la cadena logística del país. Sin embargo, en aspectos relacionados a las emisiones aún no contiene mucha información.

Existen 4 procesos en los cuales los vehículos tipo camión producen gran cantidad de contaminantes; de dichos procesos uno de los que más resalta es el de la combustión asociada a la gasolina o el Aceite Combustible Para Motores (ACPM) que son los principales y más comunes para la obtención de la potencia requerida por los vehículos para su desplazamiento, debido al número de emisiones que se producen durante el mismo. A raíz de la importancia del cuidado del medio ambiente y la salud humana (centro de debate en los últimos años a nivel mundial), las emisiones producidas por los vehículos automotores, especialmente por los camiones, han comenzado a ser estudiadas con mayor detalle. Debido a esto, se han realizado diferentes estudios para medir las emisiones y a partir de estas, se han creado políticas que han obligado a los fabricantes de camiones a innovar y reducir dichas emisiones contaminantes.

A nivel mundial se ha realizado diferentes estudios para estimar las emisiones vehiculares, incluidas las de los camiones. Sin embargo, no todos estos pueden ser usados en cualquier región del mundo, debido a que muchos de estos fueron desarrollados para unas condiciones específicas. Dentro de los softwares desarrollados para países en vía de desarrollo, se encuentra el Highway Development and Management (HDM-4) desarrollado por el Banco Mundial, el cual se enfoca en proyectos viales y puede estimar la cantidad de emisiones producidas por los vehículos en un tramo de carretera. El HDM-4 es un software que puede ser adaptado a las condiciones que tiene Colombia, lo cual es uno de los motivos por el cual el autor decidió usarlo para el cálculo de las emisiones producidas por el transporte de carga. Con dichas emisiones y teniendo en cuenta diferentes variables, se obtuvo un modelo con el cual se pueden estimar la cantidad de emisiones de algunos contaminantes del transporte de carga interurbano en Colombia.

La metodología utilizada para encontrar las emisiones en el trabajo involucró simulaciones, datos reales proporcionados por diferentes empresas, uso de softwares especializados, y otros aspectos, los cuales pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones. Es de mencionar que dicha metodología no solo aplica para las condiciones específicas del caso de estudio, y puede ser replicada y mejorada para otros casos.

El modelo encontrado, se basa en las emisiones unitarias, es decir en aquellas emisiones por vehículo-kilómetro que se producen según el tipo de camión utilizado en la operación logística, y según el tipo de carretera por la cual este circula. Con dichas emisiones unitarias y teniendo en cuenta la distancia recorrida y el número de vehículos, se puede estimar las emisiones promedio de un tramo de carretera. Durante el proceso para la obtención del modelo, se encontraron varios aspectos los cuales se exponen como sugerencias para que las entidades oficiales mejoren los trabajos realizados hasta ahora.

Nota importante: Para el presente trabajo se utilizará la coma (,) como separador de miles y el punto (.) como separador decimal.

1. Justificación

El transporte de carga por carretera es una de las fuentes que más aporta en los gases de efecto invernadero que se producen debido a actividades económicas del ser humano. Con el fin de entender dicha problemática, es importante estudiar y conocer cuáles son las emisiones producidas por los distintos tipos de camiones en el flujo de mercancías entre ciudades; adicionalmente es de vital importancia conocer la cantidad de dichas emisiones, de esta forma se podrá entender el verdadero impacto que éstas están teniendo sobre el medio ambiente y las personas.

El Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) afirma que la combustión al interior de los motores de los vehículos, generan variedad de contaminantes atmosféricos. Afirma además que los niveles de emisión de dichos contaminantes están directamente relacionados, entre otros, con la edad de los vehículos, debido a que los automotores más antiguos no cuentan con sistemas de control de emisiones, por lo cual sus condiciones técnico-mecánicas no garantizan procesos de combustión eficientes, generando mayor consumo de combustible por kilómetro recorrido (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2013); también hay otros factores como la geometría vial y las condiciones operativas del vehículo (Posada Henao, 2012).

Se estima que, si el parque automotor se disminuyera en 30,000 unidades y renovara un 50% de la flota vehicular, al año la reducción de material particulado estaría en el orden de 1,400 toneladas (0.02%), mientas que el dióxido de carbono pudiera disminuir en 520,000 toneladas (6%). Lo anterior traducido a pesos colombianos pudiera llegar a representar beneficios económicos de aproximadamente $5,500 millones de pesos anuales (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2013). Sin embargo, disminuir el parque automotor no es la solución, y lo que se debe es conocer cómo está contaminando la oferta actual de vehículos en el territorio nacional.

A pesar de los esfuerzos que ha realizado el Ministerio de Transporte, en Colombia no existe un modelo capaz de estimar las emisiones producidas por los camiones de carga debido a sus viajes entre ciudades, motivo por el cual se hace más importante aún el tema a desarrollar en el presente trabajo, puesto que los resultados expuestos de este estudio podrán servir como un punto de partida para futuros proyectos, pudiéndose beneficiar el gobierno

nacional, los gremios de transportadores de carga y en última instancia los usuarios que en general es toda la sociedad.

2. Objetivos, alcance e hipótesis

La tesis de maestría se desarrolla teniendo en cuenta las emisiones producidas por diferentes tipos de camiones en el proceso de transporte de carga entre ciudades colombianas, para esto, se hace la suposición que la circulación de los mismos se realiza a flujo libre. Teniendo en cuenta esto, se plantean los siguientes objetivos.

2.1 Objetivo general

Obtener modelo matemático para estimar las emisiones producidas por camiones en el transporte de carga terrestre interurbano, considerando tipo de vehículo, distancia y características geométricas de la carretera.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar las emisiones producidas por diferentes tipos de camión, en diferentes tipologías de carretera pavimentada.
- Estimar las emisiones de los camiones para viajes interurbanos, considerando los diferentes tipos de carretera pavimentada, que se tengan en dichos viajes.
- Proponer alternativas que permitan reducir las emisiones producidas por camiones en carreteras pavimentadas.

2.3 Alcance

En el trabajo investigativo, al encontrar el modelo para la estimación de emisiones se tuvieron limitantes como el considerar un camión que representa cada tipología en estudio, definir tipos de carretera según rangos de sus características geométricas, el uso del combustible Aceite Combustible Para Motores - ACPM - (para motores diésel), y carreteas pavimentadas con asfalto, que operen a flujo libre

Los datos para los vehículos y carreteras se obtuvieron teniendo en cuenta información secundaria disponible en el Ministerio de Transporte y gremios transportadores. Sin embargo, para muchas características geométricas se debió recurrir a otro tipo de información y entidades, como la que reposa en el INVIAS.

Herramientas como el SICE-TAC (en vista de su aplicabilidad nacional), y el HDM-4 (por su carácter internacional y de aceptabilidad por diferentes organismos nacionales e internacionales) fueron herramientas informáticas básicas para los análisis que se debían realizar.

2.4 Hipótesis

Las emisiones emitidas por los vehículos no solo dependen del vehículo en sí, sino que también dependen de las características del recorrido; conociendo los tipos de vehículos representativos de carga que circulan desde un punto A hasta un punto B, y teniendo en cuenta algunas variables tanto del viaje como de la carretera, tales como distancia, velocidad, tipo de terreno, características geométricas, entre otras. Es posible estimar las emisiones que un viaje de carga interurbano produce, según la ruta y el vehículo usado.

3. Marco teórico y estado del arte

Para poder estimar las emisiones producidas por un vehículo de carga durante el transporte interurbano de mercancía por carretera, es importante entender algunas de las variables que afectan este proceso; adicionalmente es de vital importancia conocer cuál es el proceso que se realiza para el cálculo de dichas emisiones y como estas varían según la zona o región que se pretenda estudiar. Este capítulo presenta dichas consideraciones a continuación.

3.1 Elementos geométricos de las carreteras

En países en vía de desarrollo, las carreteras que conectan las principales ciudades están en un proceso de transformación en el cual están pasando de ser de dos carriles a carreteras multicarril donde se comparten muchas características, entre ellas el tipo de terreno, pendiente y curvatura (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2015). Dentro de las principales características geométricas nombradas por el INVIAS (2008, 2015) se encuentran:

- **Alineamiento horizontal y vertical:** En la cual la velocidad de diseño ayuda en el control de los radios de curvatura, peraltes, distancias de visibilidad, entre otros. Se busca entonces una armonía entre ambos alineamientos, con el fin de mantener una velocidad operacional por ciertos tramos.
- **Calzada:** Es la destinada para la circulación de los vehículos.
- **Berma:** Es la zona destinada para paradas eventuales de los vehículos. También es usada para el tránsito de peatones y bicicletas, entre otros
- **Obstáculos laterales:** Son elementos ubicados a 1.80 m, o menos, del borde de la calzada, con el fin de evitar incidentes viales contra éstos o que sean objetos que puedan afectar las características con que el conductor maneja.

3.2 Clasificación de las carreteras

Existen diferentes formas de clasificar las carreteras por las cuales transitan los vehículos, dichas formas dependen del propósito y puede variar para zonas urbanas y rurales. Por ejemplo, se puede tener una clasificación de carretera, según las características geométricas (regionales, calles convencionales, autopistas) lo cual da un enfoque para la localización; según su ruta (interestatal, estatal y condado) que da un enfoque a la operación del tráfico;

clasificación administrativa (del Sistema Nacional de Carreteras o No perteneciente al Sistema Nacional) la cual identifica la financiación y el responsable de ésta. También existe una clasificación funcional de acuerdo al servicio que presta, y fue desarrollada con fines de planificación del transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2011). Diferentes países han adoptado una clasificación específica, con el fin de poder identificarlas según sus características. Entre las clasificaciones se destacan:

3.2.1 Según su funcionalidad

El proceso por el cual se agrupan las carreteras en sistemas y clases es conocido como clasificación funcional, debido a que en esta agrupación, se tiene en cuenta el servicio prestado y las funciones de movilidad y accesibilidad (República Federativa de Brasil, 1986).

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de la Republica de Colombia (2008) en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, afirma que las carreteras se pueden clasificar según la necesidad operacional que tiene la carretera, o también según los intereses que pueda tener la nación sobre éstas, y define las carreteras cómo:

- **Primarias:** Son carreteras pavimentadas (transversales, troncales y accesos a capitales departamentales) que integran las principales zonas de producción y consumo tanto al interior del país como con otros países.
- **Secundarias:** Pueden ser pavimentadas o en afirmado, y son aquellas carreteras que unen una cabecera municipal con otra, o con una carretera primaria.
- **Terciarias:** Principalmente son en afirmado, pero también existen asfaltadas. Unen una vereda con otra, o una cabecera municipal con una vereda.

Para la American Association of State Highway and Transportation Officials, conocida comúnmente por sus siglas como AASHTO (2011), la clasificación funcional de las carreteras rurales, son las arterias principales, arterias menores, colectoras mayores, colectoras menores y caminos locales; y cada una de ellas tiene las siguientes características:

- **Arterias principales:** Corredores con longitudes y densidades de tráfico altas, que dan movimiento entre diferentes áreas urbanas, con poblaciones mayores a 50,000 habitantes; se puede decir que prácticamente no tienen interferencias.
- **Arterias Menores:** Son carreteras que proporcionan velocidades de desplazamiento relativamente altas y una interferencia mínima. Al igual que las principales, conectan ciudades y pueblos grandes.
- **Colectoras mayores:** Sirven para condados y grandes pueblos que no se encuentran conectados por las arterias y otros lugares de alta relevancia como importantes áreas económicas.

- **Colectoras menores:** Proporcionar servicio a las comunidades más pequeñas además de conectar los caminos locales con las áreas colectoras.
- **Caminos locales:** Constituye todos los caminos rurales que no están clasificados como arterias principales, arterias menores o caminos de recolección. Principalmente proporciona acceso zonas adyacentes a la red de colectoras.

En general, según su funcionalidad las carreteras rurales se dividen en grandes grupos, que han sido adoptados por diferentes manuales de diseño de carreteras. Dichos grupos son vías arterias, colectoras y locales; que se pueden subdividir en pequeños grupos (AASHTO 2011; Ministerio de Fomento España, 2016; Ministry Of Works Tanzania, 2011; República Federativa de Brasil, 1986; 2011).

3.2.2 Según pendiente del terreno

El Manual de Diseño geométrico de Carreteras de Colombia (2008) y el Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para carreteras de dos Carriles del INVIAS (1996) también clasifican las carreteras según el tipo de terreno, para lo cual tienen en cuenta la pendiente longitudinal de la carretera; es decir la topografía predominante en el tramo estudiado de la carretera. Los tipos de terreno descritos por el INVIAS son:

- **Plano:** Aquel cuya pendiente transversal al eje de la carretera es menor de cinco grados (5°); además la pendiente longitudinal de la carretera es menor del tres por ciento (3%). Por lo general en este tipo de terreno, la velocidad de los vehículos pesados es casi similar a la de los livianos.
- **Ondulado:** Este tipo de terreno tiene una pendiente transversal al eje de carretera que oscila entre seis y trece grados (6°- 13°); la pendiente longitudinal de la carretera está entre el tres y seis por ciento (3% - 6%). Para dichas pendientes, la velocidad de operación de los vehículos pesados puede estar por debajo de la de los livianos.
- **Montañoso:** La pendiente transversal de este terreno al eje de la carretera, se encuentra entre trece y cuarenta grados (13°- 40°); mientras la pendiente longitudinal de la carretera está entre seis y ocho por ciento (6% - 8%). La relación peso-potencia no solo afecta a los vehículos pesados, sino que también puede afectar a los livianos.
- **Escarpado:** Es el tipo de terreno cuya pendiente transversal del terreno al eje de carretera, por lo general es superior a cuarenta grados (40°); así mismo, la pendiente longitudinal de la carretera es superior al ocho por ciento (8%). Para dichas pendientes, todos los vehículos ven afectada su velocidad.

El Highway Capacity Manual (2010), citado por el INVIAS (2015) afirma que debido a la combinación de alineamientos horizontales y verticales, la pendiente y el tipo de terreno tienen una incidencia directa en los vehículos, especialmente en los camiones en donde según ellos en:

- **Carretera plana:** Los camiones pueden mantener velocidades similares a las de los automóviles.
- **Carretera ondulada:** Los camiones deben disminuir su velocidad por intervalos frecuentes o durante periodos muy significativos.
- **Carretera montañosa:** Los camiones deben circular a la velocidad específica o a una muy cercana a esta.

Por otro lado, definen las pendientes en ascenso y compuestas de la siguiente manera:

- **Pendientes en ascenso:** Son aquellas cuya pendiente está entre 2% y 3% con una longitud mayor a los 800 m. Adicionalmente, son todos los tramos que tengan una pendiente mayor o igual al 3% pero con una longitud por encima de los 400 m.
- **Pendientes compuestas:** Son todas aquellas en donde es posible combinar pendientes menores a 4% y longitudes inferiores a 1220 metros.

3.2.3 Características de las carreteras

Existe una relación entre la clasificación funcional de las carreteras, y las características geométricas de éstas, debido a que, según la funcionalidad, la carretera tendrá unos aspectos o características mínimas de diseño. Sin embargo, la clasificación funcional representa la función que la carretera tiene dentro de la red vial; mientras que la clasificación técnica se fundamenta en los volúmenes de tráfico de carreteras con nuevos trazados (República Federativa de Brasil, 1986).

El Manual Interamericano de Normas de Diseño Geométrico de Carreteras (1986) recomienda diferentes clases de diseño para las carreteras, en otras palabras, clasifica las carreteras según sus características geométricas (Tabla 1) en 5 clases:

Tabla 1. Clases de carreteras Manual Interamericano

Clase		Características		Criterio de clasificación técnica (VMD) previstos en año 10	Velocidad mínima de diseño (km/h)		
					Plano	Ondulado	Montañoso
0		Autopista - Control total de accesos		Decisión administrativa	120	100	80
I	A	Calzada doble	Control parcial de accesos	(VMD) 200 - 1400 se quiere nivel de servicio mejores que "C"	100	80	60
	B	Calzada simple		(VMD) 200 - 1400 se quiere nivel de servicio mejores que "C"			
II		Calzada simple		(VMD) bidireccional 700 - 1400	100	70	50
III		Calzada simple		(VMD) bidireccional 300 - 700	80	60	40
IV	A	Calzada simple		(VMD) bidireccional 50 - 300 en año apertura	60	40	30
	B	Calzada simple		(VMD) bidireccional menor 50 en año apertura			

Nota: Reproducción de "Manual Interamericano de Normas de Diseño de Geométrico de Carreteras" por República Federativa de Brasil (1986)

Es de mencionar que en la Tabla 1 cuando se menciona VMD, se hace referencia al Volumen Medio Diario, lo cual se define como el volumen total de vehículos que pasa por ambos sentidos.

Clase 0: Son autopistas con altos estándares técnicos para volúmenes de tráfico elevados, en las cuales los accesos están completamente controlados, buscan mayor movilidad para atender la demanda de tráfico de paso por una región. Se busca que las características técnicas y operativas se mantengan uniformes y homogéneas en un tramo. Las principales características de este tipo de carreteras se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Carreteras Clase 0

Características		**Terreno**		
		Plano	**Ondulado**	**Montañoso**
Velocidad mínima de diseño		120 km/h	100 km/h	80 km/h
Distancia mínima de visibilidad de parada	Deseable	310 m	210 m	140 m
	Absoluta	205 m	155 m	110 m
Radio mínimo de curva horizontal (e=10%)		540 m	345 m	210 m
Tasa máxima de peralte		10%	10%	10%
Pendiente máxima		3%	4%	5%
Valor mínimo de K para curvas verticales convexas	Deseable	233	107	48
	Absoluta	102	58	29
Valor mínimo de K para curvas verticales cóncavas	Deseable	80	52	32
	Absoluta	50	36	24
Ancho de banda de rodamiento		3.75 m	3.75 m	3.6 m
Ancho del arcén o espaldón externo		3.5 m	3.0 m	3.0 m
Gálibo vertical mínimo		5.5 m	5.5 m	5.5 m
Apartamiento lateral mínimo del borde del arcén o espaldón - obstáculos	Continuos	0.5 m	0.5 m	0.5 m
	Aislados	1.5 m	1.5 m	1.5 m
Ancho faja central	Mínimo absoluto	3 - 7 m	3 - 7 m	3 - 7 m
	Deseable	10 - 18 m	10 - 18 m	10 - 18 m

Nota: Reproducción de "Manual Interamericano de Normas de Diseño de Geométrico de Carreteras" por República Federativa de Brasil (1986)

Clase I: Pueden ser de doble calzada o calzada sencilla en cada dirección, lo cual las clasifica en tipo *A* o *B* respectivamente. Tienen control parcial de accesos; presentan como mínimo un nivel de servicio tipo C, para terrenos muy ondulados o montañosos se pueden aceptar niveles de servicio tipo D. Se presentan condiciones de flujo estable. Sin embargo, la velocidad y maniobrabilidad está condicionada por los volúmenes de tráfico, soporta volúmenes medios de tráfico diario en ambas direcciones de 200 a 1400 vehículos mixtos. Las principales características de este tipo de carreteras se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Carreteras Clase I

Características		Terreno		
		Plano	**Ondulado**	**Montañoso**
Velocidad mínima de diseño		100 km/h	80 km/h	60km/h
Distancia mínima de visibilidad de parada	Deseable	210 m	140 m	85 m
	Absoluta	155 m	110 m	75 m
Distancia mínima de visibilidad de parada		680 m	560 m	420 m
Radio mínimo de curva horizontal (e=10%)		345 m	210 m	115 m
Tasa máxima de peralte		10%	10%	10%
Pendiente máxima		3%	4.5%	5%
Valor mínimo de K para curvas verticales convexas	Deseable	107	48	18
	Absoluta	58	29	14
Valor mínimo de K para curvas verticales cóncavas	Deseable	52	32	17
	Absoluta	36	24	15
Ancho de banda de rodamiento		3.6 m	3.6 m	3.6 m
Ancho del arcén o espaldón externo		3.5 m	2.5 m	2.5 m
Gálibo vertical mínimo		5.5 m	5.5 m	5.5 m
Apartamiento lateral mínimo del borde del arcén o espaldón - obstáculos	Continuos	0.5 m	0.5 m	0.5 m
	Aislados	1.5 m	1.5 m	1.5 m
Ancho faja central	Mínimo absoluto	3 - 7 m	3 - 7 m	3 - 7 m
	Deseable	10 m	10 m	10 m

Nota: Reproducción de "Manual Interamericano de Normas de Diseño de Geométrico de Carreteras" por República Federativa de Brasil (1986)

Clase II: Son carretelas de un carril por sentido, la cual está prevista para soportar los volúmenes de tráfico durante los siguientes diez años posterior a la apertura de la carretera; soporta volúmenes medios de tráfico diario en ambas direcciones de 700 a 1400 vehículos mixtos. Las principales características de este tipo de carretera se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Carreteras Clase II

Características		Terreno		
		Plano	**Ondulado**	**Montañoso**
Velocidad mínima de diseño		100 km/h	70 km/h	50 km/h
Distancia mínima de visibilidad de parada	Deseable	210 m	110 m	65 m
	Absoluta	155 m	90 m	60 m
Distancia mínima de visibilidad de parada		680 m	490 m	350 m
Radio mínimo de curva horizontal (e=8%)		375 m	170 m	80 m
Tasa máxima de peralte		8%	8%	8%
Pendiente máxima		3%	5%	6%
	Deseable	107	29	10

Valor mínimo de K para curvas verticales convexas	Absoluta	58	20	9
Valor mínimo de K para curvas verticales cóncavas	Deseable	52	24	12
	Absoluta	36	19	11
Ancho de banda de rodamiento		3.6 m	3.6 m	3.5 m
Ancho del arcén o espaldón externo		3.0 m	2.5 m	2.0 m
Gálibo vertical mínimo	Deseable	5.5 m	5.5 m	5.5 m
	Absoluta	4.5 m	4.5 m	4.5 m
Apartamiento lateral mínimo del borde del arcén o espaldón - obstáculos	Continuos	0.5 m	0.5 m	0.5 m
	Aislados	1.5 m	1.5 m	1.5 m

Nota: Reproducción de "Manual Interamericano de Normas de Diseño de Geométrico de Carreteras" por República Federativa de Brasil (1986)

Clase III: Son carreteras de un carril por sentido, que está prevista para soportar los volúmenes de tráfico durante los siguientes diez años posterior a la apertura de la carretera; soporta volúmenes medios de tráfico diario en ambas direcciones de 300 a 700 vehículos mixtos. Las principales características de este tipo de carretera se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Carreteras Clase III

Características		**Terreno**		
		Plano	**Ondulado**	**Montañoso**
Velocidad mínima de diseño		80 km/h	60 km/h	40 km/h
Distancia mínima de visibilidad de parada	Deseable	140 m	85 m	45 m
	Absoluta	110 m	75 m	45 m
Distancia mínima de visibilidad de parada		560 m	420 m	210 m
Radio mínimo de curva horizontal (e=8%)		230 m	125 m	50 m
Tasa máxima de peralte		8%	8%	8%
Pendiente máxima	Deseable	3%	5%	6%
	Absoluta	4%	6%	7%
Valor mínimo de K para curvas verticales convexas	Deseable	48	18	5
	Absoluta	29	14	5
Valor mínimo de K para curvas verticales cóncavas	Deseable	32	17	7
	Absoluta	24	15	7
Ancho de banda de rodamiento		3.5 m	3.3 m	3.3 m
Ancho del arcén o espaldón externo		2.5 m	2.0 m	2.0 m
Gálibo vertical mínimo	Deseable	5.5 m	5.5 m	5.5 m
	Absoluta	4.5 m	4.5 m	4.5 m
Apartamiento lateral mínimo del borde del arcén o espaldón - obstáculos	Continuos	0.3 m	0.3 m	0.3 m
	Aislados	0.5 m	0.5 m	0.5 m

Nota: Reproducción de "Manual Interamericano de Normas de Diseño de Geométrico de Carreteras" por República Federativa de Brasil (1986)

Clase IV: Son carreteras de un carril las cuales en su mayoría apenas tienen un revestimiento primario. La necesidad de pavimentar dependerá si el tráfico diario supera los 100 vehículos, o si en la zona se tienen altas precipitaciones anuales. Buscan satisfacer una necesidad inmediata, por lo cual la vida útil puede ser menor. Se pueden clasificar en tipo *A* o *B*, teniendo en cuenta el tráfico medio diario en el año de apertura debido a las pendientes admisibles y elemento de la sección transversal (tipo *A* entre 50 y 100, tipo *B* menor a 50). Las principales características de este tipo de carretera se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Carreteras Clase IV

Características		**Terreno**		
		Plano	**Ondulado**	**Montañoso**
Velocidad mínima de diseño		60 km/h	40 km/h	30 km/h
Distancia mínima de visibilidad de parada	Deseable	85 m	45 m	30 m
	Absoluta	75 m	45 m	30 m
Distancia mínima de visibilidad de parada		420 m	270 m	180 m
Radio mínimo de curva horizontal (e=8%)		125 m	50 m	25 m
Tasa máxima de peralte		8%	8%	8%
Pendiente máxima	Subclase A	4%	6%	8%
	Subclase B	6%	8%	10%
Valor mínimo de K para curvas verticales convexas	Deseable	18	5	2
	Absoluta	14	5	2
Valor mínimo de K para curvas verticales cóncavas	Deseable	17	7	4
	Absoluta	15	7	4
Ancho de banda de rodamiento	Subclase A	3. 0 m	3. 0 m	3.0 m
	Subclase B	2.75 m	2.75 m	2.75 m
Ancho del arcén o espaldón externo	Subclase A	1.3 m	1.3 m	0.8 m
	Subclase B	1.0 m	1.0 m	0.5 m
Gálibo vertical mínimo	Deseable	5.5 m	5.5 m	5.5 m
	Absoluta	4.5 m	4.5 m	4.5 m
Apartamiento lateral mínimo del borde del arcén o espaldón - obstáculos	Continuos	0.3 m	0.3 m	0.3 m
	Aislados	0.5 m	0.5 m	0.5 m

Nota: Reproducción de "Manual Interamericano de Normas de Diseño de Geométrico de Carreteras" por República Federativa de Brasil (1986)

3.3 Velocidades de diseño y velocidades de operación en un tramo homogéneo

Según las características geométricas de la carretera, los vehículos pueden variar su velocidad. En Estados Unidos, cuando la carretera tiene pendiente longitudinal baja (carretera plana), por lo general los vehículos operan entre 100 y 120 km/h; cuando la

pendiente longitudinal corresponde a carretera ondulada, la velocidad se encuentra entre 80 y 100 km/h; en los casos que se tiene una pendiente longitudinal que corresponda a carretera montañosa la velocidad vehicular es entre 60 y 80km/h (AASHTO 2011).

En las carreteras colombianas, las velocidades de diseño para una carretera primaria oscilan entre 80 y 100 km/h para carreteras planas que son aquella con pendiente longitudinal baja, entre 70 y 100 km/h para onduladas, entre 60 y 90 km/h para montañosas y entre 60 y 80 km/h para escarpadas (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2008). Es muy común encontrar que los vehículos livianos son los más representativos del tramo analizado, lo cual hace que las velocidades de diseño sean altas al compararlas con las velocidades de operación de los camiones.

Para el análisis de la información del presente trabajo, se usaron las velocidades de operación de los vehículos de carga. Puesto que para conocer cuántas son las emisiones emitidas por los vehículos de carga, es importante tener un valor aproximado de la velocidad con la cual dichos vehículos operan en condiciones normales.

3.4 Transporte de carga por carretera

Según estudios del año 2014 realizados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se estima que, en el año 1950 aproximadamente el 70% de la población mundial vivía en zonas rurales y alrededor del 30% en áreas urbanas. Con el transcurso de los años, dichas cifras han disminuido en las zonas rurales y aumentado en las urbanas; para el año 2014 el 54% de la población mundial era urbana. Se estima que este porcentaje va a continuar en aumento, y se pronostica que para el año 2050 el 66% de las personas residirán en áreas urbanas (United Nations - Department of Economic and Social Affairs - Population Division, 2015). Estos porcentajes varían según los continentes y países. En Colombia, por ejemplo, desde el inicio del siglo XXI, ya se había alcanzado un 74% de población viviendo en centros urbanos (Centro de Estudios Urbanos - Universidad el Rosario, 2012), a esto se le suma el gran éxodo de personas procedentes del campo que engrosan las áreas aledañas a las grandes ciudades.

Si con el paso de los años se espera un incremento en la población urbana, el transporte de mercancías hacia dichas zonas tomará mayor importancia, por tal motivo el transporte de carga entre ciudades será fundamental para mantener el equilibrio económico de los países y las regiones. Dicha afirmación es válida debido a que el transporte de carga es la representación física de la economía (Holguín-Veras, 2016). Si a lo anterior, se le suma que se estima que las ciudades generan más del 80% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial (Volvo Research and Educational Foundations & Regional Plan Association, 2016); se puede afirmar que el flujo de mercancía es un pilar muy importante en la economía mundial

y de las ciudades; en donde uno de los grupos principales es el transporte de carga entre ciudades.

Dentro de la cadena de suministro, el transporte de mercancías juega un papel sumamente importante puesto que es el encargado de garantizar el movimiento y disponibilidad oportuna de materias primas y productos terminados. La necesidad del movimiento de mercancías se da debido a la separación geográfica entre productores y consumidores. En muchos casos, el modo de transporte por carretera convencional no logra satisfacer toda la demanda, por lo cual es necesario otros medios de transporte y sus combinaciones, lo anterior debido a los procesos actuales de globalización (Steadieseifi, Dellaert, Nuijten, Van Woensel, & Raoufi, 2014). Sin embargo, según Steadieseifi et al. (2014) basados en el trabajo de (EUROSTAT, 2012); en el año 2010 aproximadamente el 45.8% del total de la carga transportada en los países pertenecientes a la Unión Europea, se realizó por medio de carretera, 36.9% por medio del mar, 10.2% por vía férrea y el 3.8% por vías internas navegables.

La movilización de carga en Colombia se realiza principalmente vía terrestre, en donde el modo carretero es el más usado en las operaciones, con un total del 73.5%; seguido del férreo el cual aporta un 23.6%. El resto de porcentaje se realiza por los modos fluvial, cabotaje y aéreo, los cuales aportan un 1.5%, 1.3% y 0.1% respectivamente (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2020)

3.4.1 Línea del tiempo del transporte de carga por carretera

Desde la antigüedad, el movimiento de mercancía y personas ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de la humanidad. Dentro de algunos datos históricos los cuales son representativos para el transporte de carga por camiones se tiene la invención de la rueda (3500 AC); el uso de carruajes y tracción animal (2000 AC); mejoras a la maquina a vapor de James Watt la cual posteriormente se adaptó para vehículos (1780 con primeros motores) y la creación del motor de combustión interna (mediados del siglo XIX) el cual impulsó el potencial del vehículo (Bob, 2003).

Para comienzos del siglo XX se tenían cientos de vehículos los cuales con el pasar del tiempo se fueron adaptando para satisfacer las necesidades de la sociedad y así la industria del transporte por carretera tenía más fuerza. Los conductores comenzaron a ganarse la vida con un solo camión. La alta demanda entre ciudades como Philadelphia y New York creó compañías de transporte con variedad de flota y conductores. El primer gran auge del transporte por carretera se dio luego de la primera guerra mundial (1920s), cuando no solo se mejoraron las carreteras, sino que también el neumático reemplazó el caucho macizo y había camiones más grandes con cabina cerrada que ayudaron a las compañías a viajar más rápido, de una manera más cómoda y transportando más carga (Adams, 2000)

Durante la gran depresión muchas compañías tuvieron que cerrar, pero algunas lograron sobrevivir; en 1935 el congreso de Estados Unidos aprobó el Motor Carrier Act, con el cual se regularía la industria del transporte por carretera, y terminaría la disputa entre intereses ferroviarios y automovilísticos (Nelson, 1936). A nivel mundial se estaba viviendo una situación similar. Las compañías de transporte por carretera comenzaron a mostrar su potencial luego que las tarifas del sistema férreo fueran mayores a las del transporte por carretera (Gibbins & Graeme, 1978).

La producción de camiones tuvo otro auge en la segunda guerra mundial (1939-1945). Luego de esta guerra, compañías norteamericanas como Ford, Dodge y Chevrolet comenzaron una producción intensa, a esto se le sumó la producción de automóviles durante los 40s y 50s (Mueller, 1999). En Suecia en la década de 1950, la Volvo impulsó los motores diésel turboalimentados de inyección directa, de esta forma, la industria se comenzó a abastecer con motores diésel. Con el paso de los años la industria del camión realizó mejoras en cuanto a distancias, velocidad, carga, entre otras. Esto fomentó la construcción de carreteras no solo entre ciudades, sino también entre países (Gibbins & Graeme, 1978). Con el transcurrir de los años la industria del transporte por carretera comenzó a mejorar con el fin de ganar más terreno sobre los demás modos de transporte.

Hoy en día el precio del combustible va en aumento, los altos costos de producción, operación y externalidades negativas han generado un debate a nivel mundial sobre el uso del camión que usa derivados del petróleo como insumo fundamental para la locomoción. Motivo por el cual se ha trabajado en desarrollo y nuevas tecnologías que permiten un mejor desempeño y ahorro en la operación del vehículo. Cada vez es más usual el uso de términos como vehículos híbridos, eléctricos y autónomos.

3.4.2 Cadena del transporte

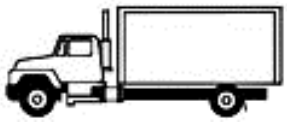
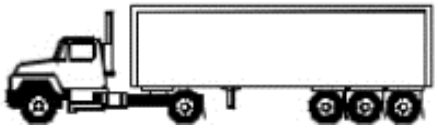
Según Steadie et al. (2014), la cadena del transporte se puede dividir en tres partes:

- **Pre-haul:** También conocido como primera milla se da para el proceso de recolección. El modo predominante usado es por carretera.
- **Long-haul:** Largas distancias, es el tránsito de contenedores en la fase que no comprende la primera ni la última milla. Por lo general se utilizan diferentes modos: carretera, férreo, aéreo o acuático; esto incluye sus combinaciones.
- **End-haul:** Son los procesos de última milla, lo que quiere decir de entrega al cliente. En la mayoría de los casos se realiza por transporte terrestre de carretera. Últimamente se ha observado el aumento del transporte multimodal, por ejemplo, entre camiones y bicicletas, lo cual también aplica para el Pre-haul.

3.4.3 Tipos de vehículos para el transporte de carga

La diferencia principal entre los tipos de vehículos de carga radica en la configuración, pues existen vehículos de una sola unidad, en el que la carga está en espacio que hace parte del mismo chasis junto con el motor (camiones), y existen vehículos articulados que tienen remolques, semirremolques o balancines que transportan carga por separado y son arrastrados por un camión o tractocamión. La diferencia entre un camión y un tractocamión se puede observar en la Tabla 7.

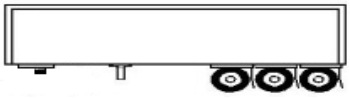
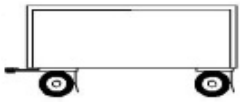
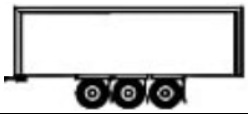
Tabla 7. Camión vs Tractocamión

Tipo	Unidad tractora	Esquema del vehículo
Camión	En el chasis de la unidad tractora se apoya por completo la unidad de carga	
Tractocamión	En el chasis de la unidad tractora se apoya parte de la unidad de carga, la cual puede ser desanclada con facilidad	

Nota: Adaptado de "resolución 4100 de 2004 del Ministerio de Transporte de Colombia", Mintransporte (2004)

Los tractocamiones al no tener una unidad de carga integrada completamente al chasis del vehículo utilizan diferentes tipos de unidades para llevar la carga, donde la más común es el remolque. La diferencia entre un remolque, semirremolque y balancín se puede visualizar en la Tabla 8, la cual muestra que, aunque estos son vehículos no motorizados halados por una unidad motora, dotados de frenos y luces reflectivas, el remolque y el balancín no le transmiten peso a la unidad motora que lo hala mientras que el semirremolque se apoya sobre la unidad motora y le transmite parte de su peso.

Tabla 8. Semirremolque, Remolque y Balancín

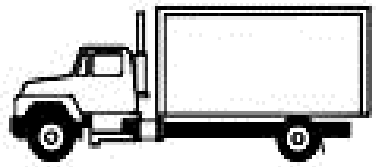
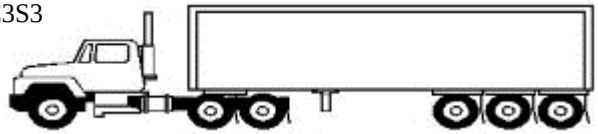
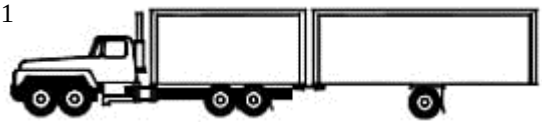
Tipo	Unidad de carga	Esquema del vehículo
Semirremolque	Transmite peso a unidad motora	
Remolque	No transmite peso a unidad motora	
Balancín	No transmite peso a unidad motora	

Nota: Adaptado de "resolución 4100 de 2004 del Ministerio de Transporte de Colombia", Mintransporte (2004)

Los vehículos de carretera en los cuales se puede transportar carga van desde la bicicleta hasta tractocamiones con semirremolques, remolques y balancines; es decir abarcan diferentes tipologías vehiculares, cómo motos, livianos, pick up, camiones pequeños (camioncitos), entre otros.

En Colombia, los vehículos de carga tipo camión se designan según la cantidad de líneas de rotación que posee, para esto se utiliza la letra C, acompañada de un dígito el cual indica la cantidad de líneas de rotación del camión o tractocamión. Adicionalmente si está acompañado de un semirremolque, se adiciona la letra S seguida de la cantidad de líneas de rotación; si se acompaña de un remolque se utiliza la letra R seguida de la cantidad de líneas de rotación que tiene este; finalmente si está acompañado de un remolque balanceado, se utiliza la letra B seguida de la cantidad de líneas de rotación que este tenga (MinTransporte, 2004, 2005). Para visualizar un ejemplo de cómo es la configuración vehicular, remítase a la Tabla 9.

Tabla 9. Configuración vehículos de carga

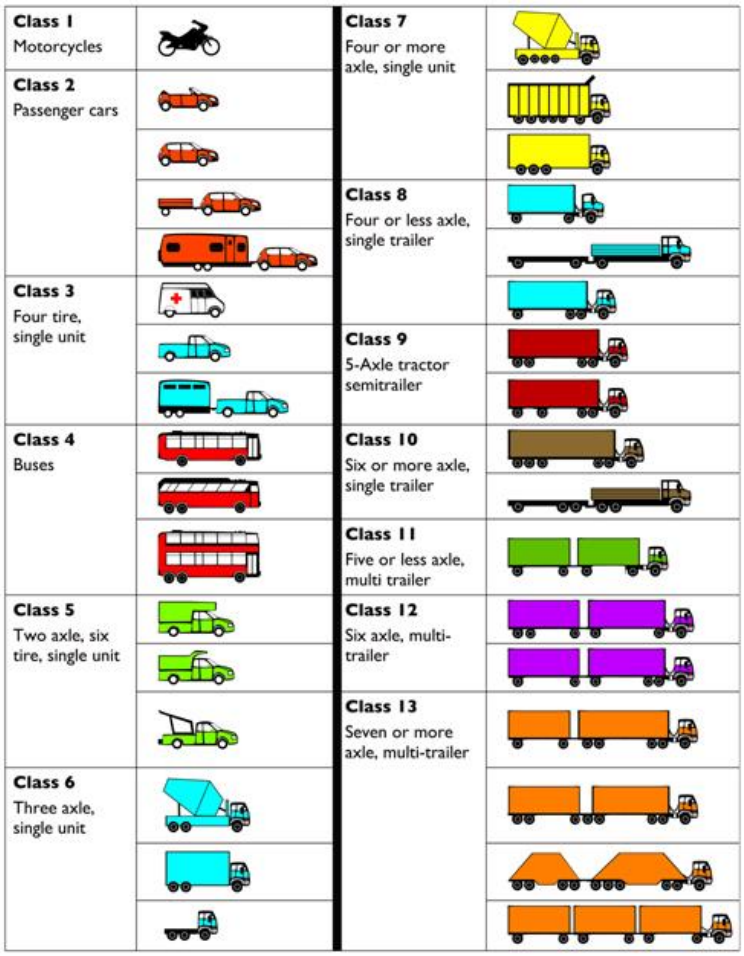
Designación	Descripción	Ejemplo Esquema del vehículo
C + líneas de rotación	Camión o tractocamión con ejes entre 2 y 4	C2 
C + líneas de rotación acompañado de S + líneas de rotación	Tractocamión con Semirremolque con ejes entre 1 y 3	C3S3 
C + líneas de rotación acompañado de R + líneas de rotación	Camión con Remolque con ejes entre 2 y 4	C3R2
C + líneas de rotación acompañado de B + líneas de rotación	Camión con Balancín con ejes entre 1 y 3	C4B1 

Nota: Adaptado de "resolución 4100 de 2004 del Ministerio de Transporte de Colombia", Mintransporte (2004)

En otros países como Estados Unidos se usan diferentes configuraciones vehiculares, sin embargo, la Administración Federal de Seguridad de Autotransportes, por sus siglas en inglés (FMCSA) y según el departamento de transporte de los EE.UU. (2015), los vehículos que más se usan para el transporte de mercancía se pueden dividir en tres grandes grupos: Single unit o Straight Trucks (camiones rígidos hasta 34,000 lbs o 15.42 ton de peso bruto vehicular) los cuales en 2012 representaron aproximadamente el 39% de las millas

recorridas por todos camiones comerciales. Combination Trucks (Camiones articulados hasta 80,000 lbs o 36.29 ton de peso bruto vehicular) los cuales representaron el 61% de todas las millas de vehículos comerciales recorridas en los Estados Unidos. Longer Combination Trucks (Vehículos combinados largos con más de 80,000 lbs de peso bruto vehicular) son un subconjunto de vehículos que solo pueden operar en ciertos Estados (23 autopistas interestatales). Adicionalmente, se considera que los vehículos comerciales diseñados para el transporte de mercancía son aquellos cuyo peso bruto vehicular es superior a 10,000 lbs o 4.54 ton (Federal Highway Administration [FHWA], 2015). Los vehículos que tienen un peso bruto vehicular de 10,000 lbs o menos, no los consideran como vehículos comerciales diseñados para el transporte de mercancía a pesar de que, si se comparan con la configuración de Colombia, pudieran entrar en categoría de los camiones C2P y camioncitos. La Federal Highway Administration (FHWA) dentro de la configuración vehicular, tiene 13 clases de vehículos entre las cuales 9 clases son consideradas como vehículos comerciales diseñados para el transporte de mercancía, es decir desde la clase 5 hasta la 13. Ver Figura 1.

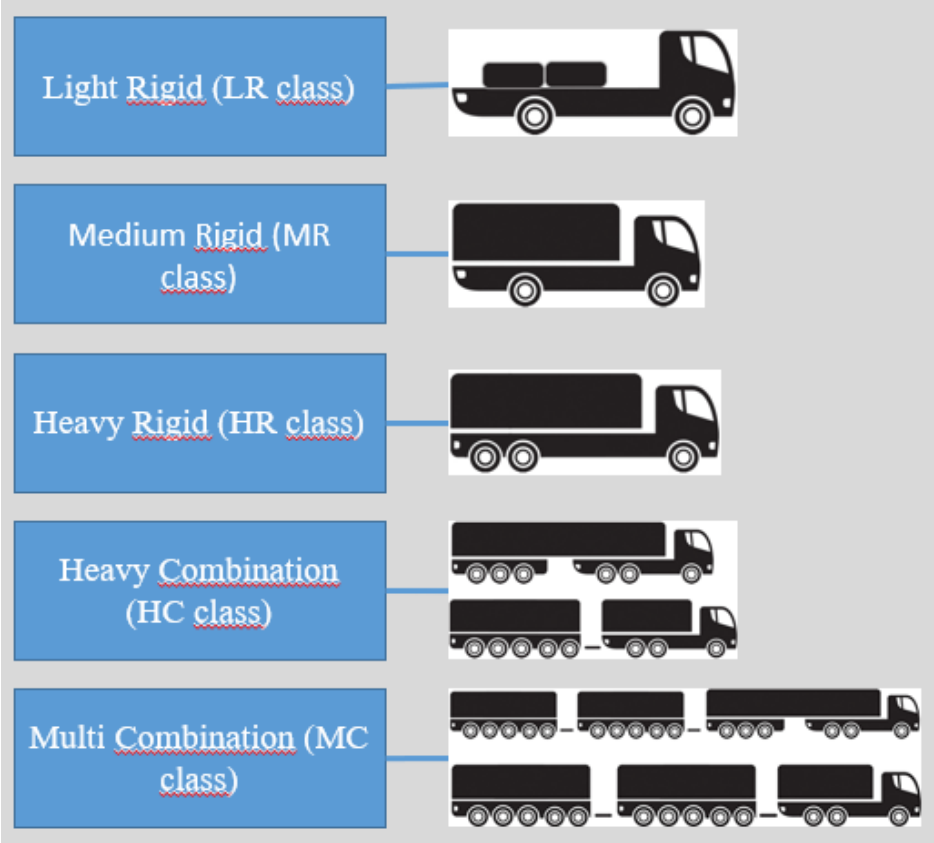
Figura 1. Clases de vehículos en Estados Unidos



Nota: Reproducción de "Traffic Monitoring Guide", FHWA, (2016), *Appendix C-2*

En Australia, se tienen 9 clases de vehículos, de las cuales 5 son consideradas para el transporte de carga (ver Figura 2): Light Rigid (LR class) son vehículos con dos (2) líneas de rotación cuyo peso bruto vehiculas es mayor a 4.5 ton e inferior a 8 ton. Medium Rigid (MR class) son vehículos de 2 líneas de rotación con peso bruto vehicular mayor a 8 ton. Heavy Rigid (HR class) son vehículos con 3 líneas de rotación con peso bruto vehicular mayor a 8 ton. Heavy Combination (HC class) son vehículos articulados a un remolque o semirremolque con peso bruto vehicular mayor de 9 ton y Multi Combination (MC class) los cuales son vehículos articulados a dos o más remolques y/o semirremolque con peso bruto vehicular mayor de 9 ton (Department of Transportation of Australia, 2019).

Figura 2. Vehículos de carga en Australia



Nota: Adaptación de las "Vehicle classes", Department of Transportation – Australia, 2019

3.5 Contaminación por fuentes móviles

Los costos tanto fijos, variables como otros costos del transporte de carga se han analizado en gran cantidad de oportunidades, al punto que algunas empresas los utilizan con el fin de calcular el costo del flete a transportar. Por otro lado, y a raíz de la importancia que ha tomado los últimos años la contaminación a nivel mundial, las emisiones producidas por los

camiones se han venido analizando debido a las repercusiones que éstas pueden tener tanto en la salud humana, como en el medio ambiente.

La importancia que ha tomado la contaminación producida por las fuentes móviles ha sido tal, que diferentes softwares que ayudan en el cálculo de las emisiones, especialmente aquellos que trabajan con costos, pretenden a futuro poder darle un valor económico a dicha contaminación, es decir, se busca que ésta afecte directamente los costos de la cadena logística de carga.

Existen en la literatura explicaciones de cómo se da la contaminación por fuentes móviles, al mismo tiempo se realiza un símil de dicha contaminación respecto a otras fuentes como las fijas. Dentro de la clase de fuentes móviles, se puede analizar diferentes categorías vehiculares, como lo son los camiones, al mismo tiempo que se puede ahondar más, analizando sus subcategorías.

3.5.1 Impactos ambientales y en la salud humana producidos por el transporte

Los sistemas de transporte tanto para carga, como para pasajeros están relacionados con externalidades positivas y negativas. Dentro de las negativas se tienen los impactos ambientales que se puedan dar según el modo de transporte que se use. En lo que compete al presente documento, se analizará los impactos ambientales que se dan por el transporte de mercancía de una ciudad a otra por modo terrestre en carretera.

Según J. Rodrigue (2013) los impactos ambientales del transporte se pueden dividir en tres categorías:

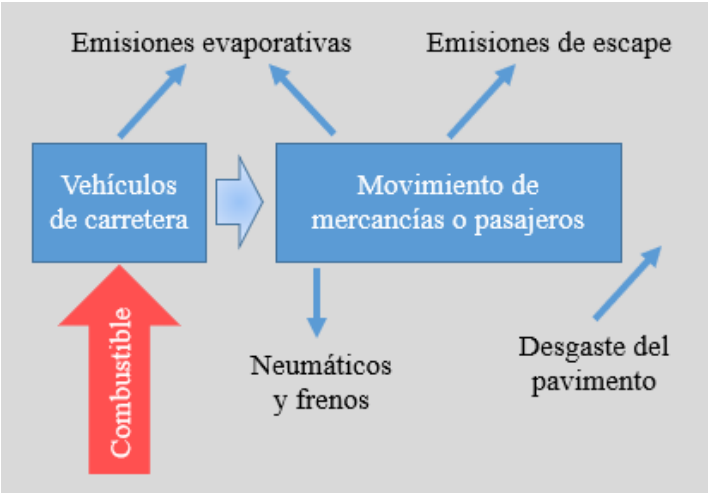
- **Impactos directos:** Cuando se da una consecuencia inmediata sobre el medio ambiente. En estos casos la causa y el efecto de dichos impactos son muy claros.
- **Impactos indirectos:** En muchos casos son de mayor consecuencia que los impactos directos. Sin embargo, puede pasar que su causa y efecto sean difíciles de establecer.
- **Impactos acumulativos:** Toman en cuenta los impactos directos e indirectos y consecuencias adictivas, multiplicativas o sinérgicas

Los costos asociados al transporte son altos, en muchos casos son asumidos por el sector público, privado o por una combinación entre ambos. Sin embargo, aún no se tiene claridad sobre los verdaderos costos que tiene el transporte. La falta de consideraciones que puedan explicar el costo real del transporte, puede explicar muchos problemas ambientales (Rodrigue et al., 2013).

Los vehículos al circular por carretera producen gran cantidad de emisiones, las cuales se pueden categorizar en 4 grandes grupos: 1) emisiones evaporativas; 2) emisiones de escape; 3) neumáticos – frenos; y 4) desgaste del pavimento (European Environment Agency,

2018a). La Figura 3 muestra que, al momento de poner combustible en los vehículos, se generan emisiones evaporativas, las cuales también se presentan cuando dicho vehículo se encuentra en movimiento. Sin embargo, durante el movimiento vehicular, también se presentan emisiones de escape y emisiones producidas por el desgaste de neumáticos y de los frenos. Finalmente, y producto del movimiento constante vehicular, el pavimento se desgasta lo cual también genera emisiones.

Figura 3: Emisiones en vehículos de carretera



Nota: Adaptación de "Exhaust emissions from road transport – Update Jul. 2018", European Environment Agency (2018a)

Las emisiones de escape en los vehículos se dan durante la combustión, por ejemplo, el ACPM, gasolina, gas, entre otros. La combustión se puede dar por motores de encendido por chispa o por compresión. Las principales emisiones producidas por la combustión son el dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Sin embargo, no son los únicos contaminantes que se producen en este proceso, con la oxidación incompleta del combustible se produce monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (THC) y material particulado (PM). Con la oxidación de elementos no combustibles presentes en la cámara de combustión se producen óxido de nitrógeno (NO_X) y óxido de azufre (SO_X), entre otros (European Environment Agency, 2018a).

Adicionalmente, según M. Osses Alvarado (2003) basado en el trabajo de Pearson en el Programa de Inventario México 2001, dentro de las emisiones de escape también se destaca compuestos orgánicos volátiles (VOC), gases tóxicos de aire tales como el benceno y formaldehído, además de las especies reductoras de visibilidad cómo amoniaco y sulfatos. Osses Alvarado también clasifica este tipo de emisiones en "emisiones por partida en frio" es decir aquellas que se producen cuando el motor aún está frio, y "emisiones en caliente" las cuales se dan cuando el vehículo ha alcanzado su temperatura normal de operación.

Las emisiones evaporativas, se refieren a la suma de todos los compuestos orgánico volátiles distintos del metano (NMVOC) que se encuentran en el combustible y que no son derivados de su combustión. Para muchos países europeos, en 2006 las emisiones evaporativas contribuyeron entre el 3% y 16.5% del total de NMVOC producidas por el transporte terrestre por carretera, para lo cual se han tenido que aplicar algunos sistemas de control por ejemplo un frasco de carbón activado conectado al tanque de combustible (dicho frasco absorbe el vapor de combustible que escapa del tanque), con el fin de poder disminuir el porcentaje de emisiones evaporativas (European Environment Agency, 2018b).

Muchas de las emisiones evaporativas de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) que emanan los vehículos a gasolina, se producen en el sistema de combustible, es decir, en el tanque, el sistema de inyección y las líneas del combustible. Sin embargo, para los vehículos tipo diésel, las emisiones evaporativas son despreciables, debido a la presencia de hidrocarburos más pesados y la presión relativamente baja del diésel (European Environment Agency, 2018b).

Los vehículos para transporte por carretera producen material particulado (PM) y carbón negro (BC), debido al ACPM usado por los camiones, el desgaste de las llantas y frenos a lo cual se le suma el desgaste de la superficie de rodadura por la cual circulan. Dichas partículas son producidas por los procesos abrasivos y otras se dan por la evaporación de material debido a las altas temperaturas que se pueden desarrollar durante el contacto entre los vehículos y la superficie (European Environment Agency, 2018b; Osses Alvarado, 2003).

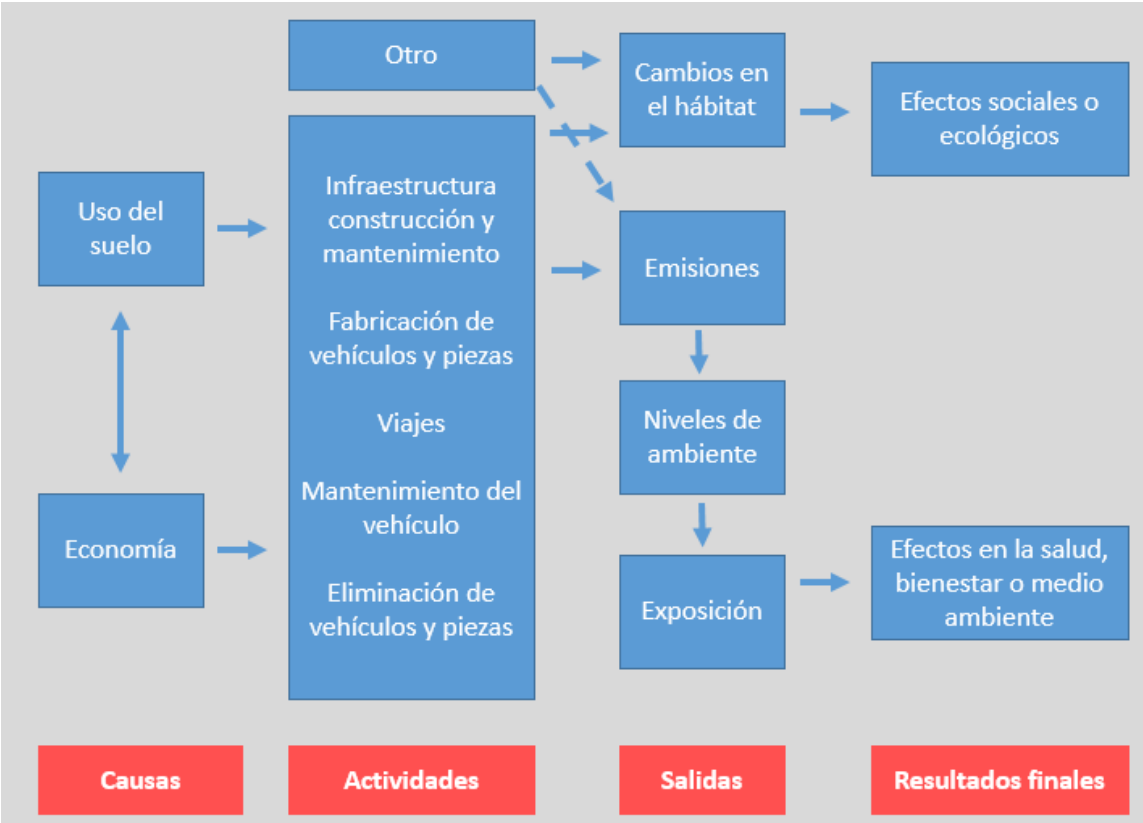
Existe una relación multidimensional entre el transporte y el medio ambiente; algunos aspectos son conocidos, y otros desconocidos. Los últimos años se ha aumentado las investigaciones en las cuales se pretende conocer mayormente dicha relación. Con los hallazgos se han modificado leyes y políticas respecto a temas ambientales.

Las principales dimensiones ambientales del transporte y a las cuales J. Rodrigue (2013) hace referencia, están relacionadas con las causas, actividades, salidas y resultados las cuales se presentan en la Figura 4.

- **Causas:** En muchos casos a mayor economía se generan mayores actividades de transporte, pues hay una relación entre los niveles de desarrollo, ingresos y la oferta de transporte. El uso del suelo se refiere a la localización y estructura espacial de la demanda de transporte.
- **Actividades:** Se refiere a los servicios y usos de la infraestructura relacionados al transporte; actividades que tienen como salida aspectos ambientales.
- **Salidas:** La primera salida ambiental son las emisiones. Según las características geográficas donde se dan las emisiones, los niveles de polución son creados. Cuando se correlacionan con la densidad de la población, se pueden calcular niveles de exposición los cuales pueden tener consecuencias sobre los humanos.

- **Resultados finales:** Lo que se tiene al final son problemas de salud, ambientales y de bienestar, los cuales son difíciles de medir.

Figura 4. Dimensiones del transporte



Nota: Adaptado de "The Geography of Transport Systems", Jean-Paul Rodrigue con Claude Comtois y Brian Slack (2013, p. 257)

Los impactos ambientales más importantes del transporte están relacionados al cambio climático, la calidad del aire, el ruido, calidad del agua, calidad del suelo, biodiversidad y paisaje (Rodrigue et al., 2013). Por ser una investigación relacionada a las emisiones que se producen en el transporte de carga entre ciudades, el presente trabajo sólo analiza los siguientes aspectos relacionados al cambio climático y a la calidad del aire.

- **Cambios climáticos:** Incluye el plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_X), óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (CFCs), perfluorocarbonos (PFCs), tetrafluoruro de silicio (SiF4), benceno y componentes volátiles (BTX), metales pesados (zinc, cromo, cobre y cadmio) y materiales particulados (ash, dush). Existen debates sobre la relación de estas emisiones y el cambio climático (Rodrigue et al., 2013).

- **Calidad del aire:** Los diferentes modos usados para el transporte de carga afectan la calidad de aire, debido a la polución en forma de gas, y al material particulado que

producen (Rodrigue et al., 2013). Es de mencionar, que la calidad del aire tiene una estrecha relación con la salud humana, por lo cual, debido a la gran cantidad de enfermedades, los últimos años se ha enfocado la atención en disminuir los daños causados a la calidad del aire debido a agentes contaminantes cómo los vehículos.

Los contaminantes tóxicos en el aire están asociados con cáncer y enfermedades cardiovasculares, respiratorias y neurológicas. Cuando es inhalado el monóxido de carbono (CO) por los humanos, se afecta el torrente sanguíneo, y se reduce la disponibilidad de oxígeno en el cuerpo. El dióxido de nitrógeno (NO_2), aumenta el riesgo de problemas respiratorios, reduciendo la función pulmonar y afectando el sistema de defensa inmune respiratorio. El dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_X), forman compuestos ácidos cuando se encuentran en la atmósfera, dichos compuestos mezclados con las nubes forman lluvias ácidas, las cuales afectan la agricultura, los bosques y el entorno. Adicionalmente, el smog que producen los modos de transporte reduce la visibilidad del entorno, lo cual a su vez reduce la calidad de vida de las personas, y hace los lugares menos atractivos para los turistas. Las propiedades físicas y químicas de las partículas emitidas, algunas de ellas en forma de polvo por los vehículos, tienen una afectación directa en la calidad del aire, y son asociadas con problemas de salud como irritaciones, inflamación en los ojos, alergias y coagulaciones sanguíneas (Rodrigue et al., 2013).

Es importante aclarar que también hay impactos ambientales respecto al ruido, más aún si es por encima de 75dB. La calidad del agua también se afecta, causando contaminación en ríos, lagos, humedales y océanos. La calidad del suelo se ve afectada con erosiones y contaminación de la tierra, especialmente por los combustibles, aceite y materiales tóxicos de la industria del transporte. La biodiversidad se afecta por las construcciones y mantenimientos necesarios para que el sistema opere. Finalmente, el paisaje se modifica acorde a las necesidades del sector.

Los impactos ambientales que causa el transporte de mercancías se pueden entender como externalidades negativas, las cuales en su mayoría no son tenidas en cuenta para los costos de la operación del sistema. Sin embargo, éstas no son las únicas externalidades negativas que produce dicho sector.

En el presente estudio, se analizan las emisiones producidas por los camiones durante el transporte de carga intermunicipal, lo cual está directamente relacionado a los cambios climáticos y la calidad del aire.

3.5.2 Estimación de emisiones vehiculares

La estimación de emisiones producidas por las fuentes móviles puede realizarse de diferentes formas. Cuando se calculan directamente de la fuente móvil se conoce como metodología directa (e.g., monitoreo a bordo, sensores remotos, pruebas dinamométricas),

el problema con este tipo de metodología son los altos costos que conlleva. Por otro lado, está la estimación de emisiones de forma indirecta, las cuales correlacionan las emisiones con diferentes variables. Adicionalmente, existe software especializado, que tienen modelos con resultados empíricos que en su mayoría son el resultado de mediciones directas, al mismo tiempo que se correlacionan con otras variables (Giraldo & Behrentz, 2006).

Para estimar las emisiones se utiliza la ecuación *(1)*, en la cual se tiene en cuenta la sumatoria de las emisiones en caliente que se dan por el tubo de escape, las producidas durante la partida en frío y las evaporativas (hidrocarburos evaporados) (Osses Alvarado, 2003). Sin embargo, no se tiene en cuenta las otras emisiones como las de desgaste de frenos, llantas y pavimento.

$$E_T = E_f + E_c + E_e \tag{1}$$

Donde:

ET = Emisiones totales en una variable temporal y espacial en gramos

Ef = Emisiones en frío durante el proceso en que el motor alcanza temperatura óptima de operación en gramos.

Ec = Emisiones en caliente durante el proceso de operación cuando el motor ha alcanzado su temperatura óptima de funcionamiento en gramos.

Ee = Emisiones evaporativas en gramos.

Para poder estimar las emisiones vehiculares se realizan diferentes tipos de cálculos, utilizando el balance de masas de combustible (CO_2, SO_2 y plomo) o, usando factores de emisión los cuales se obtienen con la ayuda de ensayos experimentales. Adicionalmente, Osses (2003) afirma que la determinación del factor de emisión, se da gracias a diferentes modelos que reflejan las características de la zona de análisis, para lo cual tiene en cuenta algunas variables descritas por diferentes autores, cómo las características de conducción, motor y combustible (Tong 2000); velocidad a la cual opera el vehículo (André 1999, Samaras 1999); tecnología del vehículo para el control de emisiones (Sams 1999); temperatura, distancia y altitud a la cual está operando el vehículo (Lenz 1999, ACEA 1998); la pendiente longitudinal de la carretera (Fresard 2001); entre otros.

3.5.3 Controles para motores

Con el ánimo de regular y al mismo tiempo contrarrestar las emisiones producidas por los vehículos que operan en carretera, se han creado diferentes tipos de legislaciones, las cuales han obligado a los fabricantes de vehículos a evolucionar constantemente en motores más amigables con el medio ambiente y sistemas de mayor control de emisiones.

A nivel mundial existen dos grandes normativas que buscan controlar las emisiones producidas por los vehículos; dichas normativas son la EURO, la cual fue desarrollada en la Unión Europea, y EPA desarrollada en Estados Unidos. Muchos países se basan de dichas normativas para crear sus propias leyes referentes a este tema (Flores, Fabela, Blake, Vázquez, & Hernández, 2014).

En 1963, Estados Unidos emitió el Acta de Aire Limpio (CAA en sus siglas en inglés), con la cual se buscaron estándares de control de la calidad del aire. De esta forma la Agencia de Protección Ambiental (EPA) desarrolló su normativa. Con el pasar de los años, la normativa EPA ha estado en constante cambio, buscando restringir los límites permisibles de emisiones según el tipo de vehículo (Flores et al., 2014).

Desde los años 70s en Europa, se han comenzado a realizar una serie de legislaciones, las cuales tiene por objetivo reducir los niveles de contaminación de los vehículos; gracias a esto los vehículos modernos tienen niveles de emisiones regulados para contaminantes como el CO, NO_X, THC. En muchos casos existe una clasificación según la tecnología usada por los vehículos de carretera, la cual en otras palabras es acorde a la legislación de emisiones con la cual cumplen; dicha clasificación también tiene en cuenta el tipo de vehículo (European Environment Agency, 2018a).

Existen legislaciones para los diferentes tipos de vehículos, es decir, si se trata de una motocicleta, automóvil, camión, entre otros; y para los diferentes tipos de combustible por ejemplo la gasolina y el ACPM. A medida que las legislaciones han sido más estrictas con el transcurrir del tiempo, sus nombres han tenido una pequeña variación, la cual en muchos de los casos simplemente consiste en un número mayor, por ejemplo, en el caso de buses y camiones EURO I, EURO II, etc. (European Environment Agency, 2018a).

3.6 Modelos para estimar emisiones

Las emisiones del transporte de carga por carretera se dan debido a la combustión como la gasolina, el ACPM, el gas licuado de petróleo (LPG) y el gas natural en los motores de combustión interna; es decir son principalmente emisiones de escape. Sin embargo, el transporte de carga también produce otro tipo de emisiones por diferentes aspectos, como el desgaste de llantas, frenos, pavimento, entre otras (European Environment Agency, 2018a).

Ante la importancia que cada día toman las emisiones a nivel mundial, las cuales pueden ser producidas tanto por fuentes móviles cómo fijas, el poder tener modelos que puedan estimar la producción de éstas, se ha tornado un beneficio con el cual se ha logrado establecer cuantitativamente las emisiones, de esta manera poder buscar posibles soluciones a las mismas y encontrar la afectación que éstas están realizando. Diferentes organizaciones han desarrollado modelos capaces de estimar la producción de emisiones, como se presenta a continuación.

3.6.1 MOtor Vehicle Emission Simulator (MOVES) – United States Environmental Protection Agency (EPA)

La agencia EPA desarrolló un modelo capaz de estimar emisiones (factor de emisión o inventario de emisiones) de diferentes fuentes como vehículos livianos, camiones y fuentes móviles que no son de carretera las cuales causan efectos de gases invernadero y contaminantes de aire. Para su modelado, se debe especificar el tipo de vehículo, periodo de tiempo (por cuánto tiempo se van a calcular las emisiones), zonas geográficas, los contaminantes, características de operación del vehículo y tipo de carretera. El modelo busca entonces reflejar el proceso operativo del vehículo durante su encendido, en movimiento y detención; proporcionando una estimación del total de emisiones o una tasa de emisiones por vehículo.

Por defecto, MOVES posee bases de datos para resumir la información más relevante de las emisiones de Estados Unidos, con el fin de dar soporte a los Planes de Implementación Estatal (SIPs por sus siglas en inglés)

En cuanto a los resultados referentes a las emisiones que entrega el modelo, se definen según el periodo del tiempo en el cual se quiere los resultados la zona geográfica y si se quiere las emisiones por tipo de combustible, proceso o tipo de vehículo (United States Environmental Protection Agency, 2015).

3.6.2 National Mobile Inventory Model (NMIM) – EPA

NMIM es un software desarrollado por la EPA, con el cual se pueden estimar un inventario de emisiones presentes y futuras para vehículos motorizados y equipos que no son de carretera. Para poder realizar el cálculo de emisiones, NMIM usa los modelos MOBILE6 y NONROAD (MOBILE Highway Vehicle Emission Factor Model y NONROAD Nonroad Engines, Equipment, and Vehicles). Sin embargo, el MOBILE6 se ha reemplazado por MOVES como el modelo oficial de la EPA para estimar emisiones de vehículos; motivo por el cual NMIM no puede ser usado para el modelado oficial de emisiones.

Este software combina años y meses, regiones de Estados Unidos, algunos contaminantes, categorías vehiculares y equipos no viales; para luego combinarlos con los modelos MOBILE6 y NONROAD con el fin de crear un inventario de emisiones. Una vez se genera la base de datos, NMIM puede realizar algunos procesos adicionales, como la adición de meses, tipos de carreteras, tipos de vehículos y equipos.

Para el cálculo de las emisiones, el modelo MOBILE6 usado en NMIM utiliza 4 tipos de vías (autopistas, arterias, rampas y locales), 18 tipos de vehículos según configuración norteamericana, calculando el material particulado $PM_{2.5}$ y $PM_{10,}$ hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_X) y monóxido de carbono (CO), teniendo en cuenta los cambios en los estándares de emisiones para vehículos, cambios en la actividad y población vehicular, variaciones locales de temperatura, humedad y calidad del combustible. Por otra parte, NONROAD estima el consumo mensual del combustible y la emisión de hidrocarburos totales (THC), monóxido de carbono (CO), óxidos nitrógeno (NO_X), dióxido de azufre (SO_2) y material particulado (PM) (US Environmental Protection Agency, 2005).

Sin embargo, es de mencionar que MOBILE no es recomendado para ningún tipo de análisis oficial, puesto que no trabaja con estándares de emisiones vehiculares o de combustibles posterior al 2004; adicionalmente no se le ha adicionado las nuevas emisiones y datos actuales como se ha realizado con MOVES el cual es el modelo oficial de la EPA.

3.6.3 COPERT – European Environment Agency (EEA)

COPERT es un software que calcula las emisiones y el consumo de energía que se da en los vehículos para determinada región o país, según los estándares de la Unión Europea, para esto, usa el número de vehículos, la distancia recorrida, la velocidad y otras variables como la temperatura del medio ambiente. Adicionalmente, tiene en cuenta los principales contaminantes de gases de efecto invernadero, contaminantes del aire y especies tóxicas (EMISIA S.A, 2016). Es usado por muchos países europeos con el fin de reportar datos oficiales de emisiones; también es muy usado en investigaciones en Europa a nivel nacional, regional o local, para el cálculo de contaminantes regulados y no regulados; así como el consumo energético (EMISIA S.A, 2018).

Entre las emisiones calculadas por COPERT, se encuentran las de contaminantes regulados como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_X), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y material particulado (PM). Otros contaminantes no regulados como óxido nitroso (N_2O), Amoniaco (NH_3), dióxido de azufre (SO_2) y Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (NMVOC), además del consumo energético (EMISIA S.A, 2016).

3.6.4 EMission FACtors (EMFAC) – California Air Resources Board (CARB)

La Junta de Recursos del Aire de California CARB por sus siglas en inglés, desarrolló el modelo EMission Factor (EMFAC) con el fin de poder calcular el inventario de emisiones a nivel estatal o regional, al multiplicar la tasa de emisiones por los vehículos que operan en las carreteras de California. El modelo ayuda a entender como viajan actualmente los vehículos y cuanto contaminan. Además, puede ser usado para mostrar como los motores de los vehículos de California han cambiado a lo largo del tiempo, y cómo es posible que cambien a futuro.

Con ayuda del modelo se evalúan posibles programas de acción y se puede determinar los más eficientes, con los cuales se proteja mejor el medio ambiente. Por otra parte, es posible evaluar los beneficios que se han tenido de anteriores reglamentaciones propuestas. Como por ejemplo aquellos programas que se han adoptado para regular la flota vehicular diésel. El modelo, puede ser usado para estimar las toneladas de emisiones totales por día, además de los gramos de emisiones por unidad de tiempo, región, vehículo o contaminante en específico.

El factor de emisión y el inventario de emisiones se calcula para contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_X), hidrocarburos (HC), dióxido de carbono (CO_2), material particulado (PM) y óxido de azufre (SO_X), y también estima el consumo de combustible. Las emisiones que emanan de los vehículos constantemente en el día (especialmente los HC) y su magnitud varía según la actividad que esté realizando el vehículo, por ejemplo, en su encendido, mientras está circulando por una carretera, durante el proceso de cargue o descargue, si se encuentra detenido en un semáforo, durante el frenado, entre otros. Para lo cual el modelo cuenta con diferente procesos de emisiones (California Air Resources Board, 2014).

3.6.5 Comprehensive Modal Emission Model (CMEM) – Universidad de California

Puesto que los modelos que usaba el estado y agencias federales cómo la Environmental Protection Agency (MOBILE) y California Air Resources Board (EMFAC) eran usualmente inadecuados, para el análisis del impacto de las emisiones de diferentes medidas de control vehicular (M Barth, An, Norbeck, & Ross, 1996), a finales de los 90’s, y bajo el programa National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), se desarrolla el modelo CMEM, con el cual era posible modelar microscópicamente las emisiones, es decir segundo a segundo (M Barth, Scora, & Younglove, 2004), lo cual es necesario para evaluar los beneficios de proyectos específicos, por ejemplo, los carriles para vehículos con viajes

compartidos conocidos como carriles HOV (high occupancy vehicle) (Boriboonsomsin & Barth, 2008) u otro tipo de proyectos específicos como los peajes electrónicos.

Al comienzo CMEM estaba enfocado a vehículos livianos y pequeños camiones. Sin embargo, a lo largo del tiempo y bajo la necesidad de estimar emisiones en otro tipo de vehículos, se han desarrollado diferentes submodelos, para medir los contaminantes de vehículos diésel para trabajos pesados es decir para camiones medianos y grandes. Las emisiones con las que trabaja el modelo son emisiones de escape y de consumo de combustible, para esto usa datos como la velocidad del motor, demanda de potencia, entre otras (M Barth et al., 2004).

El objetivo principal del modelo es predecir las emisiones del tubo de escape que se dan en diferentes estados del vehículo, es decir, cuando éste se encuentra en estado de inactividad, crucero, aceleración y desaceleración. Algunos de dichos estados pueden durar pocos segundos. Dentro de las emisiones que estima el modelo se encuentran el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_X), multiplicadores de emisiones del motor de arranque en frío (Mattehew Barth et al., 2000). Sin embargo, no calcula otro tipo de emisiones como material particulado (PM), lo cual lo pone en desventaja ante otro tipo de modelos.

3.6.6 International Vehicle Emissions Model (IVE) - Universidad de California Riverside

IVE es un modelo financiado por EPA, y desarrollado en conjunto por el Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental (CE-CERT) de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de California en Riverside (UCR), Investigación de Sistemas Sustentables Globales (GSSR) y el Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales (ISSRC). Dicho modelo está diseñado para ser usado por países en vía de desarrollo, con el fin de poder analizar las emisiones de fuentes móviles y de esta manera buscar estrategias para el control y planificación del transporte. Dichas estrategias pueden ser modeladas para predecir su comportamiento, o en caso de su implementación pueden ser analizadas qué tan efectivas fueron en el tiempo (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

El modelo ha sido usado en diferentes regiones y países del mundo, tales como África (Nairobi), Asia (China, India y Kazajistán), Europa (Turquía), Norteamérica (Estados Unidos y México) y Suramérica (Argentina, Brasil, Colombia, Chile, Perú); buscando predecir contaminantes atmosféricos locales, gases tóxicos y de efecto invernadero entre los cuales se encuentran monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC), emisiones evaporativas de los compuestos orgánicos Volátiles (VOC evap), óxidos de nitrógeno (NO_X), óxidos de azufre (SO_X), material particulado menor a 10 micrones (PM_{10}), plomo, 1.3-butadieno, acetaldehído, formaldehído, amonio (NH_3), benceno, dióxido

carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (N_20) y metano (CH_4) (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

3.6.7 Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP)- Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo

LEAP es un software desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, Suecia, con el cual se analizan políticas energéticas y se evalúan estrategias para atenuar el cambio climático; el cual puede ser usado a diferentes escalas de aplicación como ciudades, estados y paises. Por sus bondades, algunos países han usado LEAP para entregar reportes a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) (Heaps, 2016).

El software es una herramienta que integra escenarios, con la cual se estudia el sector energético y no energético para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero, y analizar emisiones contaminantes de aire local y regional. Con LEAP se pueden crear diferentes modelos a mediano y largo plazo (en su mayoría anual), los cuales requieren sus propias estructuras de datos, puesto que tiene metodologías especializadas para diferentes sectores como el transporte (Heaps, 2016).

3.6.8 MODelo de EMisiones vehicular (MODEM) – Universidad de Chile

MODEM es una metodología y un software, el cual tiene como objetivo el cálculo de emisiones contaminantes producidas por vehículos en áreas urbanas. Para esto utiliza información de los modelos estratégicos de transporte y factores másicos de emisión. MODEM puede trabajar con un total de 61 tipos de vehículos, entre los cuales se encuentran 17 tipos de camiones (Osses Alvarado, 2003).

Teniendo en cuenta las emisiones en caliente, en partida en frío (proceso de calentamiento) y evaporativas, los resultados de emisiones que se pueden obtener con el uso de esta herramienta, son monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_X), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (N_20), amonio (NH_3), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y Material Particulado Respirable (MP_{10}) (Osses Alvarado, 2003).

Para realizar el cálculo de emisiones, MODEM recoge la información vial generada por modelos de transporte, por ejemplo, ESTRAUS el cual maneja variables de origen y destino, flujos vehiculares y tiempos totales de recorrido. De esta forma, se encarga de adaptar y complementar dicha información logrando desagregarla espacial y temporalmente, lo cual es fundamental para la estimación de emisiones (Osses Alvarado, 2003).

3.6.9 Passenger car and Heavy-duty vehicle Emission Model (PHEM) - TU Graz

PHEM es un modelo desarrollado en 1999 por la Universidad Tecnologica de Graz en Austria. El modelo calcula el consumo de combustible y las emisiones de vehículos terrestres basándose en pruebas dinámicas y mapas de emisiones de diferentes vehículos. PHEM simula la potencia necesaria del motor para superar resistencias y pérdidas durante el ciclo normal de manejo (Hauseberger & Matzer, 2017).

El modelo calcula la potencia del motor en un curso de 1 hercio (Hz), basado en el ciclo de manejo y la pendiente de la carretera, las resistencias a la conducción y las pérdidas del sistema de transmisión. Las emisiones que entrega el modelo son monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_X), masa de partículas (PM) y número de partículas (PN) (Hausberger, Rexeis, Zallinger, & Luz, 2009).

3.6.10 The Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA) - Agencias de Protección Ambiental de Alemania, Suiza y Austria

El HBEFA es un modelo que fue desarrollado por las Agencias de Protección Ambiental de Alemania, Suiza y Austria (primera versión en 1995). Posteriormente, otros países como Suecia, Noruega y Francia, junto al Centro de Investigación de la Comisión Europea se han unido para contribuir en el desarrollo del modelo (en 2017 se lanzó la versión 3.3) (INFRAS, 2017).

El modelo trabaja con emisiones en caliente, en frío y evaporativas para diferentes categorías vehiculares donde es posible obtener las emisiones para diferentes periodos de año. Los contaminantes que mide HBEFA son CO, HC, NO_X, PM; dentro de los componentes de HC que calcula se tienen el CH_4, hidrocarburos no metálicos (NMHC), benceno, tolueno, xilen; adicionalmente el consumo de combustible, para el cálculo de CO_2, NH_3, N_2O, NO_2, números de partículas (PN) y PM. Adicionalmente, el modelo trabaja con pendientes en la carretera de 0%, 2%, 4% y 6% (Keller, Wüthrich, & Notter, 2017).

3.6.11 Highway Development and Management (HDM-4) - Banco Mundial

HDM-4, es una herramienta con la cual se puede analizar, planificar, gestionar y evaluar el mantenimiento o mejora de una carretera. Dicho software fue desarrollado por el Banco Mundial y posteriormente le fueron confiados los derechos a la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) (World Road Association, 2018).

Para el HDM-4, se creó el submodelo Efectos Ambientales, el cual se enfoca en las emisiones vehiculares. De esta forma, el submodelo da a conocer la cantidad de emisiones que se generan en una red (o en un segmento de la red) anualmente y por vehículo, producto

de la operación del transporte en carreteras. Con lo cual se puede entonces incluir una variable ambiental para el transporte de mercancía (Torras-Ortiz, Telléz-Gutiérrez, & Mendoza-Sánchez, 2005).

El submodelo para la estimación de las emisiones predice las emisiones de los vehículos en función del combustible y la velocidad utilizada; de esta forma las características de las carreteras juegan un papel muy importante, pues de acuerdo con éstas se puede alcanzar mayores o menores velocidades (Torras-Ortiz et al., 2005), lo que puede afectar las emisiones producidas.

HDM-4 estima 7 tipos de emisiones dentro de las cuales 6 son estimadas en función del consumo de combustible y 1 como ecuación de equilibrio de carbono. Las emisiones que se pueden estimar son: Hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) óxidos de nitrógeno (NO_X), material particulado (PM), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), plomo (Pd) (Bennett & Greenwood, 2004). Se considera que estas siete emisiones hacen parte de las externalidades negativas del transporte puesto que son las más dañinas para el entorno natural, y la salud humana (Narwal, 2016).

3.7 Ventajas y desventajas de los modelos para estimar emisiones

Los diferentes modelos que se han descrito en el numeral 3.6 para el cálculo de emisiones, tienen ventajas y desventajas. Por lo cual es incorrecto pensar que existe un modelo capaz de realizar todas las acciones que se requieren para cualquier tipo de proyecto, es decir, un modelo que se pueda utilizar independientemente del análisis o proyecto a evaluar. Los pros y contras de cada modelo van de acuerdo con la necesidad. Por ejemplo, si se quiere evaluar las emisiones en una carretera de un país latinoamericano, el tener un modelo desarrollado específicamente para un país desarrollado pudiera ser una desventaja, debido a que éste pudiera no estar calibrado para las condiciones del país en el cual se requiere usar. Teniendo en cuenta lo anterior, la Tabla 10 muestra un comparativo de las ventajas y desventajas de usar cada modelo para el análisis de las emisiones del transporte interurbano de carga en camiones.

Tabla 10. Ventajas y desventajas de los modelos para el transporte interurbano de carga

Modelo o Software	Ventajas	Desventajas
MOVES	Puede crear factores de emisión o inventario de emisiones avalados por el gobierno de Estado Unidos.	Es básicamente diseñado para modelar situaciones en Estados Unidos.
NMIM	Crea un inventario de emisiones presentes y futuras para lo cual utiliza la combinación de 2 modelos (MOBILE6 y NONROAD).	Usa el modelo MOBILE6 el cual no es apropiado para un análisis regulatorio, no es apto para estándares de emisiones posteriores a 2004.

Modelo o Software	Ventajas	Desventajas
COPERT	Por su confiabilidad, muchos países europeos lo utilizan para reportar datos oficiales de emisiones.	Está diseñado para determinadas regiones o países (europeos). Sus patrones de conducción son europeos.
EMFAC	Ayuda a entender cómo viajan los vehículos y cuánto contaminan, además de mostrar la evolución de los motores a lo largo del tiempo.	Está diseñado para calcular emisiones según vías y regiones de California en Estados Unidos.
CMEM	Evalúa emisiones segundo a segundo y es adecuado para el análisis del impacto de las emisiones de diferentes medidas de control vehicular.	No calcula muchas emisiones importantes como el PM, NO_2, SO_2, CO_2, COV, entre otras
IVE	Puede ser usado por países en vía de desarrollo, también puede corregir factores de emisión por el patrón de conducción. Considera características tecnológicas y estándares de emisión norteamericanos y europeos.	No calcula factores de emisión, el inventario de emisiones que calcula solo lo hace con vehículos en circulación.
LEAP	Integra diferentes escenarios del sector energético.	No está diseñado específicamente para el sector transporte.
MODEM	Se basa en el uso de modelos de redes de transporte, con lo cual representa la operación urbana, teniendo en cuenta calles e interceptaciones.	No está diseñado para el cálculo de emisiones en zonas rurales
PHEM	La velocidad del motor con la que trabaja el modelo tiene en cuenta algunas características geométricas de la carretera, por ejemplo, la pendiente.	Los factores de emisión que calcula son base y deben ser complementado por otro tipo de modelos como el HBEFA.
HBEFA	Trabaja con emisiones en caliente, frío y de vapor. Ha tenido buena acogida en países europeos	Es un modelo que está calibrado para condiciones europeas.
HDM-4	Tiene en cuenta las características geométricas de la vía. Siendo aplicable en vías rurales tanto para países desarrollados como en vía de desarrollo.	Para el cálculo de emisiones es una herramienta que apenas está ganándose un lugar en el mercado mundial

Nota: Elaboración propia

Los modelos más aptos para el caso de estudio son el IVE, HBEFA y el HDM-4. Sin embargo, el modelo con el cual se puede asignar de una forma más eficiente, características de la carretera es el HDM-4. El poder contar con este tipo de características viales, es de vital importancia puesto que rasgos del terreno colombiano, como la topografía, pueden tener mucha afectación en las emisiones estimadas para los vehículos.

3.8 Software para el análisis de emisiones (HDM-4)

Tal como se menciona en el numeral 3.6.11, el HDM-4, es una herramienta con la cual se puede analizar, planificar, gestionar y evaluar el mantenimiento o mejora de una carretera. Adicionalmente, calcula las emisiones de los vehículos que transitan sobre las carreteras, teniendo en cuenta características de la carretera y del vehículo.

3.8.1 Historia del HDM-4

En 1968, el Banco Mundial, el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) y el Laboratoire Central des Ponts et Chaussés (LCPC) realizaron un estudio de diseño de

carreteras, en dicho estudio se decidió crear un modelo capaz de evaluar proyectos de carretera. Para la creación del modelo, el Banco Mundial se apoya en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), el cual entre 1971 y 1972 entrega el Highway Cost Model (HCM). Dicho modelo mejoró lo existente hasta esa fecha, relacionado a los costos de obra y operación vehicular en proyectos de carretera (Kerali, Odoki, & Stannard, 2006; Posada Henao, 2003, 2006).

Para mediados de 1977, y luego que el Banco Mundial y el TRRL realizaran estudios sobre el deterioro de las carreteras y las variables representativas que afectan los costos de operación vehicular en Kenia. El TRRL crea la primera versión del Modelo de Inversión en Transporte por Carretera (RTIM). Casi a la par que el TRRL desarrollaba el RTIM, el Banco Mundial en el MIT, realizaba la primera versión del Modelo de Estándares de Diseño y Conservación de Carreteras conocido en sus siglas en inglés como el HDM, el cual fue entregado hasta 1979. Posteriormente, se realizaron otros estudios alrededor del mundo, lo cual permitió mejoras no solo en el modelo HDM, sino también en el RTIM, Como resultado, se obtuvieron el RTIM2 y el HDM-III, siendo el último más completo, de ambos modelos se creó una versión para microcomputadores (Kerali et al., 2006; Posada Henao, 2003, 2006). El Banco Mundial ha realizado diferentes estudios para la estimación de costos operacionales y velocidades (Archondo-Callao & Faiz, 1994; Paterson, 1990; Watanatada, Dhareshwar, & Rezende-Lima, 1987)

Durante los años siguientes, se siguió trabajando en mejoras de ambos modelos, en 1993 se lanza el RTIM3 y en 1994 el HDM-Q el cual incorpora efectos de congestión del tráfico, y el HDM Manager que incorpora una versión de interfaz de usuario (Posada Henao, 2003, 2006). Desde 1998, y con el fin de mejorar el alcance del Modelo de Estándares de Diseño y Conservación de Carreteras (HDM-III), La Asociación Mundial de Carreteras (AIPCP) administra el Proyecto Internacional de Herramientas de Desarrollo y Gestión de Carreteras (ISOHDM). A comienzos del año 2000 y gracias a actividades promovidas por el Banco Mundial, se lanzó la primera versión del software HDM-4, proporcionando un muy buen sistema de análisis de alternativas de proyectos de carreteras. Durante los años siguientes, se desarrollaron mejoras a la primera versión (1.0-1.3). Para el año 2002 se inicia el desarrollo de la segunda versión la cual se presentó al público en agosto de 2005 (Kerali et al., 2006).

HDM ha sido utilizado en más de 100 países tanto en vía de desarrollo, como industrializados; con el fin de justificar y verificar viabilidad económica en proyectos de carretera, ofreciendo gran número de aplicaciones tales como efectos de congestión vial, efectos de climas fríos, seguridad vial, efectos ambientales, entre otros (Kerali et al., 2006; Posada Henao, 2003, 2006).

3.8.2 Análisis con HDM-4 y aplicaciones

El análisis con el cual trabaja el HDM-4, se realiza según el ciclo de vida del pavimento, el cual tiene una duración aproximada de 15 a 40 años; para esto, predice deterioro de la carretera, efectos de los trabajos, sobre los usuarios de la carretera, socioeconómicos y ambientales. Dentro de los efectos ambientales, se tienen en cuenta las emisiones vehiculares, y el consumo de energía y el ruido generado por el tránsito. Además, con ayuda del software, se pueden incorporar análisis económicos para cuantificar monetariamente los efectos ambientales y sociales, siempre y cuando se haga de una forma exógena, es decir que se genera de forma externa (Kerali et al., 2006)

La herramienta es aplicable en vías tipo autopistas, principales o troncales, rurales, caminos pavimentados o sin pavimentar, entre otros. Cuando se dice que HDM-4 es una herramienta para análisis de proyectos, Kerali (2006) se refiere a:

> *"Evaluar uno o más proyectos de carretera u opciones de inversión. La aplicación analiza una ruta o tramo de carretera con los tratamientos que indique el usuario, contemplando los costos y beneficios relacionados, con proyecciones anuales durante el periodo del análisis. Se determinan los indicadores económicos para las distintas opciones de inversión".*

Adicionalmente, se puede realizar un análisis multicriterio (MCA, multi-criteria analysis), con el cual se puede extraer un problema en distintas partes, de esta forma, es posible la comprensión del mismo. La Tabla 11 presenta los criterios con los cuales se puede realizar un análisis multicriterio en HDM-4, entre los cuales se encuentra el medio ambiente, el cual tiene por objetivo la reducción de la contaminación del aire.

Tabla 11. Criterios para análisis multicriterio con HDM-4

Categoría	Criterios/Objetivos	Atributos
Economía	Minimizar los costos de usuario (RUC)	El total de los costos de usuario se calcula dentro de HDM-4 para cada alternativa
	Maximizar el valor presente neto (VPN)	El beneficio económico neto para la sociedad se calcula dentro de HDM-4 para cada alternativa
Seguridad	Reducir accidentes	Calcula internamente si el número de accidentes aumenta o disminuye y esto lo lleva a costos
Nivel de servicio funcionalidad	Proporcionar comodidad	Brindar a los usuarios una buena calidad de la rodadura. Se define con base en el IRI (índice de regularidad internacional) promedio. El IRI promedio se calcula dentro de HDM-4
	Reducir el congestionamiento vial	Efectos de retrasos y congestionamientos El nivel de congestionamiento se define a partir de la relación volumen-capacidad (VCR). Los valores de la VCR se calculan dentro de HDM-4
Medio ambiente	Reducir la contaminación del aire	La contaminación del aire se mide en términos de las cantidades de contaminantes emitidos por los vehículos, las cuales se calculan dentro de HDM-4

Categoría	Criterios/Objetivos	Atributos
Energía	Maximizar la eficiencia energética	La eficiencia en el uso global y nacional de energía dentro del sector de transporte por carretera. El consumo de energía se calcula dentro de HDM-4
Aspectos sociales	Maximizar los beneficios sociales	Los beneficios sociales incluyen mejor acceso a los servicios (por ejemplo, escuelas, centros de salud, mercados, etc.). Los usuarios definen de manera externa un valor representativo para cada alternativa
Política	Considerar asuntos políticos	Igualdad para ofrecer acceso a las carreteras, fomento de la estabilidad política, importancia estratégica de las carreteras, etc. Los usuarios definen de manera externa un valor representativo para cada alternativa

Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume One: Overview", Kerali et al. (2006, p. 23)

El volumen 2 del manual del HDM-4 (2006), afirma que el software ofrece diferentes tipos de aplicaciones, entre las cuales están:

- Evaluación económica de los proyectos viales
- Programación de trabajos periódicos como es el caso de los mantenimientos
- Planificación a largo plazo de los proyectos
- Estudios para la investigación o la política

3.8.3 Flota vehicular

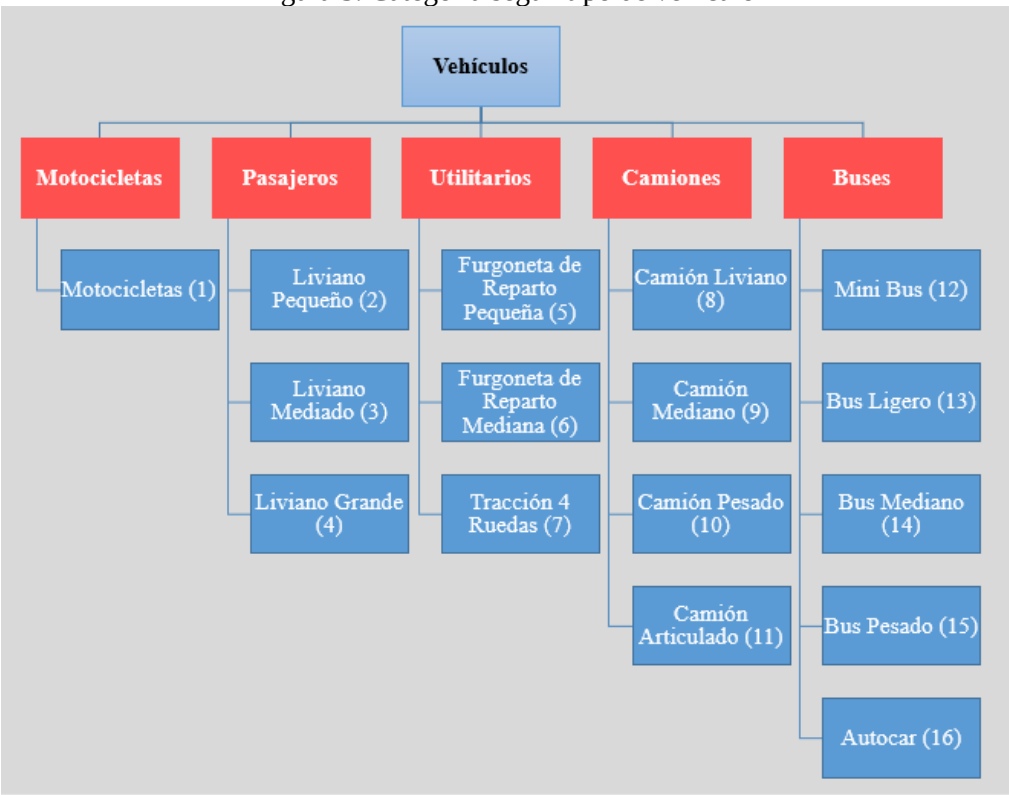
El HDM-4 utiliza una flota vehicular (ver Tabla 12) con la cual se realiza el análisis en el software, dicha flota se puede agrupar en 5 grandes grupos tal como se muestra en la Figura 5. Dicha flota utiliza diferentes tipos de vehículos motorizados, tales como: motocicletas, automóviles, vehículos para pasajeros, utilitarios, camiones y buses; cada uno de estos vehículos dividido en diferentes categorías. Adicionalmente, tiene en cuenta categorías no motorizadas como el peatón, bicicleta o la tracción animal y humana. Es muy importante que el usuario defina la(s) categoría(s) con la cual(es) va a trabajar en el HDM-4. Es de mencionar que el software permite que se cree una flota vehicular desde cero o basada en alguna de las cuales trae el programa por defecto (Stannard, Wightman, & Dakin, 2006). Para el caso de estudio del transporte de carga interurbano por carretera en Colombia, y basado en los vehículos más usados para realizar dicha operación, se deberá trabajar con camiones medianos, pesados y articulados, los cuales se deberán modificar para ser lo más parecido posible a los camiones usados en el país. Lo anterior teniendo en cuenta la información de flota vehicular usada por el SICE-TAC (ver numeral 5.2).

Tabla 12. Flota vehicular usada por HDM-4

# Vehículo	Tipo de vehículo	Descripción	Abreviatura	Tipo combustible	# Ejes	# Ruedas	Coef. Resistencia aerodinámica	Área frontal definida (m2)	Tara (T)	Carga (T)
1	Motocicleta	Motocicleta o scooter	MC	P	2	2	0.70	0.8	0.1	0.2
2	Liviano pequeño	Coche pequeño de pasajeros	PC-S	P	2	4	0.40	1.8	0.8	1.0
3	Liviano mediano	Coche mediano de pasajeros	PC-M	P	2	4	0.42	1.9	1.0	1.2
4	Liviano grande	Coche grande de pasajeros	PC-L	P	2	4	0.45	2.0	1.2	1.4
5	Furgoneta de reparto pequeña	Furgoneta o pick-up	LDV	P	2	4	0.50	2.0	1.3	1.5
6	Furgoneta de reparto mediana	Camión muy ligero para reparto de articulo (4 ruedas)	LGV	P	2	4	0.50	2.8	0.9	1.5
7	Tracción 4 ruedas	Vehiculo tipo Land Rover/Jeep	4WD	P	2	4	0.50	2.8	1.5	1.8
8	Camión liviano	Camión pequeño de 2 ejes rigidos (aprox. < 3.5 T)	LT	D	2	4	0.55	4.0	1.8	2.0
9	Camión mediano	Camión mediano de 2 ejes rigidos (aprox. > 3.5 T)	MT	D	2	6	0.60	5.0	4.5	7.5
10	Camión pesado	Camión rigido de varios ejes (>2)	HT	D	3	10	0.70	8.5	9.0	13.0
11	Camión articulado	Camión articulado o con trailer	AT	D	5	18	0.80	9.0	11.0	28.0
12	Mini bus	Autobús/furgoneta pequeña (usualmente 4 ruedas)	MNB	P	2	4	0.50	2.9	1.1	1.5
13	Bus ligero	Autobús ligero (aprox. < 3.5 T)	LB	D	2	4	0.50	4.0	1.75	2.5
14	Bus mediano	Autobús mediano (3.5 - 8.0 T)	MB	D	2	6	0.55	5.0	4.5	6.0
15	Bus pesado	Varios ejes o dos ejes grandes	HB	D	3	10	0.65	6.5	8.0	10.0
16	Autocar	Autobús grande para trayectos de larga distancia	COACH	D	3	10	0.65	6.5	10.0	15.0

Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume four: Analytical Framework and Model Descriptions", Odoki & Kerali, (2006)

Figura 5. Categoría según tipo de vehículo



Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume four: Analytical Framework and Model Descriptions", Odoki & Kerali, (2006)

3.8.4 Redes de carretera

El HDM-4 almacena datos específicos de una red de carreteras, es decir se puede almacenar los datos de una ruta desde un origen hasta un destino e incluso varios orígenes y destinos. Cada una de estas rutas estará formada por tramos los cuales tienen unas características similares (representativos en el trayecto), esto ayudará en el proceso de análisis. Dichos tramos son lo que se conoce como tramos homogéneos en los cuales se tiene, entre otros, una geometría, capacidad y tránsito uniformes durante la longitud del tramo (Stannard et al., 2006).

Los tramos entonces estarán definidos por estructura del pavimento, geometría vial, tipo y clase de carretera. Lo anterior permitirá identificar cuáles longitudes de carretera pueden considerarse homogéneas, con el fin de agruparlas en un tramo único. Según Kerali, McMullen y Odoky (2000), las redes de carretera con las que opera el HDM-4 presentan las siguientes características:

- **Clases de carreteras**
  Lo más usual es tramificar las redes de carretera según las clases de carretera teniendo en cuenta la funcionalidad jerárquica, por defecto HDM-4 opera con primarias o troncal, secundarias o principal y terciarias o local.

- **Tipo de velocidad de flujo**
  Está determinada por la capacidad de la carretera, la velocidad a flujo libre y la velocidad vehicular a capacidad. Esto permite conocer el efecto que tiene el volumen de tráfico en las velocidades. De esta forma es posible identificar las consecuencias económicas que tienen las mejoras en la capacidad de la carretera.

- **Patrón de flujo de tráfico**
  Existe la necesidad de conocer cómo es el comportamiento del volumen vehicular durante un día típico en diferentes horas, buscando la cantidad de horas del año para las cuales son aplicables diferentes rangos de flujos horarios. Es muy importante tener presente que durante las horas de mayor flujo es cuando los retrasos y costos de congestión son mayores.

- **Tipo de intersección**
  Los tipos de intersecciones que existen a lo largo de las carreteras contribuyen en el número de accidentes viales que se presentan y a la severidad de éstos; la intersección se define por medio del nombre y la tasa de accidentalidad. HDM-4 no presenta valores predeterminados de los accidentes en intersecciones, debido a que estos varían mucho según el país. Las intersecciones no se implementan en la versión actual del software.

- **Clima de la zona**

El clima es una variable que afecta el deterioro de la carretera y en algunos casos tienen un impacto en los costos que el usuario tiene en la carretera. Dicha variable se define por medio de humedad y temperatura.

- **Volumen del tráfico**

Para cada tramo, el tránsito promedio diario anual (TPDA) define el nivel de tráfico (bajo, medio o alto).

- **Geometría de la carretera**

Se define principalmente con la ayuda de los alineamientos horizontal y vertical (véase numeral 3.8.5)

- **Características del pavimento**

Para definir las características del pavimento, HDM-4 toma como punto de partida la superficie de rodadura, es decir, si es pavimento rígido o flexible, o, por el contrario, es una carretera destapada (sin pavimentar). Al mismo tiempo que tiene en cuenta la base y la sub-rasante.

- **Condiciones de la carretera**

Las condiciones de la superficie dependen de la calidad del manejo (rugosidad), estrés (condiciones de la superficie de rodadura) y textura (profundidad y resistencia al rodamiento) superficial.

- **Historial del pavimento**

Tiene en cuenta la calidad con la cual fue construido, los años que tiene el pavimento y las condiciones previas del mismo.

- **Bermas y drenajes**

Se definan características de la berma y del drenaje, algunas de estas características son cualitativas.

3.8.5 Clasificación de la carretera según la geometría de la carretera

Las carreteras se pueden definir según sus características geométricas, para lo cual el alineamiento horizontal y vertical juegan un papel muy importante debido a la curvatura que estos presentan (Kerali et al., 2000). Para definir la geometría de una carretera se deben tener en cuenta aspectos como:

- Descripción
- Peralte en las curvas (e%), si no es definido por el usuario, se puede usar la ecuación (2) para carreteras pavimentadas y la ecuación (3) para carreteras sin pavimentar.
- Límite de velocidad (km/h)
- Grado de curvatura horizontal C (°/km), ver ecuación (4)
- Subida más bajadas $S + B$ (m/km), ver ecuación (5)
- Número de subidas y bajadas por kilómetro (n°/km)
- Factor de cumplimiento de la velocidad límite; por defecto se toma como 1.1

- Factores de reducción de la velocidad
  - Para transporte motorizado: 1 = sin reducción; 0.4 = reducción significativa.
  - Factor de fricción: 1 = sin fricción; 0.6 = fricción longitudinal representativa.

$$e = 0.012 * C \tag{2}$$

$$e = 0.017 * C \tag{3}$$

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{L_{AB}} \tag{4}$$

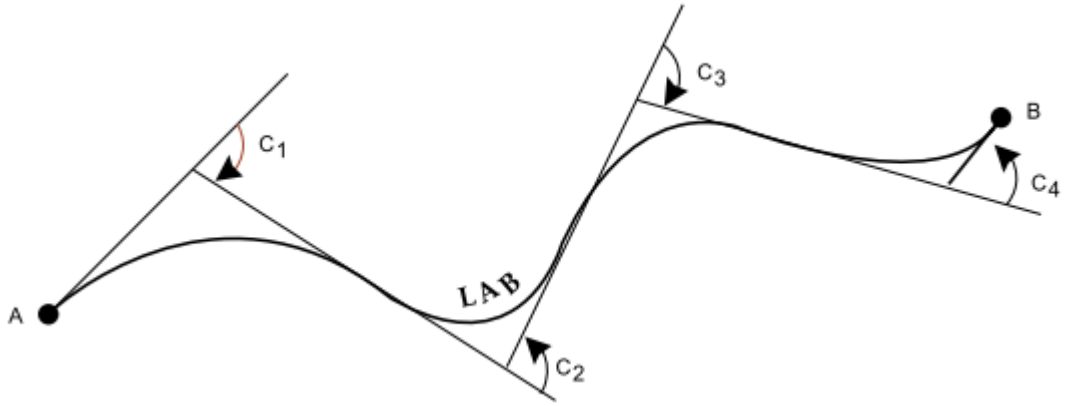
$$S + B = \frac{R_1 + F_1 + R_2 + F_2 + R_3}{L_{AB}} \tag{5}$$

$$e = \frac{100\ x}{y} \tag{6}$$

En donde:

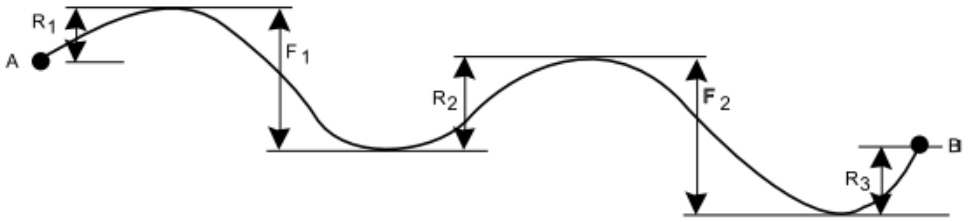
C	Curvatura media del tramo ver Figura 6
$S + B$	Subidas más bajadas (m/km) ver Figura 7
L_{AB}	Longitud de la sección vial (km)
e	Peralte (%), ver Figura 8

Figura 6. Alineamiento horizontal del tramo



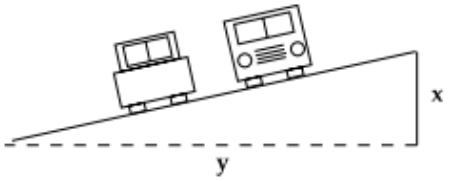
Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume Two: Applications Guide", Kerali et al. (2000)

Figura 7. Alineamiento vertical del tramo



Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume Two: Applications Guide", Kerali et al. (2000)

Figura 8. Peralte



Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume Two: Applications Guide", Kerali et al. (2000)

Por defecto el software HDM-4 tiene una clasificación de las carreteras según las características geométricas (Tabla 13). Sin embargo, esta clasificación también puede ser definida por el usuario (Kerali et al., 2000). Dicha clasificación se da teniendo en cuenta las subidas más bajadas, el número de subidas más bajadas por kilómetro, el grado de curvatura horizontal del tramo, el peralte y la velocidad límite.

Tabla 13. Tipos de carretera para HDM-4 según geometría

#	Tipo de carretera	S + B (m/km)	S+B (No/km)	C (°/km)	e (%)	Máxima Vel (km/h)
1	Recta y muy plana	1	1	C < 3	2	110
2	Ligeramente sinuosa y ligeramente ondulada	10	2	3 ≤ C < 15	2.5	100
3	Sinuosa y poco ondulada	3	2	15 ≤ C < 50	2.5	100
4	Sinuosa y ligeramente ondulada	15	2	50 ≤ C < 75	3	80
5	Sinuosa y muy ondulada	25	3	75 ≤ C < 150	5	70
6	Muy sinuosa y ligeramente ondulada	20	3	150 ≤ C < 300	5	60
7	Muy sinuosa y muy ondulada	40	4	C ≥ 300	7	50

Nota: Reproducción de "HDM4 - Volume Two: Applications Guide", Kerali et al. (2000)

3.8.6 Velocidad vehicular

El promedio de la velocidad de cada tipo de vehículo, es muy importante para poder obtener otro tipo de datos, entre ellos las emisiones producidas; Odoki y Kerali (2006) afirman que

las velocidades que desarrollan cada uno de los vehículos dependen de diferentes variables, por ejemplo el tipo de vehículo, características de las carreteras, flujos de tráfico, etc.

Para poder tener un punto de partida de las emisiones producidas por los camiones durante el proceso de transporte de mercancías entre ciudades, se puede realizar la suposición que dichos vehículos circulan por los diferentes tipos de carretera a flujo libre, es decir, que se realiza la suposición que las condiciones del tráfico en la carretera, no va a ser motivo de restricciones a la velocidad. El HDM-4 tiene implementado el modelo a flujo libre y con restricciones a la velocidad.

- **Modelo a flujo libre:** El software calcula una velocidad a flujo libre para cada tipo de vehículos, dicha velocidad está basada en mínimos probabilísticos de las limitantes de velocidad los cuales están dados por la potencia de conducción, capacidad de frenado, curva de la carretera, rugosidad de la superficie y la velocidad deseada. Adicionalmente, se debe tener en cuenta si se está analizando la velocidad en ascenso o en descenso de la carretera (Odoki & Kerali, 2006).
- **Restricciones a la velocidad:** La velocidad a la cual circulan los vehículos tiene variables las cuales están directamente relacionadas con la velocidad promedio en un tramo de carretera, entre las restricciones más representativas se tiene según Odoki & Kerali (2006) se encuentra la pendiente longitudinal de la carretera y la potencia del motor, pendiente de la carretera y capacidad de frenado, curvatura de la carretera, rugosidad de la carretera y velocidad deseada.

Dichos valores también pueden ser brindados por el usuario (ver numeral 3.8.4).

3.8.7 Efectos de las carreteras en los usuarios

Cuando se decide analizar un tramo de carretera, éste puede tener algunos efectos sobre los usuarios, lo anterior teniendo en cuenta el tipo de carretera que se tiene y las características propias de la misma. HDM-4 se centra en los efectos que producen las carreteras en la velocidad de los vehículos y los costos operacionales para los transportes motorizados; también para aquellos modos de transporte no motorizados; y finalmente los efectos que las carreteras pueden tener en la accidentalidad vial (Odoki & Kerali, 2006).

Los efectos que las carreteras tienen sobre cada vehículo pueden variar según la tipología y características propias del mismo; como se hace muy complejo analizar uno a uno los vehículos que circulan por la carretera, HDM-4 toma como base vehículos los representativos que se describen en la Tabla 12, dicha tabla los agrupada según atributos físicos (número de ejes, número de llantas, etc.); características como potencia; uso del vehículo y vida útil (Odoki & Kerali, 2006).

Adicional a las características representativas de los vehículos a analizar o que circulan por el tramo estudiado, Odoki (2006) menciona que se deben conocer aspectos como los citados en el numeral 3.8.4

- Geometría de la carretera: Datos de alineamiento, velocidad límite, factores de fricción, longitud del tramo, y ancho y número de carriles.
- Relación de la velocidad de flujo: Capacidad de la carretera y parámetros que determinan la velocidad de operación vehicular, características y niveles del tráfico.
- Patrón de flujo de tráfico: Uso de la vía según la distribución horaria.
- Condiciones de la carretera: Datos de rugosidad y estado del pavimento.
- Tráfico: Volúmenes de tráfico y su composición
- Costos unitarios: Costos del vehículo (variables, fijos y otros costos) y el valor subjetivo del tiempo.

3.8.8 Otros parámetros

El HDM-4 no solo se centra en la velocidad para el cálculo de las variables que afectan los costos de operación de los vehículos, dentro de los modelos, también implementa aspectos sumamente importantes como la congestión, el consumo de combustible el cual también se tiene en cuenta para el cálculo de las emisiones producidas por los vehículos, el consumo de lubricantes, consumo de las llantas, el uso que tiene el vehículo y su vida útil, entre otros (Odoki & Kerali, 2006).

3.9 Estimación de emisiones con HDM-4

El HDM-4 utiliza diferentes modelos, entre los cuales se encuentra los modelos de tipo Social and Environmental Effects (SEE) o modelos de efectos sociales y ambientales. Dichos modelos son importantes pues ayudan a tomar decisiones para futuros proyectos o políticas a implementar con el fin de disminuir la energía usada y las emisiones producidas por el transporte (Odoki & Kerali, 2006).

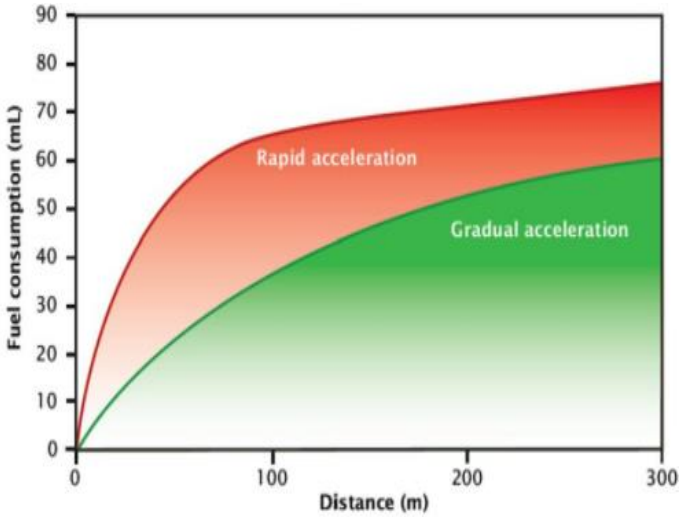
Según Odoki y Kerali (2006), como dijo Hammerstrom en 1995, lo que se pretende al evaluar las emisiones producidas por los vehículos, es poder analizar los efectos que estos tienen. Dichos efectos pueden variar según las características de la carretera por la cual transitan, la congestión vehicular a la cual se ven expuestos, y la tecnología usada por cada uno de los vehículos.

El modelo usado por HDM-4 permite predecir algunas emisiones de escape, producidas por el consumo de combustible o la combustión del vehículo. Dicho consumo puede variar según las características de la carretera, aceleración de cada conductor (ver Figura 9) y la velocidad del vehículo (ver Figura 10). Las técnicas de conducción pueden ayudar a reducir el consumo de combustible, lo que implica una reducción en costos y emisiones las cuales

pueden llegar hasta un 25%. Dentro de las técnicas de manejo recomendadas, se encuentra el acelerado suave, mantener una velocidad constante, anticipar el tráfico, evitar altas velocidades y evitar frenados bruscos (Natural Resources Canada, 2018).

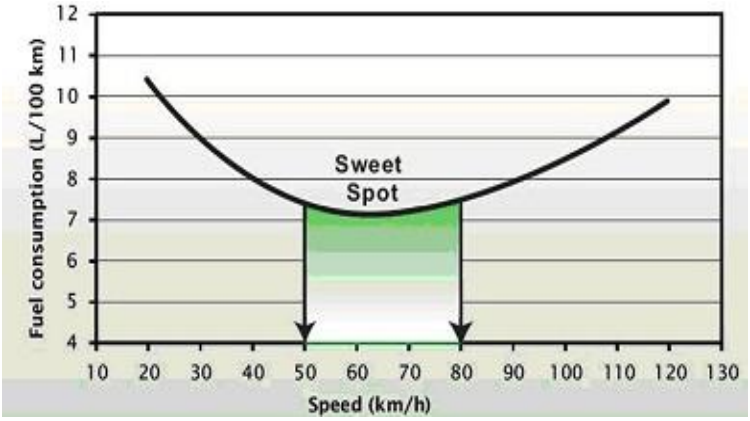
La velocidad de los vehículos junto con los recursos operacionales, principalmente son calculados por HDM-4 por medio de variables asociadas a las características propias de cada tipo de vehículo, características geométricas de las carreteras por las cuales circulan los vehículos, tipo de superficie y condiciones de la vía (Odoki & Kerali, 2006).

Figura 9. Consumo de combustible según aceleración del vehículo



Nota: Reproducción de "Fuel-efficient driving techniques", Natural Resources Canada (2018)

Figura 10. Consumo de combustible según la velocidad del vehículo



Nota: Reproducción de "Fuel-efficient driving techniques", Natural Resources Canada (2018)

Las emisiones que son estimadas por HDM-4 son hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_X), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2),

material particulado (PM) y plomo (Pb). Las emisiones son estimadas en función del consumo de combustible y la velocidad; el consumo de combustible se basa en la velocidad del vehículo, la cual depende de las características de la carretera y del tipo de tecnología usada por el vehículo mismo. Adicionalmente, el dióxido de carbono (CO_2) se estima teniendo en cuenta supuestos de balance de carbono. Las emisiones del motor son tratadas por el convertidor catalítico (Odoki & Kerali, 2006).

Para ver todas las ecuaciones usadas por HDM-4 para estimar las emisiones, remítase al *Anexo 01*.

3.10 Modelado de las emisiones

El modelado de las emisiones de escape se realiza por separado para cada tipo de vehículo y para cada flujo de tráfico; esto se realiza para cada año de análisis o cada opción que se desarrolle. Para poder obtener las emisiones totales al año, se realiza la sumatoria de cada tipo de vehículo (Odoki & Kerali, 2006). Dentro del manual del HDM-4 se especifica que, para poder realizar el cálculo de las emisiones de cada tipo de vehículo, se requiere:

- Volumen de tráfico en la sección de análisis (vehículos por año)
- Distancia del tramo
- Velocidad del vehículo
- Consumo de combustible (instantáneo) el cual es calculado por el modelo RUE de HDM-4
- Modelo y vida útil del vehículo (flota vehicular)

Para ver todas las ecuaciones usadas por HDM-4 para modelar las emisiones, remítase al *Anexo 01*.

4. Metodología

Para poder cumplir con los objetivos planteados para esta investigación, es necesario analizar las emisiones producidas por los vehículos de carga en el transporte interurbano de mercancías, y cómo éstas se ven reflejadas según algunas variables de las carreteras del país. Por tal motivo, es indispensable tener presente una serie de pasos con los cuales sea posible replicar la metodología en diferentes regiones o casos particulares.

Es importante considerar los posibles riesgos o contingencias que se pueden presentar en el proceso, como lo es la falta de información para poder realizar cada uno de los pasos necesarios para la obtención del modelo. Además, se debe considerar las definiciones de:

- Transporte de carga, para entender cómo está conformada la cadena logística y el funcionamiento de ésta.
- Contaminación por fuentes móviles terrestres la cual explica cómo los vehículos de carga impactan al medio ambiente y la salud humana.
- Parque automotor, permitiendo conocer las diferentes tipologías vehiculares para el transporte de carga por carretera.
- Tipos de modelos para estimar emisiones, para poder tomar la mejor elección del tipo de modelo a aplicar para la investigación.

Con todos los aspectos descritos anteriormente, se procede a realizar la metodología que permite dar cumplimiento al trabajo investigativo, presentado a continuación.

4.1 Zona de estudio

Se define el área geográfica en la cual el proyecto tendrá injerencia. Para esto, se debe tener en cuenta el objetivo de la investigación, es decir, partir de que se quiere analizar las emisiones en carreteras rurales. Para el caso de estudio se deben escoger carreteras que pertenezcan a un mismo universo muestral, por ejemplo, carreteras de un mismo país, región o zona. Como punto de partida, se toman las principales carreteras por donde se realiza el mayor número de viajes de carga, teniendo en cuenta cuáles son los centros atractores y productores, entendiendo centros como ciudades.

Dentro de la zona de estudio, se puede presentar un número muy elevado de ciudades lo cual dificulta el procesamiento de la información. Inicialmente se puede pensar en realizar una

reducción de dicho número, tomando aquellas ciudades más importantes dentro de la región. Un parámetro para identificar las ciudades más representativas puede ser la economía y el aporte que éstas realizan al producto interno bruto (PIB) de dicha región.

Se debe analizar si la ciudad es representativa dentro del objeto del proyecto, en el caso del transporte de mercancía, es de vital importancia conocer cuáles son las regiones que tienen mayor número de viajes y que transportan mayor número de toneladas al año. Algunas entidades como el Ministerio de Transporte, agremiaciones de Transportadores o empresas transportadoras podrían ayudar en la identificación de aquellos lugares de mayor interés. Al mismo tiempo pueden poseer datos muy valiosos para el proceso, tales como distancias, tiempos de recorrido, entre otros.

4.2 Rutas para el análisis

Una vez identificada la zona de estudio para el análisis de las emisiones, se puede presentar el caso de que dicha zona tenga cierto número de ciudades, entre las cuales se pueden realizar transporte interurbano de mercancías, es decir, se pudiera construir una matriz de orígenes (O) y destinos (D) en la cual el número total de pares origen-destino, estaría dado por la ecuación *(7)*:

$$P = n * (n - 1) \tag{7}$$

Donde:

P= Número total pares origen-destino

n= Número de ciudades

Dependiendo la zona de estudio, se puede tener un P muy grande, lo cual pudiera dificultar el estudio, por este motivo, se pudiera pensar en tomar un número de pares origen-destino menor. Sin embargo, se debe escoger muy bien cuáles serán dichos pares a evaluar, de acuerdo con el alcance del trabajo.

4.2.1 Selección de rutas

Para cubrir la ruta desde un origen A, hasta un destino B pueden existir varias posibilidades, las cuales pueden tener tramos de carreteras con características diferentes. Es posible encontrar rutas más cortas en distancia (kilómetros recorridos), pero por sus especificaciones (sin pavimentar, calzada simple, etc.) el tiempo de viaje puede ser mayor.

Aplicaciones tales como *Google Maps* pueden dar una idea de posibles rutas para realizar el trayecto desde A hasta B. Sin embargo, es de vital importancia saber que estas rutas aparentemente comunes, no siempre son las utilizadas para realizar el transporte de

mercancía entre dichos puntos, lo anterior debido a la ubicación de los principales puntos de carga tanto en la ciudad origen, como en la ciudad destino; o también por posibles restricciones que pueda tener el tráfico de camiones por ciertos puntos.

Para encontrar las rutas que realmente son utilizadas por los camiones en el transporte de carga interurbano, se debe indagar con los diferentes actores de la cadena logística, de esta forma se podrán tener puntos de interés o puntos conocidos en la ruta, y así tener una nube de puntos del recorrido.

4.2.2 Mapeo de la ruta

Con el nombre de los principales puntos de interés de cada una de las rutas, y superponiendo dichos puntos en un mapa el cual contenga la red vial de la zona, es posible realizar el mapeo de cada una de las rutas. Algunos gobiernos o entidades poseen información cartográfica, por lo cual, en algunos casos es posible encontrar una red vial que puede servir como base para el mapeo de cada una de las rutas a estudiar.

Es muy importante que cada una de las rutas, se encuentre subdividida en tramos de carretera, dichos tramos pueden obedecer a características comunes que tienen en ese sector. Con lo anterior, se realiza la suposición de que el vehículo de carga va a tener el mismo comportamiento mientras recorre esa porción vial. Esto implica que las emisiones producidas durante ese tiempo obedecerán a un mismo patrón.

4.3 Tramos de carretera

Para poder realizar un buen análisis de las emisiones producidas por camiones en áreas interurbanas, es muy importante que cada una de las rutas seleccionadas como rutas de transporte de carga, se dividan en tramos. La longitud de cada tramo estará definida por características comunes, es decir, que se supone que el comportamiento que tendrá el vehículo al recorrer el tramo no presentará muchas diferencias, pues dicho trayecto está sometido a unas condiciones similares en cuanto a características geométricas y de operación.

Como se había definido en las rutas comunes con anterioridad, es muy importante que cada ciudad origen o destino sea un punto inicial o final de un tramo, esto permitirá un mejor análisis y evitará confusión cuando una ruta se encuentre dentro de otra.

Una vez se tiene en la zona de estudio el mapeo y subdivisión de cada una de las rutas a analizar; y con el fin de optimizar los resultados, se sugiere realizar una búsqueda de aquellos tramos interurbanos que puedan tener intercepto en algunos kilómetros de recorrido. Por ejemplo, si un camión va desde la ciudad A hasta la ciudad B las cuales se encuentran al sur

y norte de la zona de estudio respectivamente, y durante su trayecto el vehículo debe atravesar las ciudades C y D de sur a norte. Es muy posible que la ruta entre C y D sea parte de la ruta original A hasta B, por lo cual tendrán uno o más tramos de carretera comunes. Los tramos comunes pueden ayudar a corroborar y calibrar los modelos que se desarrollen para la estimación de emisiones de la zona.

4.4 Vehículos por estudiar

Partiendo que se quiere analizar las emisiones de transporte de carga interurbano por carretera, se debe saber cuáles son las tipologías vehiculares que transitan por dichas carreteras. Especialmente, se debe identificar cuáles de esos vehículos son usados en el sector carga, puesto que estos serán los vehículos de interés para la investigación. Una vez se tenga claro lo anterior, se procede a verificar las diferentes subdivisiones o categorías de esos tipos de vehículos, en otras palabras, conocer cuáles son los tipos de camiones que están circulando por la carretera.

Es muy importante saber que pueden existir muchas tipologías de camiones. Sin embargo, en la mayoría de los casos siempre va a existir unas tipologías predominantes en número de vehículos que circulan. Es por esto, que se debe buscar en fuentes confiables, cuáles son los tipos de camiones que predominan en la zona de estudio.

Una vez se conoce el tipo de vehículo al que se le van a analizar las emisiones producidas durante el trayecto, se define un porcentaje de capacidad a la que circula, puesto que no todos los vehículos transitan a capacidad plena y en algunos casos circulan sin carga. Para definir dicho porcentaje, se analiza información de la literatura y/o obtenida con expertos.

El tipo y cantidad de vehículos que circulan por una carretera o por un tramo de carretera, tienen un impacto directo en la cantidad de emisiones que se producen. Por lo tanto, se debe conocer un aproximado de las diferentes categorías vehiculares que circulan constantemente por la carretera a analizar. Por tal motivo, se debe consultar información que reposa de los diferentes conteos que se realizan cada cierto tiempo para determinar el Tránsito Promedio Diario (TPD) de la zona.

4.5 Obtención del modelo

El software escogido en la investigación, para el cálculo de las emisiones producidas, debe ser alimentado con algunos supuestos de la zona de estudio. Es posible que, al tener una zona de estudio muy grande, se deba realizar un análisis macro, en el cual algunas variables son aproximaciones que se realizan. Dentro de las variables que se deben definir puesto que pudieran afectar en el número de emisiones, se encuentra el TPD, tipo de carretera, velocidad vehicular, potencia vehicular, distancia, entre otras.

Algunas otras variables como clima, estructura del pavimento, entre otras se pudieran tener que definir puesto que pudieran ser importantes no solo para el funcionamiento del software, sino también porque pudieran tener algún efecto en los resultados. Otro tipo de variables se pudiera tomar por defecto. Sin embargo, se debe revisar que tenga lógica para que éstas no alteren mucho los resultados.

Con los resultados obtenidos por el software usado, más toda la información recopilada y discriminada por aquella que pueda ser de utilidad y aquella que pueda ser descartada, se procede a obtener el modelo. Es claro que el modelo es una primera aproximación para poder predecir las emisiones producidas por el transporte de carga interurbano, pues aún no se tiene registros de otros modelos que hagan lo mismo en la zona de estudio.

Para poder estimar un modelo que pueda ser inicialmente confiable, se deben aplicar algunos conocimientos, los cuales afiancen el desarrollo de éste; para esto es muy importante que los pasos previos, especialmente el de obtención y análisis de información sean lo más certeros posibles y que representen de la mejor manera lo que pasa en la realidad. Es de notar que no siempre se puede acceder u obtener toda la información necesaria para que el modelo sea lo más cercano al 100% de confiabilidad. Sin embargo, como es una primera aproximación, se estima el modelo con la información que en ese momento se disponga. Es posible que a futuro se pueda complementar o mejorar el modelo por medio de la obtención de más datos, o mejorando y/o complementando la información de las variables que afectan al mismo.

4.6 Análisis de la información encontrada

Una vez definido el modelo, se analizan los resultados obtenidos, y se verifican las posibles dificultades presentadas durante el estudio investigativo, y cómo estas pudieron afectar la obtención del modelo. Adicionalmente, se debe plantear cuáles son los posibles trabajos que se pueden desarrollar a futuro teniendo como punto de referencia el proyecto realizado. Los trabajos posteriores se deben enfocar en mejorar y complementar los resultados, logrando así cada vez un mejor aporte y resultados más acertados.

5. Desarrollo de la metodología

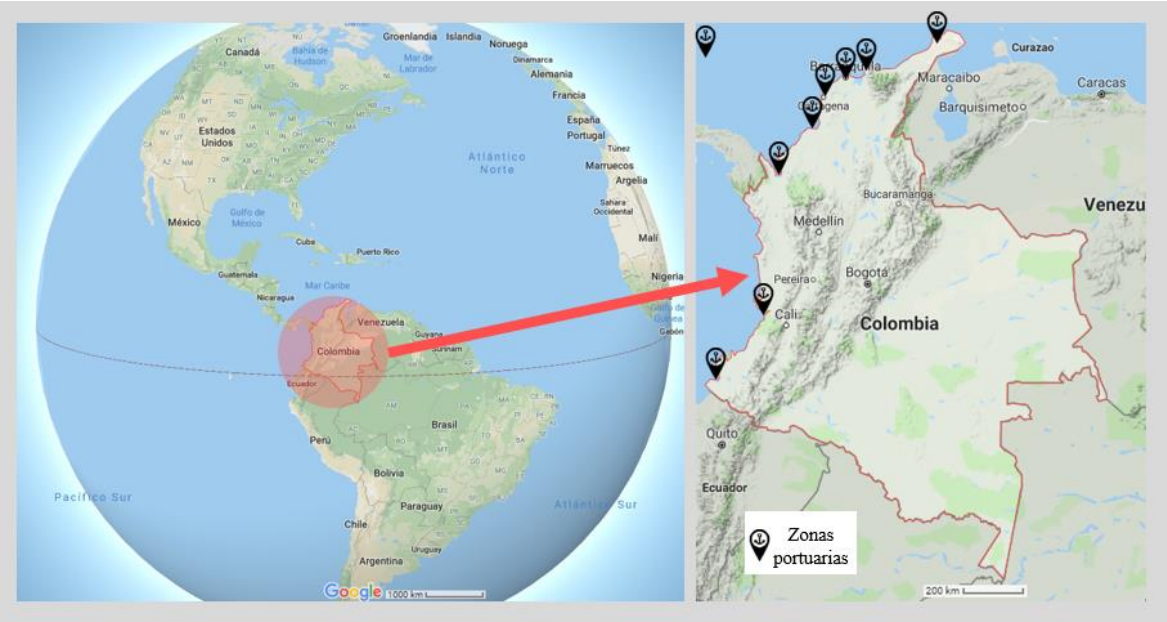
Una vez definidos los pasos de la metodología, y con toda la información recopilada discriminando la de utilidad y la descartable, se procede al desarrollo de la metodología, el cual tiene como finalidad el poder cumplir con los objetivos plasmados al inicio de la investigación. Para esto se desarrollan una serie de pasos con los cuales es posible encontrar las emisiones producidas por el transporte interurbano de carga en el área de estudio escogida, como se presenta a continuación.

5.1 Análisis de la zona de estudio

Colombia ubicado al noroccidente de Suramérica, es un país que según cifras oficiales, tiene una población aproximada de 48.2 millones de habitantes (datos preliminares del censo de 2018) (DANE, 2019), por tierra limita con Venezuela, Brasil, Perú, Ecuador y Panamá, adicionalmente por mar con los océanos Pacífico y Atlántico; lo cual permite que la mercancía que ingresa o sale de su territorio lo haga por medio aéreo, terrestre y marítimo. Los principales corredores viales por donde se transporta la carga se han desarrollado con el fin de poder conectar los puertos con las principales ciudades al interior del país, y las ciudades entre sí.

El país cuenta con diferentes zonas portuarias (ver Figura 11) entre las cuales se destacan 5 debido a su gran importancia en cuanto a movimiento de mercancía que ingresa o sale del país vía marítima: 3 zonas portuarias conectan con el Océano Atlántico (Santa Marta, Barranquilla y Cartagena), las otras 2 conectan con el Océano Pacífico (Buenaventura y Tumaco). Adicional a las 5 zonas anteriormente mencionadas, se tiene también otras zonas portuarias en La Guajira, Golfo de Morrosquillo y Urabá. Finalmente se tiene la zona portuaria de San Andrés la cual permite el ingreso de mercancías a la isla.

Figura 11. Puertos en Colombia



Nota: Adaptado de "Ubica los proyectos en el mapa", Agencia Nacional de Infraestructura (2016)

Teniendo en cuenta los principales puertos que tiene Colombia, así como las principales ciudades desde las cuales se transporta o llega la mercancía, y con base en el Decreto 1478 de 2014 en el cual se establece que los corredores logísticos de importancia estratégica, son aquellos "medios físicos que facilitan el intercambio y el desarrollo del comercio en general, por los cuales se moviliza la carga tanto del comercio exterior como del comercio interno", en los cuales se articulan diferentes orígenes y destinos, se decide establecer 8 corredores logísticos terrestres en el país, los cuales se nombran como Bogotá – Barranquilla, Bogotá – Buenaventura, Bogotá – Bucaramanga, Medellín – Cali, Medellín – Bucaramanga, Bogotá – Villavicencio, Bogotá – Yopal y Bogotá – Putumayo; si se unen todos estos corredores, se pudiera tener las carreteras principales por donde se transporta la carga por carretera en Colombia así como lo muestra la Figura 12 (MinTransporte, 2014a, 2015).

Figura 12. Unión de corredores logísticos de carga terrestre en Colombia

Nota: Reproducción de "Corredores logísticos de importancia estratégica", Ministerio de Transporte de Colombia (2019a)

La Tabla 14 muestra que para el año 2013 Colombia movilizó más de 300 millones de toneladas de carga, de las cuales 220 millones (73%) se transportaron de forma terrestre mediante camiones. Desde el año 2002 (en el que se movieron 119 millones de toneladas, de las cuales 84 millones fueron en camión) hasta el año 2013, el promedio de la carga movida por el parque automotor de camiones fue de 72%; para ese mismo periodo 26% de toda la carga movida en Colombia, se realizó por medio ferroviario. Entre 2002 y 2013, Colombia transportó un total de 2655 millones de toneladas, de las cuales 1915 millones se realizaron por camión y 685 millones por ferrocarril (682 millones de toneladas movidas por medio ferroviario fueron de carbón). Se tomaron datos hasta 2013 puesto que el informe

Transporte en Cifras Estadísticas 2017 presentaba datos incompletos de las toneladas terrestres entre el periodo 2014 - 2017 (MinTransporte, 2018)

Tabla 14. Movimiento de toneladas en Colombia por modo de transporte

AÑO	Terrestre	Ferroviario			Fluvial	Aéreo	Cabotaje	Total
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón	Total				
2002	84,019	N.D	31,032	31,032	3,480	122	532	119,185
2003	99,782	37	42,744	42,781	3,725	132	928	147,348
2004	117,597	317	45,865	46,182	4,211	129	588	168,707
2005	139,646	308	48,919	49,227	4,863	135	400	194,271
2006	155,196	314	49,394	49,708	4,025	138	509	209,576
2007	183,126	375	52,829	53,204	4,563	137	454	241,484
2008	169,714	236	58,236	58,472	4,953	123	372	233,634
2009	173,558	254	59,144	59,398	4,070	109	364	237,499
2010	181,021	366	66,659	67,025	3,691	119	353	252,209
2011	191,701	204	74,350	74,554	3,650	124	646	270,675
2012	199,369	20	76,780	76,800	3,474	127	388	280,158
2013	220,309	97	76,684	76,781	2,968	149	774	300,981
2014	N.D	174	42,733	42,907	2,858	163	601	46,529
2015	N.D	230	47,705	47,935	3,524	179	969	52,607
2016	N.D	643.1	54,650	55,293	3,938	185	1,786	61,202
2017	N.D	15.9	50,419	50,435	5,200	177	3,563	59,375

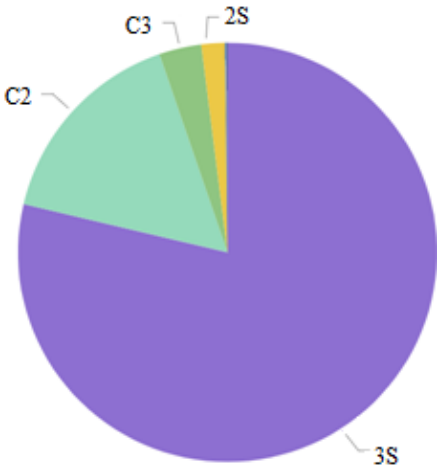
** valores en miles de toneladas

Nota: Adaptado de Tomado de" Transporte en Cifras Estadísticas 2017", Ministerio de Transporte de Colombia (2018)

5.2 Vehículos más usados en el transporte de carga en Colombia

Según los datos del Portal Logístico de Colombia (PLC) y del Registro Nacional de Despacho de Carga por Carretera (RNDC), en el 2018 en cuanto a carga seca, se realizaron 7.75 millones de viajes para movilizar un aproximado de 112.44 millones de toneladas, con un promedio de 14.5 toneladas por viaje. Teniendo en cuenta la Figura 13, los vehículos más usados para el transporte de la mercancía fueron los de configuración 3S, C2, C3 y 2S (MinTransporte, 2019c). Dentro de la configuración 2S, se encuentran principalmente agrupados los vehículos C2S2 y C2S3 mientras que, en los 3S se encuentran los C3S2 y C3S3.

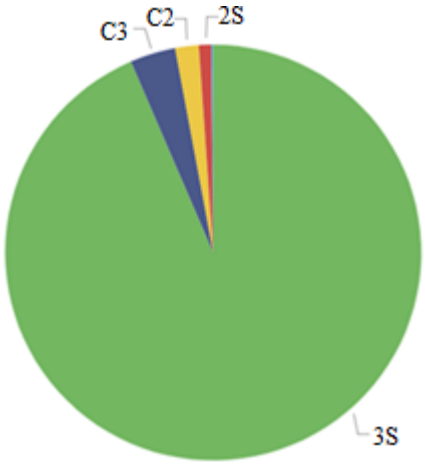
Figura 13. Vehículos usados para el transporte de carga seca en 2018



Nota: Reproducción de "Viajes y toneladas movilizadas durante el 2018", Ministerio de Transporte de Colombia (2019d)

Respecto a la carga líquida (ver Figura 14), el Ministerio de Transporte de Colombia, con base en los datos obtenidos del RNDC, afirma que, durante el 2018, se transportaron aproximadamente 3,708 millones de galones en 426 mil viajes, con un promedio 8,694 galones por viaje. Como muestra al igual que en la carga seca, la mayoría de los vehículos para el transporte de líquidos son tipo 3S, C3, C2 y 2S (MinTransporte, 2019c). Dentro de la configuración 2S, se encuentran principalmente agrupados los vehículos C2S2 y C2S3 mientras que, en los 3S se encuentran los C3S2 y C3S3

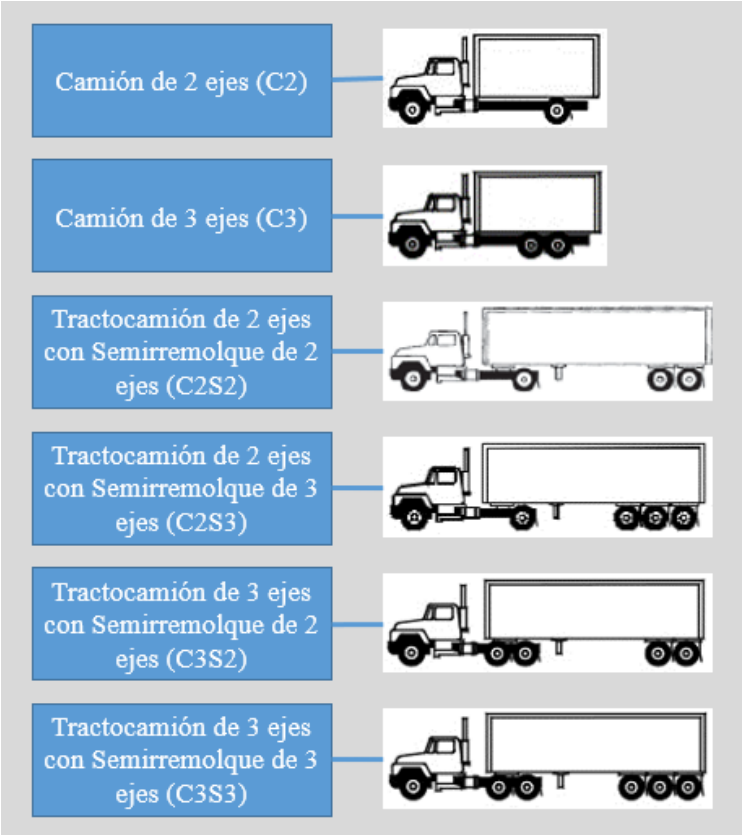
Figura 14. Vehículos usados para el transporte de líquidos en 2018



Nota: Reproducción de "Viajes y toneladas movilizadas durante el 2018", Ministerio de Transporte de Colombia (2019c)

La resolución 4100 de 2004 y la 2888 de 2005 del Ministerio de Transporte de Colombia, presentan los esquemas y algunas características para los camiones usados en el transporte de carga en Colombia. Sin embargo, con base en el RNDC los vehículos más usados para el movimiento de carga por carretera al interior del país se dividen en 6 categorías o configuraciones (ver Figura 15): Camión rígido de 2 ejes (C-2), Camión rígido de 3 ejes (C-3), Tractocamión de 2 ejes (mini-mula) con semirremolque de 2 y 3 ejes (C2-S2 y C2-S3), Tractocamión de 3 ejes (tractomula) con semirremolque de 2 y 3 ejes (C3-S2 y C3-S3).

Figura 15. Vehículos más usados en el transporte interurbano de carga en Colombia



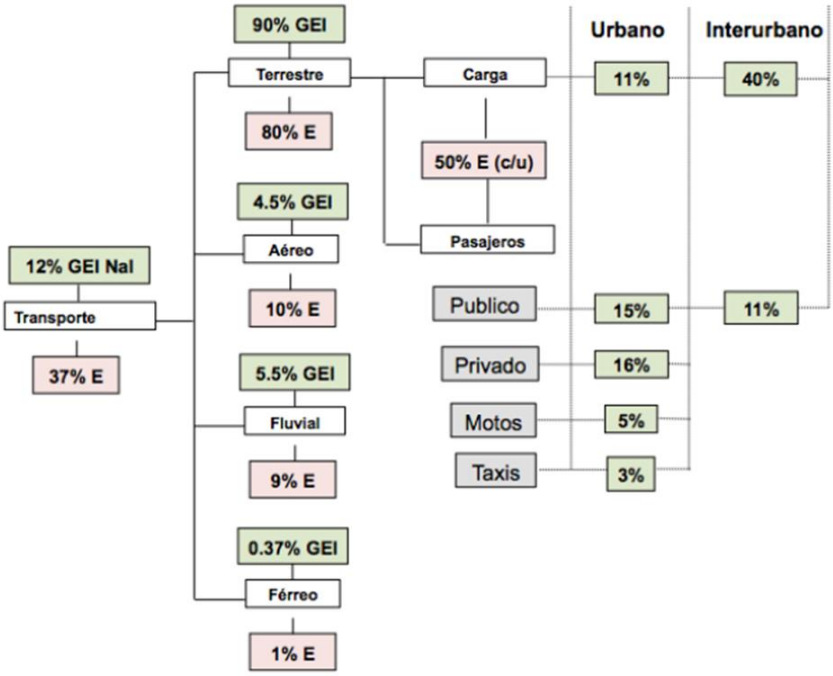
*Nota: Adaptado de "*Resolución 4100 y Resolución 2888*", Ministerio de Transporte de Colombia (2004, 2005)*

5.3 Contaminación en Colombia por fuentes móviles

En países como Colombia, el sector transporte aporta aproximadamente el 4% al PIB nacional. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 16, el transporte es aquel sector que, para su operación, requiere mayor cantidad de derivados del petróleo nacional (37%), lo cual traducido a gases de efecto invernadero (GEI), representa un 12% de los GEI nacionales. Para el año 2009 los GEI producidor por el sector transporte, alcanzaron una

cifra aproximada de 20 millones de toneladas. El subsector carretero, fue responsable del 90% de los gases de efecto invernadero producidos por el sector transporte; siendo el transporte de carga interurbano el que aportó un 40% de los GEI (MinTransporte, 2014b).

Figura 16. Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector transporte en Colombia



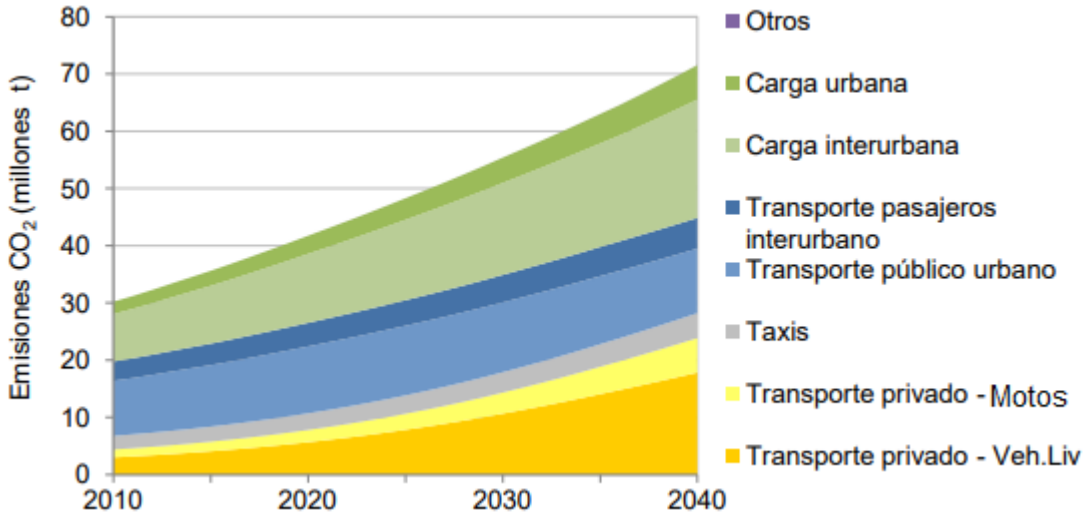
** Consumo de energía (E) y emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en sector transporte

Nota: Reproducción de "Plan de Acción Sectorial de Mitigación (PAS) Sector Transporte", Ministerio de Transporte de Colombia (2014b)

De continuar con el crecimiento actual del parque automotor, las emisiones de CO_2 producidas por los vehículos aumentarán considerablemente (ver Figura 17). Esto debido al aumento que se dará en el número de viajes que se realizan y al aumento en la tenencia de vehículos la cual podrá pasar de 100 a 600 vehículos por cada 1,000 habitantes. En las proyecciones en cuanto al transporte de carga, se utiliza como variable principal las toneladas transportadas al año, las cuales se ajustan a un crecimiento económico del país (MinTransporte, 2014b).

Según se proyecta en la Figura 17, se espera que las emisiones tengan un comportamiento a manera de una curva creciente, en la cual se estima que para el año 2040, las emisiones producidas por fuentes móviles por carretera en Colombia, alcancen los 70 millones de toneladas, de las cuales poco más de 20 millones de toneladas sean producidas por el transporte de carga interurbana, siendo este grupo que más aporte en la producción de CO_2.

Figura 17. Proyección a 2040 de GEI del sector transporte en Colombia



Nota: Reproducción de "Plan de Acción Sectorial de Mitigación (PAS) Sector Transporte", Ministerio de Transporte de Colombia (2014b)

5.4 SICE-TAC

El Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga (SICE-TAC), es una herramienta desarrollada por el sector público y privado, en cabeza del Ministerio de Transporte de Colombia, diseñada para servir como punto de partida en negociaciones del valor de transporte de carga entre ciudades. Para esto tiene en cuenta diferentes variables del viaje, tales como: la configuración del vehículo, tipo de carga transportada, origen – destino, tiempos logísticos, entre otros. Para calcular el costo del viaje, realiza diferentes cálculos entre los costos fijos, variables y otros costos (MinTransporte, 2017).

El SICE-TAC se encuentra puesto al servicio de todas las personas sin importar su relación con el transporte de carga. Para la versión 2.0 se realizaron mesas de trabajo con los gremios, observatorio de carga por carretera de Colombia, generadores de carga, empresas de transporte, propietarios de camiones y conductores. Con respecto a versiones anteriores, la versión 2.0 incluye más configuraciones de camiones, más tipos de mercancía, mayor número de ciudades y una actualización de los costos fijos, variables y otros costos.

Algunos hechos que llevaron a la creación del SICE-TAC fueron:

- **Decreto 1150 de 1997:** de la Presidencia de la República de Colombia, el cual anexó una tabla de fletes para el transporte de carga entre algunas ciudades del país.
- **Conpes 3489 de 2007:** del Departamento Nacional de Planeación (DNP) y llamado política nacional de transporte público automotor de carga el cual dio 11 recomendaciones referentes al transporte de carga, lo cual permitió llegar a lo que

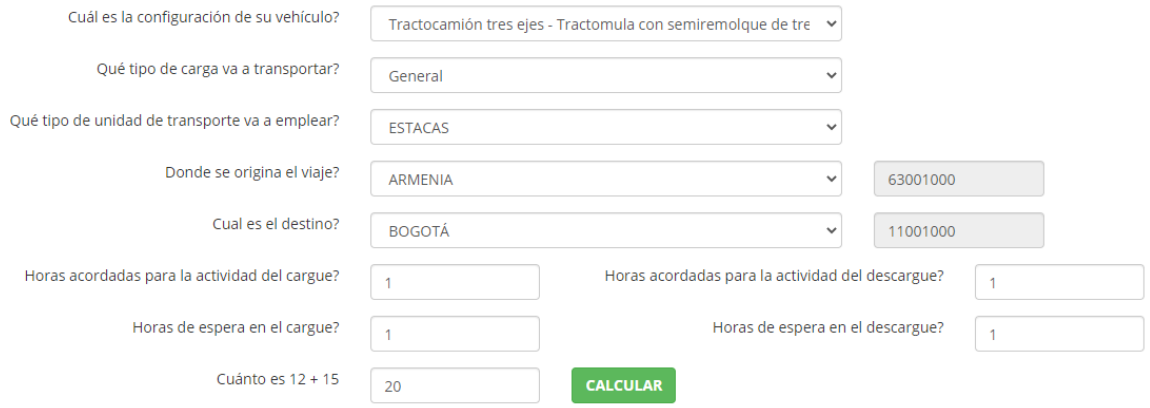
hoy en día se conoce como el Índice de Costos del Transporte de Carga (ICTC) y Sistema de Información de Costos Eficientes del Transporte automotor de Carga SICE-TAC.

- **Decreto 2092 de 2011:** de la Presidencia de la República de Colombia, por el cual se fijó la política tarifaria y los criterios que regulan las relaciones económicas entre los actores del servicio público de transporte terrestre automotor de carga. Lo cual permitió un libre acuerdo de pago entre los actores de la cadena del transporte de carga.
- **Resolución 10106 de 2012:** del Ministerio de Transporte de Colombia, con esta se constituyó el Observatorio de Transporte de Carga por Carretera (OTCC) en el cual se discutiría y analizaría asuntos relacionados al transporte de carga, definiendo también quienes conformarían el observatorio.
- **Resolución 377 de 2013:** del Ministerio de Transporte de Colombia, por la cual se implementó el Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC) el cual entrega información de la operación y los costos pactados en el transporte de carga.
- **Decreto 2228 de 2013:** de la Presidencia de la República de Colombia, por medio del cual se modificaron los artículos 1°, 3°, 4°, 5°, 11 y 12 del decreto 2092 de 2011
- **Resolución 757 de 2015:** del Ministerio de Transporte de Colombia. Entre lo más relevante de esta resolución se fue que se resolvió el que no se podía efectuar pagos por debajo del SICE-TAC. Es decir que se adoptaba como punto de partida más bajo para las negociaciones.
- **Resolución 3444 de 2016:** del Ministerio de Transporte de Colombia. En la cual se buscó que las variables con las cuales el SICE-TAC opera, se fueran actualizando periódicamente.
- **Resolución 3741 de 2016:** del Ministerio de Transporte de Colombia. Esta resolución decidió reformular el espacio del Observatorio de Carga, con lo cual se cambió la metodología y se empleó ejercicio de construcción colectiva.
- **Publicación SICE-TAC 2.0:** El 9 de marzo de 2018, el director de transporte y tránsito firma la publicación del SICE-TAC 2.0.

En la actualidad el SICE-TAC opera con tres (3) tipos de carretera: Plana, ondulada y montañosa; con las cuales se cubren 930 rutas entre treinta (31) ciudades colombianas. Muchas de las rutas tienen puntos en común, en total se tienen 199 puntos comunes por los cuales se interceptan algunas de las rutas.

Para operar el SICE-TAC, es necesario ingresar a la página web del Portal Logístico de Colombia https://plc.mintransporte.gov.co/, la cual pertenece al Ministerio de Transporte de Colombia. Como el SICE-TAC es una herramienta que se usa para el cálculo del valor a pagar por el transporte de mercancía de una ciudad a otra, se debe alimentar por algunos datos que resumen la operación, tal como lo presenta la Figura 18. Dentro de los datos de ingreso se encuentran variables relacionadas al tipo de vehículo, origen, destino, y tiempos logísticos de cargue y descargue.

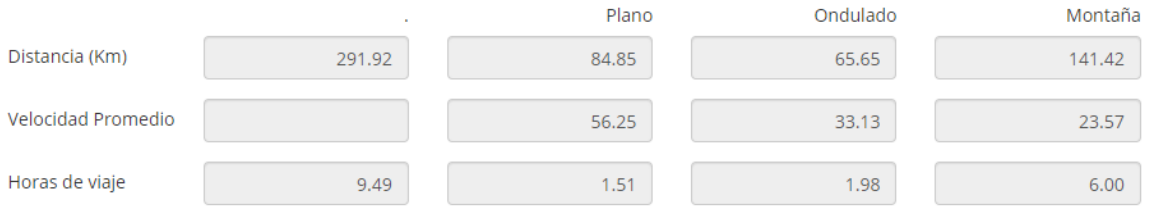
Figura 18. Datos de entrada SICE-TAC



Nota: Reproducción de "SICE-TAC", Ministerio de Transporte de Colombia (2019b)

Los resultados que se obtienen con el SICE-TAC, están enfocados en los costos fijos, variables y otros costos que se puedan tener en la operación del transporte de mercancías. Para visualizar los diferentes parámetros que arroja, remítase a los resultados realizados en el ejemplo del *Anexo 02* el cual se realiza para un vehículo C3S3 en la ruta Armenia – Bogotá. De los resultados que se obtienen en el SICE –TAC se puede extraer información para el cálculo de emisiones del transporte automotor de carga entre ciudades, que en algunos casos varía según la ruta y el tipo de vehículo utilizado. La Figura 19 presenta dichas variables las cuales están asociadas a la distancia total y por tipo de pendiente longitudinal de la carretera, el tiempo que lleva el recorrido y la velocidad promedio por cada tipo de carretera.

Figura 19. Parámetros de distancia y velocidad SICE-TAC



	.	Plano	Ondulado	Montaña
Distancia (Km)	291.92	84.85	65.65	141.42
Velocidad Promedio		56.25	33.13	23.57
Horas de viaje	9.49	1.51	1.98	6.00

Nota: Reproducción de "SICE-TAC", Ministerio de Transporte de Colombia (2019b)

5.5 Rutas Para el Transporte Interurbano de Carga en Colombia según datos oficiales

En Colombia la mercancía circula entre los diferentes municipios que la conforman, sin embargo, algunos tienen un mayor flujo, debido a que son grandes centro productores o atractores de carga. Por ejemplo, aquellas ciudades que poseen puerto son grandes productores de viajes de carga hacia las zonas internas del país, pues es desde donde parten

todas las importaciones que llegan vía marítima al país; al mismo tiempo, son grandes atractores, pues es desde donde se exportan diferentes productos (que llegan al puerto) a otros países por medio de contenedores, u otro medio, que son transportados por buques.

5.5.1 Ciudades que generan y atraen carga

En general todas las ciudades colombianas pueden generar o atraer carga. Sin embargo, el Ministerio de Transporte de Colombia, en conjunto con diferentes agremiaciones tanto de transportadores, empresas de transporte y empresas privadas, han identificado las 31 ciudades más representativas para el transporte de mercancía en Colombia, las cuales se listan en la Tabla 15 y se representan gráficamente en la Figura 20.

Tabla 15. Ciudades referentes para el transporte de carga en Colombia

Ciudades	
Armenia	Medellín
Barrancabermeja	Mocoa
Barranquilla	Montería
Bogotá	Neiva
Bucaramanga	Pasto
Buenaventura	Pereira
Cali	Popayán
Cartagena	Riohacha
Cartago	Santa Marta
Cúcuta	Sincelejo
Duitama	Sogamoso
Florencia	Tumaco
Guadalajara de Buga	Valledupar
Ibagué	Villavicencio
Ipiales	Yopal
Manizales	

Nota: Elaboración propia partiendo de información del Ministerio de Transporte de Colombia (2019c)

Figura 20. Ciudades referentes para el transporte de carga en Colombia

Nota: Realización propia partiendo de shapefiles del IGAC y datos del Ministerio de Transporte de Colombia

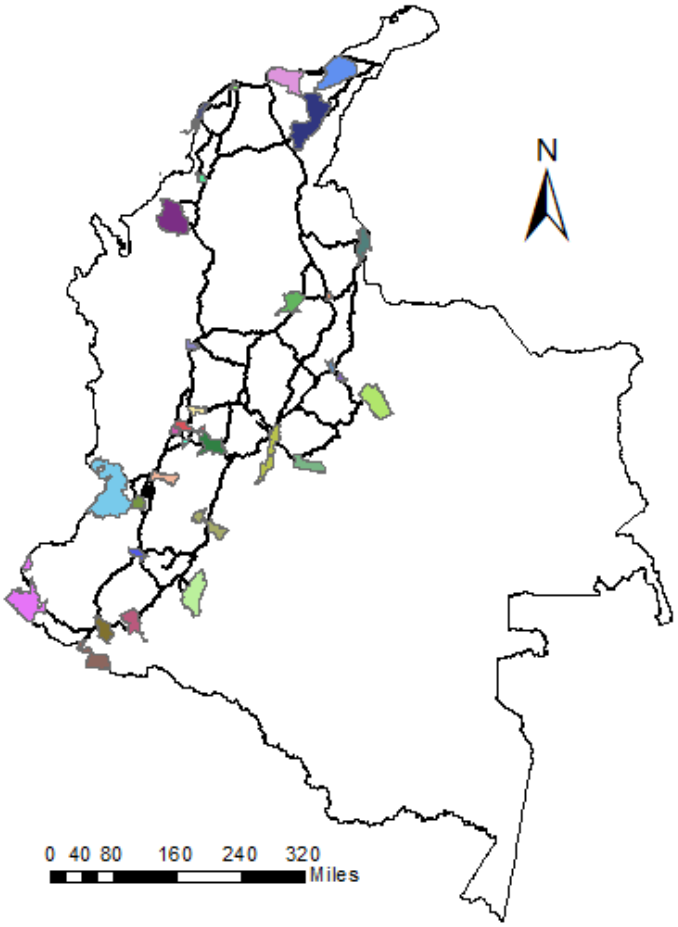
5.5.2 Red vial por donde circula la carga en Colombia

En las diferentes reuniones realizadas entre el gobierno colombiano, sector privado y agremiaciones de transportadores de carga, y especialmente en aquellas del OTCC, se ha logrado mejorar las variables con las cuales opera el SICE-TAC, con lo cual, también ha sido posible identificar cada una de las rutas o corredores viales por las cuales se transporta los porcentajes más importantes de carga en el país (ver Figura 21).

Es de destacar que dichos corredores no siempre son los mismos que usan los vehículos particulares para ir desde una ciudad a otra. Lo anterior se debe a condiciones o

características de las carreteras, o por razones logísticas de los puntos en los cuales se encuentran los centros atractores o distribuidores de carga en cada una de las ciudades. Muchas de las carreteras con las cuales opera el SICE-TAC, tienen en cuenta los corredores logísticos de carga presentados en la Figura 12, adicionalmente, se añaden otros corredores los cuales conectan a las ciudades presentadas en la Figura 20 y Tabla 15.

Figura 21. Red vial transporte de carga en Colombia



Nota: Realización propia partiendo de shapefiles del IGAC y datos del Ministerio de Transporte de Colombia

5.5.3 Distancias entre ciudades y tipo de carreteras

Para cada uno de los pares orígenes y destinos con los cuales opera el SICE-TAC, existe una distancia aproximada en kilómetros la cual debe recorrer cada camión que pretenda transportar mercancía entre las diferentes ciudades. Adicionalmente, dicha distancia es dividida en 3 tipos de carretera (plana, ondulada y montañosa). Para la herramienta desarrollada por el Ministerio de Transporte de Colombia, en colaboración con los actores

involucrados en la cadena logística de carga, se decidió que los tipos de carretera por los cuales circula el transporte automotor de carga se definen como:

- **Carretera plana:** Aquella cuya pendiente longitudinal es menor del tres por ciento (3%).
- **Carretera ondulada:** Este tipo de carretera tiene una pendiente longitudinal entre el tres y seis por ciento (3% - 6%)
- **Carretera montañosa:** Es aquella cuya pendiente longitudinal es mayor al seis por ciento (6%).

Es decir que existe una diferencia entre la normativa colombiana y los datos oficiales con los cuales opera la herramienta del Ministerio, puesto que ésta no tiene en cuenta las carreteras escarpadas, cuya pendiente longitudinal tiene un porcentaje mayor a ocho (8%).

A manera de ejemplo, se presenta la Tabla 16, la cual contiene la distancia que hay desde Armenia hasta otras ciudades que tienen una alta importancia para el movimiento de mercancía en Colombia; adicionalmente, presenta cuántos de esos kilómetros, son en carretera plana, ondulada o montañosa. Todas las distancias y combinaciones asociadas a otras ciudades y contempladas en el SICE-TAC se encuentran en el *Anexo 03* en la hoja distancia entre ciudades.

Tabla 16. Distancia de Armenia a otras ciudades

		Tipo de carretera usada en SICE-TAC (km)		
Destino	**Distancia (km)**	**Plana**	**Ondulada**	**Montañosa**
Barrancabermeja	552.92	0.00	552.92	0.00
Barranquilla	967.63	284.59	540.23	142.81
Bogotá	291.92	84.85	65.65	141.42
Bucaramanga	601.92	305.83	121.66	174.43
Buenaventura	228.16	109.53	42.26	76.37
Buga	110.24	0.00	110.24	0.00
Cali	170.06	148.83	0.00	21.23
Cartagena	923.12	237.04	542.63	143.45
Cartago	43.14	0.00	43.14	0.00
Cúcuta	804.93	321.44	126.72	356.77
Duitama	510.37	105.03	100.95	304.39
Florencia	528.92	0.00	528.92	0.00
Ibagué	80.00	0.00	0.00	80.00
Ipiales	647.68	182.18	179.59	285.91
Manizales	81.20	11.10	29.89	39.01
Medellín	288.13	52.14	36.04	199.95
Mocoa	619.92	0.00	619.92	0.00
Montería	691.63	0.00	691.63	0.00

		Tipo de carretera usada en SICE-TAC (km)		
Destino	**Distancia (km)**	**Plana**	**Ondulada**	**Montañosa**
Neiva	291.92	144.54	60.17	87.21
Pasto	562.80	234.25	90.99	237.56
Pereira	35.00	0.00	34.24	0.76
Popayán	292.80	131.47	85.20	76.13
Riohacha	1202.18	0.00	1202.18	0.00
Santa Marta	1031.18	593.48	307.25	130.45
Sincelejo	756.63	0.00	756.63	0.00
Sogamoso	532.87	0.00	532.87	0.00
Tumaco	851.47	290.64	176.43	384.40
Valledupar	964.38	0.00	964.38	0.00
Villavicencio	406.92	83.05	97.28	226.59
Yopal	674.31	300.60	163.26	210.45

Nota: Elaboración propia partiendo del SICE-TAC (2019b)

Cuando se analizan los resultados de la Tabla 16, se encuentran algunas inconsistencias, por ejemplo, en la ruta Armenia–Medellín, se tienen 288.13 km de los cuales 52.14 son en carretera plana, 36.04 en ondulada y 199.95 en montañosa. Mientras que en la ruta Armenia–Sincelejo se tienen 756.63 km en donde según los registros del SICE-TAC, todos pertenecen a carretera ondulada. Lo cual se presenta como un error puesto que tanto la ruta Armenia–Medellín como Armenia–Sincelejo tienen los mismos tramos de carretera desde Armenia hasta Medellín (para ir a Sincelejo desde Armenia la carga pasa por Medellín). Este tipo de inconsistencias se repite en diferentes pares origen – destino del SICE-TAC. Para consultar los puntos por los cuales transitan los vehículos de carga de una ciudad a otra y así encontrar tramos comunes, consulte el *Anexo 03* en la hoja puntos de control.

5.5.4 Puntos de control en la ruta

Tal como se expresó en el numeral anterior, algunas rutas pueden compartir tramos o puede pasar que una ruta se encuentre al interior de otra, como es el caso en donde la ruta Armenia – Medellín, hace parte de la ruta Armenia – Sincelejo, así mismo una ruta puede contener a muchas otras más, por ejemplo la ruta Pasto – Barranquilla, comparte carretera con muchas rutas. Para saber cuáles rutas comparten tramos de carretera, se debe identificar cuáles puntos de control son comunes en diferentes rutas. La Tabla 17 presenta un ejemplo de 12 pares origen – destino, en los cuales se evidencia los 5 primeros puntos de control de dichas rutas; notar por ejemplo que la ruta Barranquilla-Buenaventura, tiene los 5 primeros puntos de control iguales a la ruta Barranquilla-Neiva. Para visualizar todos los puntos de control completos de dichas rutas y todas las demás con las que cuenta el SICE-TAC, consulte el *Anexo 03* en la hoja puntos de control.

Tabla 17. Ejemplo puntos de control de rutas

			Puntos de control en la ruta				
ID	**Origen**	**Destino**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
65	Barranquilla	Buenaventura	Soledad	Malambo	Sabanagrande	Santo Tomás	Palmar De Varela
68	Barranquilla	Cartagena	Galapa	Baranoa	Campeche	Sabanalarga	Arroyo De Piedra
79	Barranquilla	Neiva	Soledad	Malambo	Sabanagrande	Santo Tomás	Palmar De Varela
95	Bogotá	Buenaventura	Soacha	Granada	Silvania	Boquerón	Ricaurte
98	Bogotá	Cartagena	Mosquera	Madrid	Facatativá	Los Alpes	Alban
109	Bogotá	Neiva	Soacha	Granada	Silvania	Boquerón	Ricaurte
216	Cali	Buenaventura	Yumbo	San Marcos	Vijes	Yotoco	Mediacanoa
218	Cali	Cartagena	Yumbo	San Marcos	Vijes	Yotoco	Mediacanoa
229	Cali	Neiva	Jamundí	Villa Rica	Santander De Quilichao	Pescador	Tunia
486	Medellín	Buenaventura	Itagüí	Caldas	Primavera	Santa Bárbara	La Pintada
489	Medellín	Cartagena	Bello	Paso Por Bello	Hatillo	Don Matías	Río Grande
499	Medellín	Neiva	Guarne	Marinilla	Santuario	La Piñuela	Doradal

Nota: Elaboración propia partiendo del Ministerio de Transporte para SICET-TAC (2019b)

5.5.5 Velocidad, tiempo de viaje y rendimiento de combustible

Para obtener los costos relacionados al transporte de carga, el Ministerio de Transporte de Colombia utiliza velocidades y rendimientos de combustible promedio, según la pendiente longitudinal de la carretera (plana, ondulada o montañosa) y según el tipo de vehículo con el cual se realiza el recorrido. La Tabla 18 muestra las velocidades promedio de cada uno de los 6 vehículos más usados en Colombia para el transporte de carga entre ciudades, cada una de estas velocidades se encuentra discriminada según el tipo de carretera.

Tabla 18. Velocidad promedio según el tipo de camión y tipo de carretera

Tipo de Camión	Vel. en plana (km/h)	Vel. en ondulada (km/h)	Vel. en montañosa (km/h)
C2	53.00	30.00	15.00
C3	56.59	32.54	18.65
C2S2	63.04	32.95	25.81
C2S3	63.04	32.96	25.81
C3S2	56.25	33.13	23.57
C3S3	56.25	33.13	23.57

Nota: Elaboración propia a partir del SICE-TAC (2019b)

Al igual que los aparentes errores encontrados en el numeral 5.5.3 los datos de velocidad oficiales con los cuales trabaja el Ministerio de Transporte, y que se resumen en la Tabla 18 aparentemente también presentan inconsistencias. Por ejemplo, al afirmar que un vehículo C2 tiene una velocidad mucho menor que un C3S3 cuando circula por una carretera de pendiente longitudinal considerada como montañosa.

Teniendo en cuenta la velocidad y la distancia promedio desde un origen a un destino, es posible calcular el tiempo de viaje total y el invertido según el tipo de pendiente longitudinal del trayecto a evaluar.

Al igual a como se realizó los promedios de velocidad, la Tabla 19 presenta los rendimientos de combustible según el tipo de camión que se usa para el transporte de carga, y según el tipo de carretera usado por el Ministerio de Transporte, dichos consumos son con los cuales opera la herramienta SICE-TAC.

Tabla 19. Rendimiento promedio de combustible según tipo de vehículo y tipo de carretera

Tipo de Camión	Consumo en plana (km/gal)	Consumo en ondulada (km/gal)	Consumo en montañosa (km/gal)
C2	12.70	10.01	7.81
C3	8.06	6.22	4.66
C2S2	8.76	6.76	5.07
C2S3	8.76	6.76	5.07
C3S2	6.80	5.04	3.42
C3S3	6.48	4.80	3.26

Nota: Elaboración propia partiendo del SICE-TAC (2019b)

5.6 Propuesta de clasificación de carreteras teniendo en cuenta aspectos geométricos

En el diseño geométrico de carreteras se tienen alineamientos vertical y horizontal. El alineamiento vertical está relacionado con la pendiente longitudinal de la carretera, mientras que el alineamiento horizontal se relaciona con la curvatura de la carretera. Por ello se plantea la posibilidad de crear una clasificación de las carreteras teniendo en cuenta tanto aspectos de la pendiente longitudinal, como de la curvatura.

5.6.1 Clasificación actual

La clasificación actual de los tipos de carretera en Colombia, tal como se describe en el numeral 3.2 y se resumen en la Tabla 20, se basa en la descripción que realiza el INVIAS,

en la cual las carreteras se pueden clasificar en cuatro (4) tipos, y estos están enfocados según su pendiente longitudinal.

Tabla 20. Tipos de carretera en Colombia según pendiente longitudinal

Tipo de la carretera	Pendiente (P)	Tipo de pendiente
Plana	P < 3%	P1
Ondulada	3% ≤ P < 6%	P2
Montañosa	6% ≤ P < 8%	P3
Escarpada	P ≥ 8%	P4

Nota: Adaptado de "Manual de Diseño Geométrico de Carreteras", Instituto Nacional de Vías (2008)

A pesar de ser cuatro (4) tipos de carretera, el Ministerio de Transporte en el aplicativo SICE-TAC solo usa plano, ondulado y montañoso es decir que solamente tiene en cuenta tres (3), dejando a un lado las carreteras escarpadas. Por lo cual considera dentro de su clasificación el terreno montañoso como aquel que tiene una pendiente longitudinal mayor o igual al seis por ciento (≥ 6%).

5.6.2 Necesidad de nueva clasificación

La creación de una nueva propuesta de clasificación de carreteras pudiera ayudar a encontrar modelos y variables que representen mejor la realidad. Para el caso de las emisiones producidas por el transporte automotor de carga entre ciudades, se plantea la hipótesis que tanto la pendiente longitudinal de la carretera, como la curvatura tienen una influencia en las emisiones producidas. La primera debido a los cambios de esfuerzo que tiene que realizar el motor de un vehículo pues no es el mismo cuando el camión está descendiendo, en un terreno plano o va en ascenso. La segunda debido a los cambios de velocidad de los camiones al momento de recorrer una curva. Como el software escogido para el análisis de emisiones fue el HDM-4, la propuesta de clasificación parte de éste.

Sin embargo, la clasificación de las carreteras con la cual trabaja el HDM-4, no está adaptada para las condiciones topográficas de Colombia puesto que, para el software, la máxima pendiente longitudinal de la carretera es decir la que se conoce como muy sinuosa o muy escarpada según la Tabla 13 es aquella que está cerca al 4%, porcentaje que para las condiciones colombianas (ver Tabla 20) hace referencia a una pendiente tipo P2, es decir, Ondulada. Por lo anterior, se hace necesario adaptar los parámetros con los cuales opera el HDM-4, combinándolos con las características propias de la región. Para poder adaptar dichas variables, se requiere extraer de la Tabla 13 la curvatura horizontal media del tramo, la cual ayuda a clasificar las carreteras en siete tipos según su curvatura (ver la Tabla 21).

Tabla 21. Tipo de curvaturas según HDM-4

Tipo de curvatura	Curvatura en °/km (C)
C1	C < 3
C2	3 ≤ C < 15
C3	15 ≤ C < 50
C4	50 ≤ C < 75
C5	75 ≤ C < 150
C6	150 ≤ C < 300
C7	C ≥ 300

Nota: Adaptado de "HDM4 - Volume Two: Applications Guide", Kerali, McMullen, & Odoki (2000).

5.6.3 Posibles combinaciones para clasificar carreteras

Teniendo en cuenta que HDM-4 clasifica las carreteras considerando pendientes bajas para las condiciones colombianas, se propone realizar una combinación entre las características que se presentan en el Manual de Diseño Geométrico para Carreteras del INVIAS, y los diferentes tipos de curvatura con los cuales opera el software. De esta forma se obtiene la Tabla 22, la cual plantea 28 posibles combinaciones para obtener los tipos de carretera.

Tabla 22. Posibles tipos de geometría al combinar INVIAS con HDM-4

ID	Posibles combinaciones de geometría
1	Plana con curvatura C1
2	Plana con curvatura C2
3	Plana con curvatura C3
4	Plana con curvatura C4
5	Plana con curvatura C5
6	Plana con curvatura C6
7	Plana con curvatura C7
8	Ondulada con curvatura C1
9	Ondulada con curvatura C2
10	Ondulada con curvatura C3
11	Ondulada con curvatura C4
12	Ondulada con curvatura C5
13	Ondulada con curvatura C6
14	Ondulada con curvatura C7
15	Montañosa con curvatura C1
16	Montañosa con curvatura C2
17	Montañosa con curvatura C3
18	Montañosa con curvatura C4
19	Montañosa con curvatura C5
20	Montañosa con curvatura C6
21	Montañosa con curvatura C7
22	Escarpada con curvatura C1

ID	Posibles combinaciones de geometría
23	Escarpada con curvatura C2
24	Escarpada con curvatura C3
25	Escarpada con curvatura C4
26	Escarpada con curvatura C5
27	Escarpada con curvatura C6
28	Escarpada con curvatura C7

Nota: Elaboración propia (Para complementar ver Tabla 20 y Tabla 21)

5.6.4 Clasificación propuesta

Con el fin de poder tener las combinaciones más comunes en las carreteras colombianas, se decide buscar una posible agrupación de las 28 posibilidades que existen al combinar los datos del INVIAS con las curvaturas del HDM-4. De esta forma se simplifican los análisis ya que se definen los tipos de carretera según las combinaciones más factibles de encontrar, por ejemplo no es común tener carretera con baja curvatura (C1) y alta pendiente (escarpada) o con muy alta curvatura (C7) y baja pendiente (plana). La Tabla 23 contiene las posibles combinaciones en donde se adapta las 28 posibilidades en 7 tipos de carretera (T).

Tabla 23. Tipos de carretera propuestos

C \ P	P1	P2	P3	P4
C1	T1	T1	T1	T2
C2	T1	T2	T2	T2
C3	T3	T3	T4	T5
C4	T3	T4	T4	T5
C5	T3	T4	T5	T5
C6	T6	T6	T6	T7
C7	T6	T7	T7	T7

Nota: Elaboración propia

En donde:

P: Pendiente longitudinal de la carretera (ver Tabla 20)
C: Curvatura (ver Tabla 21)
T: Tipo de carretera propuesta, y para usar en HDM-4

Para una mayor comprensión, es posible adaptar la Tabla 23 a un mapa de calor, el cual se presenta en la Tabla 24 y da una idea más rápida del tipo de carretera de mayor y menor complejidad, es decir, desde la más recta con menos pendiente (verde), hasta la de mayor pendiente con mayor curvatura (rojo). La propuesta de los tipos de carretera que se plasma en este trabajo de investigación es un aporte al estado del arte en temas viales, y una primera aproximación para definir los tipos de carretera en Colombia teniendo en cuenta diferentes tipos de geometría los cuales combinan variables del alineamiento horizontal y vertical.

Tabla 24. Mapa de calor - Tipos de carreteras

C \ P	P1	P2	P3	P4
C1	T1	T1	T1	T2
C2	T1	T2	T2	T2
C3	T3	T3	T4	T5
C4	T3	T4	T4	T5
C5	T3	T4	T5	T5
C6	T6	T6	T6	T7
C7	T6	T7	T7	T7

Nota: Elaboración propia

Al unir la propuesta de la Tabla 23 con la clasificación original del HDM-4 la cual se describe en la Tabla 13, se pueden obtener 7 tipos de carreteras (ver Tabla 25) a usar en el cálculo de las emisiones de los vehículos de transporte automotor de carga, lo anterior con el fin de poder mezclar tanto datos del software, como la normativa colombiana.

Tabla 25. Descripción de tipo de carretera propuestas

Tipo de carretera	Descripción
T1	Recta y muy plana
T2	Ligeramente sinuosa y ligeramente ondulada
T3	Sinuosa y poco ondulada (casi plana)
T4	Sinuosa y ligeramente ondulada
T5	Sinuosa y muy ondulada
T6	Muy Sinuosa y ligeramente ondulada
T7	Muy Sinuosa y muy ondulada

Nota: Elaboración propia

Al combinar tanto la información con la cual trabaja INVIAS, como con la que trabaja el software HDM-4, se requirió realizar propuestas para poder clasificar las carreteras con la información que se desea trabajar, creando nuevos tipos de clasificación. De esta manera, se propone reemplazar la Tabla 13 por la Tabla 26.

Tabla 26. Clasificación propuesta para las carreteras según su geometría

Tipo de carretera	Descripción	S + B (m/km)	Número S y B por km	C	e (%)	Máx. Vel (km/h)
T1	Recta y muy plana	30	1	$C < 3$	2	100
T2	Ligeramente Sinuosa y ligeramente ondulada	60	2	$3 \leq C < 15$	3	90
T3	Sinuosa y poco ondulada (casi plana)	30	2	$15 \leq C < 50$	4	90
T4	Sinuosa y ligeramente ondulada	60	2	$50 \leq C < 75$	5	70
T5	Sinuosa y muy ondulada	80	3	$75 \leq C < 150$	6	65
T6	Muy Sinuosa y ligeramente ondulada	60	3	$150 \leq C < 300$	7	55
T7	Muy Sinuosa y muy ondulada	120	4	$C \geq 300$	8	45

Nota: Elaboración propia

En donde:

C:	Curvatura media del tramo ver Figura 6
$S + B$:	Subidas más bajadas (m/km) ver Figura 7
e:	Peralte (%) ver Figura 8

Estos tipos de carretera no solo sirven para evaluar emisiones del transporte automotor de carga, sino también pueden servir y aplicarse a diferentes metodologías para estimar costos de operación vehicular, evaluar proyectos carreteros y representar de una mejor forma las condiciones y geometría a las cuales se exponen los vehículos en su trayecto por un tramo de carretera. Adicionalmente, la propuesta se puede replicar en diferentes países y casos de estudio, según las características específicas que se tengan.

5.7 Velocidad de camiones según clasificación de carreteras propuesta

La velocidad de los camiones tiene una influencia directa en la cantidad de emisiones producidas por el transporte automotor de carga. Por tal motivo es muy importante definir a qué velocidad circulan estos camiones por las carreteras propuestas en la Tabla 26.

5.7.1 Velocidad de diseño de carreteras en Colombia

Para encontrar la velocidad máxima de cada tipo de carretera en Colombia se puede partir de la Tabla 27 que presenta información del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, la cual presenta los valores de velocidad de diseño en tramos homogéneos de carretera, en función de la pendiente longitudinal de la carretera y su categoría. Sin embargo, debe tenerse presente que hay diferencias entre velocidades de diseño y de operación, especialmente para el caso de camiones.

Tabla 27. Velocidad de diseño carreteras colombianas

Categoría de la carretera	Tipo de terreno	Velocidad de diseño de un tramo homogéneo (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Primaria de una calzada	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Secundaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Terciaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										

Nota: Reproducción de "Manual de Diseño Geométrico de Carreteras", Instituto Nacional de Vías (2008)

5.7.2 Uso de GPS para medir velocidad

Con el fin de tener variables de los vehículos usados en el transporte automotor de carga de Colombia para el trabajo investigativo, se envió carta a 25 empresas transportadoras de carga (con algunas de ellas se coordinó reuniones para explicar el proyecto), con el fin de obtener algunos registros de los GPS que se tienen instalados en los vehículos (para ver el formato de la carta enviada remítase al *Anexo 04*). El listado de las empresas no se presenta por temas de confidencialidad. De las empresas contactadas, se pudo obtener información de 513 vehículos repartidos principalmente en categorías C3S3, C3S2, C2S3, C3 y C2G, con un total de 3088 viajes por diferentes partes del país, en los que se tenían diferente tipo de mercancía y pesos desde 1.5 toneladas hasta 35 toneladas, según la carga a transportar y el vehículo usado para dicha operación.

Para poder obtener la información de velocidad vehicular se tomaron los valores de los registros de GPS entregados por las empresas. Cabe mencionar que en muchas ocasiones los GPS entregaban una sábana de datos la cual podía tener muchas variables (ver Tabla 28), motivo por el cual se debió elegir las variables que serían de utilidad para el estudio. Para este caso, se tomaron las más representativas: coordenadas (podían variar según el sistema con que estaban configuradas), velocidad, altitud, fecha, y hora.

Tabla 28. Ejemplo datos GPS de un camión

Tipo de novedad	Reporte x distancia
Fecha	9/10/2019 0:00
Ubicación	CO,Bolivar,Cartagena,Carretera A Mamonal - Rel: Cr 56-0 a 326m de:Peaje Mamonal
Velocidad (km/h)	74
RPM	1295
Latitud	10.357.679
Longitud	-75.504.932
Altitud (msnm)	9
Dirección	306Âº Sureste
Distancia lineal (m)	0
CSQ	14
HDOP	0.8
Odómetro (km)	1702951.39
Odómetro parcial (km)	0
Hora metro	3287.56
Voltaje batería	13.7
Voltaje batería interna	4
ID del conductor	36078
RPM del motor	1295
(ECT) Temperatura del refrigerante	88
(FDS) Estado del ventilador	15
(PTO) PTO enganchado	3

Nota: Elaboración propia a partir de datos GPS de camión de una empresa

Una vez realizado el filtro de las variables que iban a ser de utilidad al trabajo investigativo, se realizó una primera aproximación a las velocidades de los camiones en las carreteras colombianas. Sin embargo, el mínimo de tiempo en el cual los registros de GPS entregados por las empresas reportaban datos, era de 5 minutos, lo cual generaba una serie de errores en el momento de identificar una velocidad para cada tipo de camión en unas condiciones específicas. Sin embargo, esto ayudó a tener una idea de en cuánto podía oscilar el valor de la velocidad.

5.7.3 Velocidades INVIAS

La oficina asesora de planeación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) ha utilizado el HDM-4 con el fin de encontrar los costos de operación vehicular en diferentes tipos de carreteras; en 2016 realizaron un ejercicio con el software, en el cual tenían la velocidad (km/h) de camiones con 2 ejes, C2S1, C3S2 y C3S3 que circulaban por carreteras pavimentadas. Para esta evaluación con HDM-4, INVIAS adaptó los tipos de carretera de la

Tabla 13, y utilizó los 6 tipos de carretera descritos en la Tabla 29, sin tener en cuenta el tipo de carretera T3 – poco sinuosa y poco ondulada (casi plana). En los tipos de carreteras usados por el INVIAS, la pendiente longitudinal máxima de las carreteras no representa las condiciones colombianas, pues ésta toma como escarpado aquellas con pendientes iguales o mayores de 4% aproximadamente.

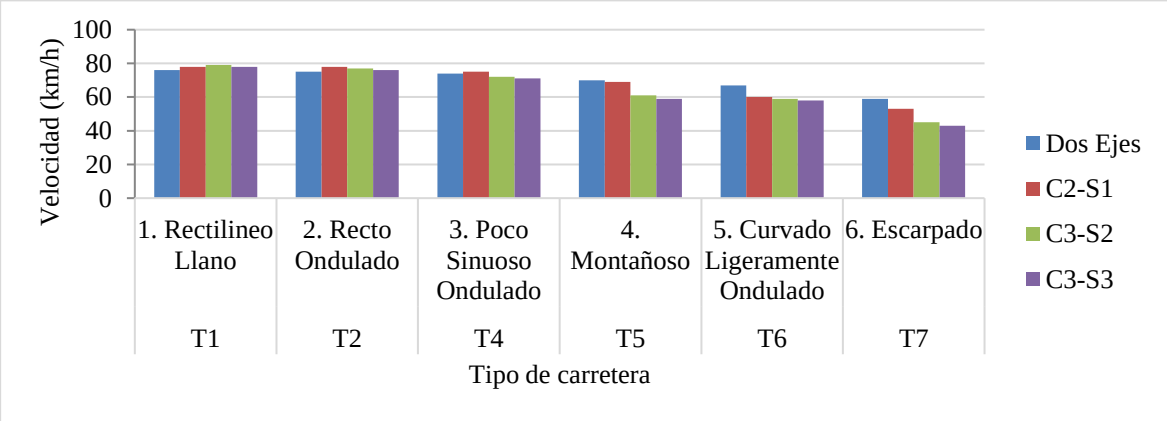
Tabla 29. Tipos de carretera evaluación económica INVIAS

Tipo de Terreno	Subidas + Bajadas (m/km)	Curvatura Media Horizontal (°/km)
1. Rectilíneo Llano	1	3
2. Recto Ondulado	10	15
3. Poco Sinuoso Ondulado	15	75
4. Montañoso	25	150
5. Curvado Ligeramente Ondulado	20	300
6. Escarpado	40	500

Nota: Adaptación de "Costos de operación vehicular en vías pavimentadas ($/km) HDM IV", INVIAS, 2016

Con ayuda de los datos de la evaluación realizada por INVIAS, se elabora la Figura 22 en la cual se resume la velocidad de los camiones usada por el INVIAS según los 6 tipos de carretera con las cuales se realizó dicha evaluación económica. El *Anexo 05* presenta las velocidades por cada tipo de vehículo según los tipos de carretera usados en la evaluación económica realizada por el Instituto Nacional de Vías.

Figura 22. Velocidades de camiones INVIAS



Nota: Elaboración propia a partir de "Costos de operación vehicular en vías pavimentadas ($/km) HDM IV", INVIAS, 2016

5.7.4 Velocidades propuestas

Teniendo como punto de partida las velocidades de diseño de las carreteras, como las mediciones con GPS y las velocidades extraídas de la evaluación económica hecha por el

INVIAS, se proponen unas velocidades para las tipologías de camiones más usadas en el transporte interurbano de mercancías en Colombia, y a las cuales se les quiere conocer las emisiones según el tipo de carretera por la que transitan.

El promedio de la velocidad de cada tipo de vehículo es muy importante para poder obtener otro tipo de datos, entre ellos las emisiones producidas. En las investigaciones realizadas por Odoki y Kerali (2006) se afirma que las velocidades que desarrollan cada uno de los vehículos dependen de diferentes variables, por ejemplo, el tipo de vehículo, características de las carreteras, flujos de tráfico, entre otros.

Para poder tener un punto de partida de las emisiones producidas por los camiones durante el proceso de transporte de mercancías entre ciudades, se puede realizar la suposición que dichos vehículos circulan por los diferentes tipos de carretera a flujo libre, es decir, se hace la suposición que las condiciones del tráfico en la carretera no van a ser motivo de restricciones a la velocidad.

El software HDM-4 calcula una velocidad a flujo libre para cada tipo de vehículo. Dicha velocidad está basada en mínimos probabilísticos de las limitantes de velocidad los cuales están dados por la potencia de conducción, capacidad de frenado, curva de la carretera, rugosidad de la superficie y la velocidad deseada. Adicionalmente, se debe tener en cuenta si se está analizando la velocidad en ascenso o en descenso (Odoki & Kerali, 2006).

La velocidad a flujo libre en ascenso está dada por la ecuación *(8)*.

$$VS_{ku} = \frac{exp\left[\frac{\sigma^2}{2}\right]}{\left[\left(\frac{1}{VDRIVEu}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VBRAKEu}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VCURVE}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VROUGH}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{VDESIR}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right]^{\beta}} \qquad (8)$$

Donde:

σ: SPEED_SIG parámetro modelo de Weibull (ver *Anexo 06*)

β: SPEED_BETA parámetro modelo de Weibull (ver *Anexo 06*)

VS_{ku}: Velocidad de estado para el segmento en ascenso (m/s)

$VDRIVEu$: Velocidad limitada por el gradiente y la potencia de conducción usada para el ascenso (m/s) (ver *Anexo 06*)

$VBRAKEu$: Velocidad limitada por el gradiente y la potencia de frenado en ascenso (m/s) (ver *Anexo 06*)

$VCURVE$: Velocidad limitada por la curva (m/s) (ver *Anexo 06*)

$VROUGH$: Velocidad limitada por la rugosidad (m/s) (ver *Anexo 06*)

$VDESIR$: Velocidad deseada bajo condiciones ideales (m/s) (ver *Anexo 06*)

El parámetro β de la ecuación está determinado por la distribución de velocidades limitantes de Weibull; a medida que este parámetro se aproxima a cero, la velocidad media es próxima al mínimo de las cinco velocidades limitantes. En sus investigaciones, Odoki & Kerali (2006) afirman que Watanatada en 1987, decía que el parámetro σ es el error estándar. Se recomienda remitirse al *Anexo 06* para verificar todos las ecuaciones y parámetros con los cuales se puede encontrar la velocidad de los camiones.

Para el cálculo y desarrollo de la ecuación *(8)*, se realizan unas suposiciones y adaptaciones a características de Colombia. Por ejemplo, se asume que los vehículos de carga circulan en promedio con un peso bruto vehicular (PBV) del 70% del que permite la norma; esto acorde con que cerca del 30% de los camiones viaja sin carga (vacio) según algunos estudios (Posada Henao, 2012). Adicionalmente, se realizaron otro tipo de suposiciones las cuales modificaban algunas variables con las cuales dependían los parámetros de la ecuación *(8)*, como por ejemplo la potencia del motor, área frontal del vehículo, Speed Beta, Multiplicador CD, entre otros. De esta forma, se analizaron y compararon los resultados de cada una de éstas. La Tabla 30 presenta un ejemplo en el cual se comparan las 9 opciones que se realizaron para poder obtener una velocidad de los vehículos de carga que se pudiera utilizar para el análisis de las emisiones. Para identificar los cambios que se realizaron en cada una de las opciones diríjase al *Anexo 07*.

Tabla 30. Ejemplo comparativo de opciones de velocidad para vehículo C2G

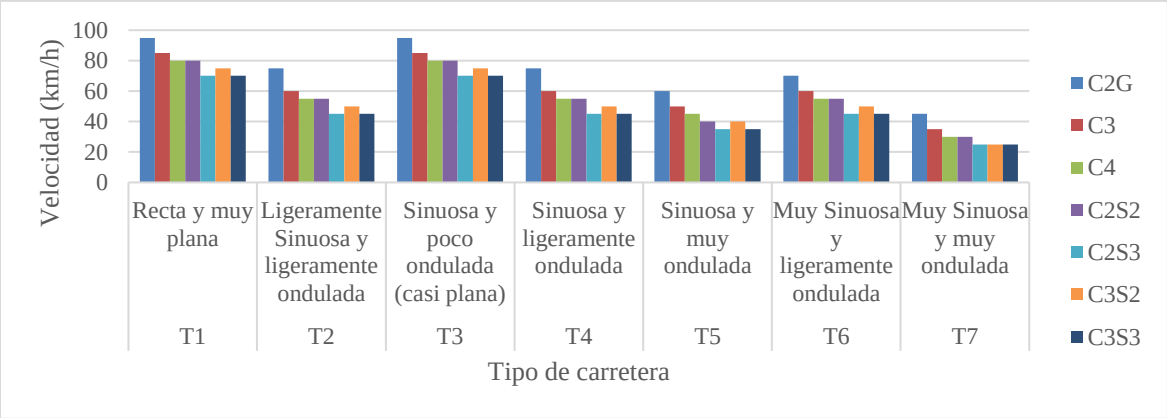
		Velocidad (km/h)								
Tipo de carretera	**Descripción**	**Op 1**	**Op 2**	**Op 3**	**Op 4**	**Op 5**	**Op 6**	**Op 7**	**Op 8**	**Op 9**
T1	Recta y muy plana	64.51	99.22	100.9	92.49	59.38	98.97	90.17	98.97	98.97
T2	Ligeramente Sinuosa y ligeramente ondulada	40.61	83.79	53.59	81.81	39.45	77.44	72.05	77.44	77.44
T3	Sinuosa y poco ondulada (casi plana)	64.50	98.96	100.80	92.45	59.38	98.72	89.89	98.72	98.72
T4	Sinuosa y ligeramente ondulada	40.60	83.02	83.46	81.52	39.45	77.00	71.52	77.00	77.00
T5	Sinuosa y muy ondulada	31.93	72.1	72.06	71.49	31.46	63.97	60.83	63.97	63.97
T6	Muy Sinuosa y ligeramente ondulada	40.57	79.19	81.49	78.00	39.44	74.62	68.97	74.62	74.62
T7	Muy Sinuosa y muy ondulada	22.19	53.99	54.33	54.05	22.07	45.99	44.88	45.99	45.99

Nota: Elaboración propia

Dentro de las variables que se calibraron a las condiciones colombianas para poder encontrar la velocidad de los camiones de carga en el transporte interurbano de mercancías, se identificó que un parámetro que era muy representativo era la potencia del vehículo. Por defecto, el HDM-4 tiene unas potencias preestablecidas; sin embargo, éstas no eran acorde a las condiciones de los camiones en la zona de estudio. Por lo anterior, se consultaron y analizaron diferentes fichas técnicas de camiones representativos para las carreteras colombianas, y se obtuvieron unas potencias representativas con las cuales se podrían obtener valores de velocidad que representaran de la mejor forma la realidad. Para verificar el proceso utilizado para obtener las potencias de los camiones y los resúmenes de las fichas técnicas diríjase al *Anexo 08.*

La Figura 23 presenta en resumen las velocidades propuestas, las cuales se obtienen como la mejor opción de las que se analizaron con la calibración de las ecuaciones y se consideran lógicos al ser consultados con expertos. El gráfico muestra como la velocidad de los vehículos disminuye al aumentar la pendiente longitudinal de la carretera y al tener mayor número de curvas. La relación peso-potencia hace que algunos vehículos no sean óptimos para el transporte de carga en toneladas, y sean más útiles para el transporte de volumen. Para consultar todo el desarrollo de las fórmulas, y las diferentes variables que actúan en el cálculo de las velocidades, remítase al *Anexo 09.*

Figura 23. Velocidades propuestas



Nota: Elaboración propia

5.8 Metodología para clasificar un tramo de carretera según propuesta

Con el fin de poder analizar las rutas y clasificar diferentes tramos de carretera, se decidió contactar y visitar diferentes entidades del gobierno entre las cuales se encontraba el Ministerio de Transporte de Colombia y el INVIAS. Sin embargo, la información suministrada por éstas no fue suficiente para realizar dicha clasificación, por tal motivo, con

la ayuda de los registros GPS—información por donde circula la carga interurbana por carretera y simulaciones—se logró clasificar los tramos de carretera.

Para clasificar un tramo de carretera, según la clasificación de carretera propuesta en el numeral 5.6.4, se debe identificar qué ruta se va a analizar, en dicha ruta se debe analizar la pendiente longitudinal de la carretera y la curvatura media horizontal cada cierta distancia, con el fin de evaluar si las características son constantes a medida que se avanza en distancia. Cuando la pendiente longitudinal o la curvatura cambien, según la Tabla 26, se considera el fin del tramo, y se comienza a evaluar un nuevo tramo de carretera.

5.8.1 Rutas con uso de GPS

Con la base de datos del GPS suministrados por algunas empresas, fue posible graficar los puntos tomados durante el recorrido de un vehículo; en este proceso, era muy importante trabajar siempre con un mismo sistema de coordenadas, en caso de que la base de datos se encontrara en otro sistema, se debía transformar cada uno de los datos al sistema deseado. Cómo es el caso de la Tabla 31 —la cual presenta un ejemplo de un cambio de coordenadas realizado a los datos GPS de un trayecto entre Cartagena y Medellín realizado por medio de un vehículo de 5 líneas de rotación—, las coordenadas entregadas por el GPS se encontraban en coordenadas geográficas y para el trabajo investigativo se optó por el uso de UTM, WGS84.

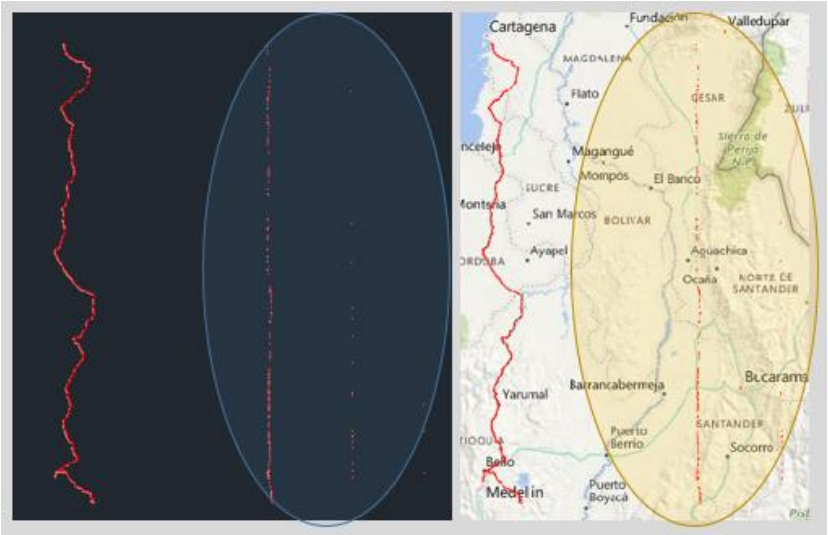
Tabla 31. Ejemplo de Transformación de coordenadas

Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM		ID,X,Y
	Longitud	Latitud	Este (X)	Norte (Y)	
1	-75.504932	10.357679	444722.64	1145002.96	1,444722.64,1145002.96
2	-75.501761	10.354592	445069.25	1144661.08	2,445069.25,1144661.08
3	-75.497118	10.354246	445577.5	1144622.03	3,445577.5,1144622.03
4	-75.496975	10.354159	445593.14	1144612.38	4,445593.14,1144612.38
5	-75.496285	10.353047	445668.49	1144489.31	5,445668.49,1144489.31
6	-75.495048	10.348659	445803.16	1144003.92	6,445803.16,1144003.92
7	-75.494662	10.347185	445845.17	1143840.88	7,445845.17,1143840.88
8	-75.495114	10.345127	445795.33	1143613.4	8,445795.33,1143613.4
9	-75.496651	10.343828	445626.83	1143470.03	9,445626.83,1143470.03
10	-7.549703	10.342951	658792.51	1143691.63	10,658792.51,1143691.63
11	-75.496561	10.342483	445636.46	1143321.3	11,445636.46,1143321.3
12	-75.495721	10.342386	445728.41	1143310.43	12,445728.41,1143310.43
13	-75.491289	1.034229	445340.01	114317.73	13,445340.01,114317.73

Nota: Elaboración propia

Para visualizar la ruta, se exportó la columna ID,X,Y de la Tabla 31 a un archivo de texto (.txt) el cual se importó desde AutoCAD con el fin de poder obtener la nube de puntos del recorrido. Puede suceder que en muchos casos se presenten puntos que parecieran no estar acorde al recorrido (ver Figura 24). Lo anterior se debe a posibles pérdidas en la señal del GPS al momento de tomar los datos, también puede suceder que en una coordenada se presenten varios puntos debido a que el vehículo puede estar detenido es por esto es que se debe tener cuidado, analizar muy bien las bases de datos y eliminar las inconsistencias. Para el ejemplo mostrado en la Figura 24, en el recorrido realizado por el camión de 5 ejes, se tenían 3,377 puntos registrados por el GPS. Luego de eliminar los datos con errores se obtuvieron 2,362 registros. Para visualizar todos los datos tomados por el GPS durante este recorrido, diríjase al *Anexo 010*.

Figura 24. Perdida de señal GPS

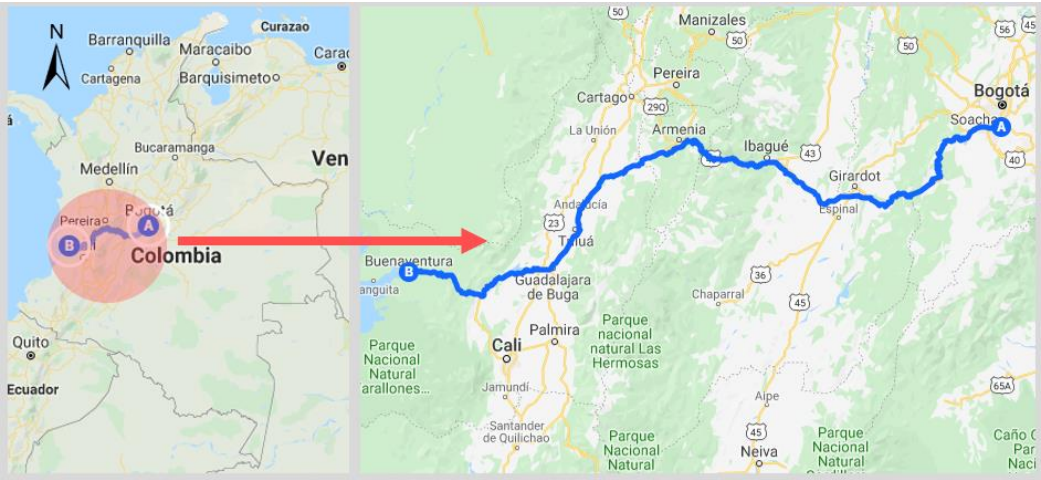


Nota: Elaboración propia

5.8.2 Simulación de rutas

Para poder simular una ruta que se desee analizar, se debe comenzar plasmando las carreteras por la cuales se circula desde un origen A hasta un destino B. Para ello, tal como lo muestra la Figura 25, se puede hacer uso de la herramienta My Maps de Google la cual permite obtener las indicaciones en vehículo liviano entre dos puntos, al mismo tiempo que permite adaptar o escoger la vía cruce por cruce por la cual se quiere que se realice el recorrido.

Figura 25. Ruta Bogotá - Buenaventura



Nota: Elaboración propia usando My Maps de Google

Como para ir de un punto a otro existen varias posibilidades, la ruta a analizar por medio de la simulación, debe coincidir con los datos oficiales en los cuales el Ministerio de Transporte de Colombia tiene registro que se transporta la mercancía, es decir, que los corredores viales se escogen según la información que reposa en el SICE-TAC.

Una vez trazada la ruta, se debe exportar como un archivo .kml, el cual se debe abrir en software especializado (e.g., Google Earth), con el fin de poder eliminar visualmente (para evitar errores en el archivo y que quede únicamente la ruta sin puntos) los puntos o pasos obligados que se seleccionaron para poder obtener el corredor vial por donde circula la carga. Se aclara que, al forzar la ruta por unos puntos específicos, el archivo .kml que se crea queda marcado visualmente con unos puntos que poseen datos que pudieran generar errores, al eliminar dichos puntos se evita los errores y no se altera la selección de la ruta que se realizó en My Maps de Google. Con la ayuda de Google Earth es posible obtener el perfil longitudinal del trayecto tal como lo muestra la Figura 26, del cual se puede obtener el perfil longitudinal del trayecto, con dicho perfil es posible obtener una aproximación de las pendientes longitudinales de la carrera, lo cual es muy útil para la clasificación de ésta.

Figura 26. Perfil longitudinal

Nota: Elaboración propia con "Google Earth Pro", Google LLC, 2019

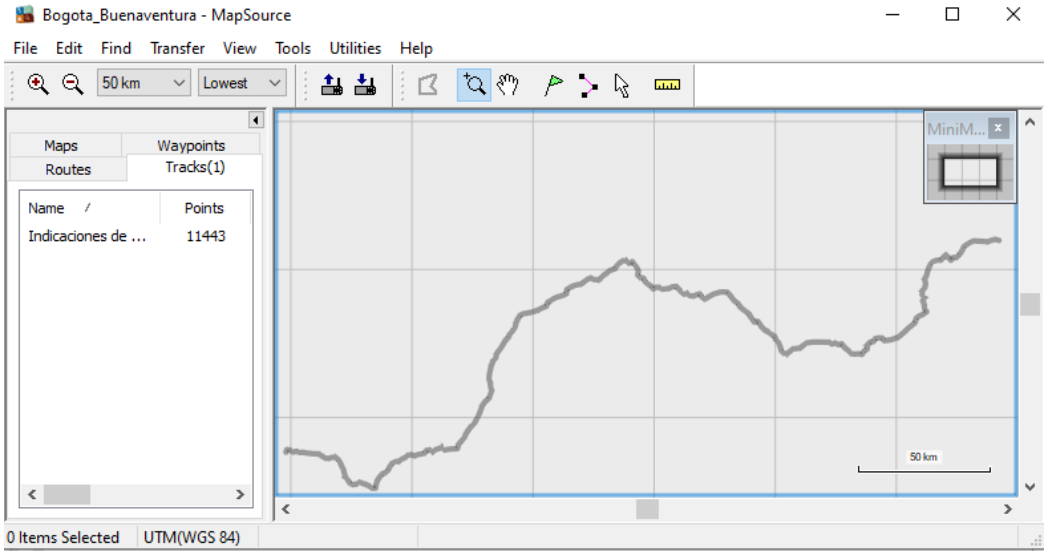
Una vez se obtiene el perfil longitudinal de la carretera, se debe exportar otro archivo en formato .kml, el cual se debe cargar en un simulador GPS, con el fin de simular un recorrido GPS de un vehículo; para este caso, se realizó por intermedio de GPS visualizer. Sin embargo, este paso se puede realizar por intermedio de otras opciones, como por ejemplo alguna API (Application Programming Interface) de Google Maps. La Figura 27 muestra la interfaz de la aplicación GPS visualizer, la cual convierte los datos de un archivo .kml en un archivo .gpx el cual puede ser leído por los GPS.

Figura 27. Simulador GPS

Nota: Reproducción de "GPS Visualizer", AdamSchneider, 2019

Una vez se realiza la simulación GPS del recorrido, se obtiene un archivo de extensión .gpx, el cual es posible abrirlo en software como Map Source de Garmin (ver Figura 28). Por intermedio de este software, es posible visualizar diferentes variables de cada punto de un recorrido GPS, entre las cuales se encuentra la longitud, latitud y altitud, dichas variables puedes ser exportadas a manera de base de datos, como un archivo de texto el cual puede ser analizado por ejemplo en Microsoft Excel.

Figura 28. Ruta simulada en Map Source



Nota: Elaboración propia con "Map Source", Garmin, 2010

La base de datos que se obtiene a partir de la simulación GPS del recorrido puede ser usada para diferentes tipos de análisis. Adicionalmente, se puede usar para graficar el recorrido en otros softwares tales como Civil 3D, ArcGIS, entre otros.

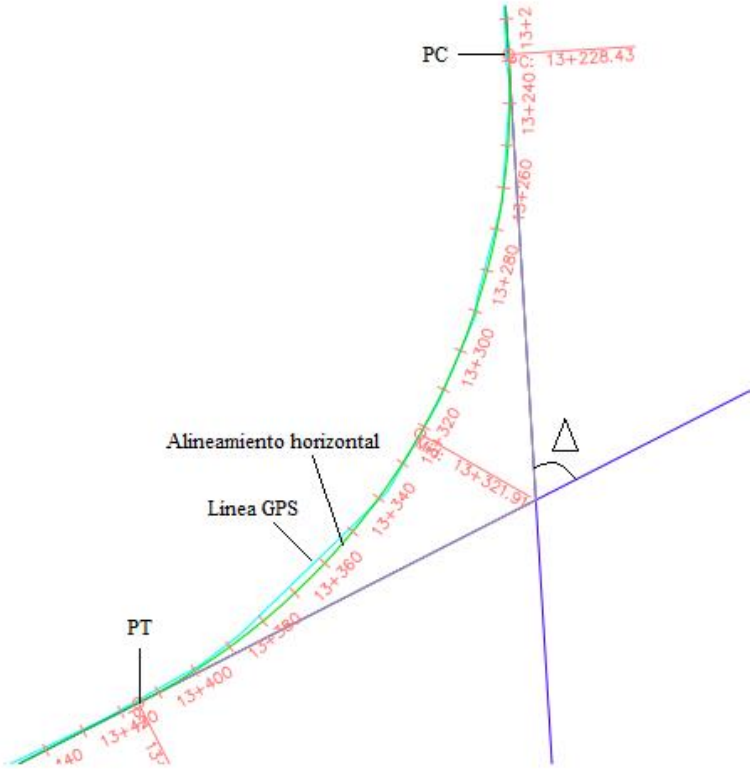
5.8.3 Alineamiento horizontal de la carretera

Para poder obtener las emisiones producidas por los camiones de carga utilizando la herramienta HDM-4, es necesario conocer el alineamiento horizontal de la carretera, con el cual es posible calcular algunos factores que son necesarios para poder conocer la clasificación de la carretera según su geometría.

Para esto, se requiere importar los datos de los recorridos o simulaciones con GPS en algún software especializado, por ejemplo, Civil 3D, con el cual se pueda crear una nube de puntos que se obtiene de las coordenadas que posee la base de datos del archivo .txt creado luego de la simulación del recorrido por GPS. Es necesario unir toda esa nube de puntos en orden ascendente, con el fin de tener todo el recorrido tal como se simuló. A partir de esto, se debe construir el alineamiento horizontal de la carretera, teniendo como referencia la polilínea que muestra el recorrido del vehículo desde el origen hasta el destino.

Es muy importante este alineamiento, pues se requiere de los diferentes ángulos de deflexión que conforman cada una de las curvas (ver Figura 29) y la distancia del recorrido, para poder aplicar la ecuación *(4)* y así poder obtener la curvatura media horizontal, la cual ayuda para la clasificación de las carreteras, según la Tabla 26.

Figura 29. Curva del alineamiento horizontal



Nota: Elaboración propia con "Civil 3D", Autodesk, 2018

Una vez construido todo el alineamiento horizontal, se exporta y se debe enlazar con el perfil longitudinal de la carretera, de esta forma se podrá tener variables de curvatura y de pendiente para poder dividir la ruta en diferentes tramos y de esta forma analizar a qué tipo de carretera de las propuestas para el trabajo investigativo pertenece cada tramo. Para cada tramo existirá un tipo de carretera (de las 7 propuestas) y una longitud de tramo la cual será variable.

5.8.4 Casos de aplicación

El corredor Bogotá – Buenaventura es uno de los corredores estratégicos para el transporte de mercancía en Colombia, dicho corredor no solo conecta la capital del país con una de las ciudades principales como lo es Cali, sino también con uno de los principales puertos del país, como lo es el puerto de Buenaventura, el cual es uno de los que tiene mayor flujo de carga contenerizada (MinTransporte, 2019b)

Por ser de gran importancia para el país, y al identificar que en el trayecto se tiene diferente topografía, se decidió para el trabajo investigativo hallar los diferentes tramos de carretera según la clasificación propuesta en la Tabla 26. Una vez realizada toda la metodología que se propuso para clasificar los diferentes tramos se identificó que en la ruta Bogotá – Buenaventura, se tenían un total de 141 tramos agrupados en los 7 tipos de carretera propuestos. Se realizó el mismo proceso para la ruta Cartagena – Medellín, la cual representa otro corredor muy importante para el transporte de carga del país; para este caso, se encontraron 187 tramos de carretera agrupados en 6 tipos de carretera de la Tabla 26

La Tabla 32 presenta un ejemplo de los datos encontrados en la ruta Bogotá – Buenaventura. Dicho ejemplo muestra 13 tramos de carretera entre el kilómetro 0 y el 52.69, es de notar que los tramos tienen diferentes longitudes debido a las características de la carretera. Para visualizar la clasificación por tramos de carretera de las rutas Bogotá – Buenaventura y Cartagena – Medellín revise el *Anexo 11*. Adicionalmente, en dicho anexo, se puede encontrar todos los archivos con los cuales se logró clasificar los tramos de carretera.

Tabla 32. Ejemplo clasificación de ruta por tramos

ID	Tipo	Longitud del tramo (km)	Acumulado ruta analizada (km)
001	T1	2.18	T1 0.00 - 2.18
002	T3	25.17	T3 2.18 - 27.34
003	T4	1.17	T4 27.34 - 28.51
004	T5	1.97	T5 28.51 - 30.49
005	T3	1.19	T3 30.49 - 31.68
006	T4	0.22	T4 31.68 - 31.91
007	T5	0.53	T5 31.91 - 32.43
008	T7	0.13	T7 32.43 - 32.56

ID	Tipo	Longitud del tramo (km)	Acumulado ruta analizada (km)
009	T5	6.94	T5 32.56 - 39.50
010	T3	1.73	T3 39.50 - 41.23
011	T4	4.33	T4 41.23 - 45.56
012	T5	1.13	T5 45.56 - 46.69
013	T4	6.00	T4 46.69 - 52.69

Nota: Elaboración propia

5.9 Transito Promedio Diario (TPD)

Cada año, el INVIAS realiza conteos durante siete días consecutivos por las diferentes carreteras del país; con lo cual le permite conocer los volúmenes de tránsito y establecer la clase y cantidad de vehículos que transitan por un tramo de carretera. Las categorías en las cuales agrupa los conteos están definidas en automóviles (A), buses (B), camiones pequeños de dos ejes (C2-P), camiones grandes de dos ejes (C2-G), camiones de tres ejes y cuatro ejes (C3-C4), camiones de cinco ejes (C3-S2) y camiones de seis o más ejes (C3-S3) (INVIAS 2018). En la información de las estaciones, y tal como lo presenta la Figura 30 las categorías vehiculares utilizadas son autos, C2P, C2G, C3 y C4, C5 y >C5.

Figura 30. Clasificación vehículos en conteos INVIAS

Nota: Reproducción de "Volúmenes de tránsito". INVIAS (2018)

5.9.1 TPD - Estaciones INVIAS

Uno de los parámetros a suponer para poder realizar las simulaciones en HDM-4, es el TPD de la carretera a analizar. Para esto se consultó los registros del INVIAS de diferentes estaciones en algunos de los principales corredores viales del país, dicha información se puede consultar en el *Anexo 12*. Con los TPD de las diferentes estaciones, se realizaron

promedios analizando que la estación no se encontrara en lugares considerados como urbanos, de esta forma se reduciría los errores para obtener un TPD de carreteras rurales.

La Tabla 33 presenta un ejemplo de los datos que se recopilan en las estaciones de conteo. Para este ejemplo, se tienen dos estaciones, las número 405 y 1153. Cada estación es única y tiene un número diferente, con el fin de poderla ubicar en el territorio nacional, dentro de la demás información que da cada estación, se encuentra el territorio en el cual está ubicada la estación, el sector y el conteo total de vehículos. Dicho conteo, lo presenta en porcentajes de autos, buses y camiones. Como los camiones son una variable tan importante para diferentes estudios y diseños, se presentan los totales semanales según su clasificación.

Tabla 33. Ejemplo datos estaciones de conteo vehicular

Estación	405	1153
Territorial	Huila	Tolima
Sector	Altamira - Orrapihuasi	Variante De Girardot
TPD	2647	11669
% automóviles	69	48
% buses	6	9
% camiones	25	43
Total camiones	657	5067
C2P	265	1429
C2G	282	883
C3 y C4	40	569
5 ejes	8	585
6 o más ejes	62	1601

Nota: Adaptado de "Volúmenes de tránsito". INVIAS (2018)

En algunas fuentes de consulta, también es posible encontrar la información de la estación de conteo, de una forma gráfica tal como lo muestra la Figura 31 en la cual se evidencia aspectos tan importantes como el número de identificación de la estación, el sector donde está ubicado, el TPD y los porcentajes de autos, buses y camiones.

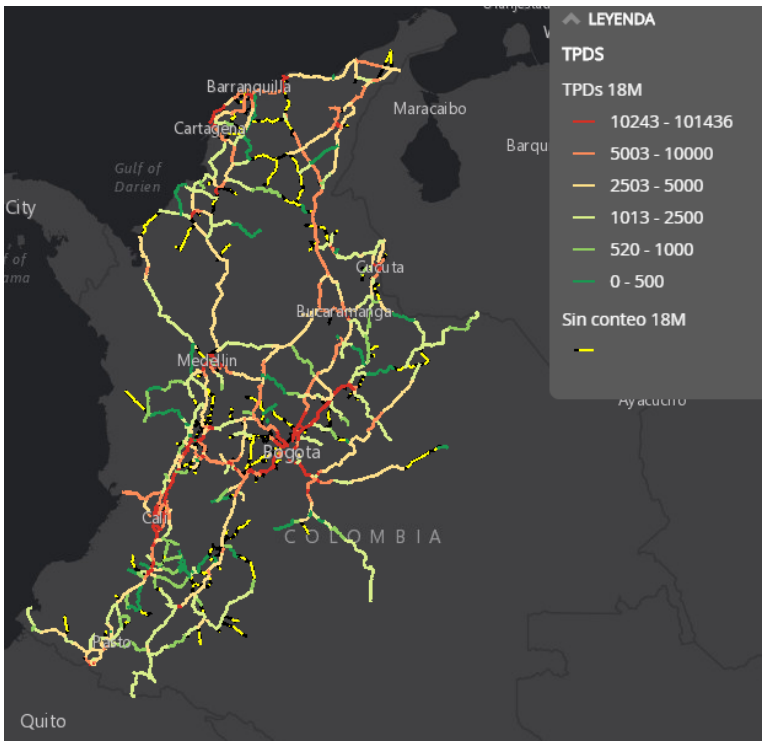
Figura 31. Información gráfica de la estación de conteo

Nota: Reproducción de "Volúmenes de tránsito". INVIAS (2018)

5.9.2 Propuesta de TPD específico en una ruta

Colombia es un país en donde las carreteras tienen mucha relevancia en el transporte de carga de una ciudad a otra, y tal como se ha visto en capítulos anteriores, los camiones son el modo más usado para realizar dicha actividad. En su afán por conocer y poner a disposición el TPD de los principales corredores viales de Colombia, el INVIAS tiene a disposición la galería de volúmenes de tránsito, la cual es una herramienta de fácil consulta, en donde se puede visualizar los corredores viales (ver Figura 32) con información referente al TPD de la zona.

Figura 32. Carreteras donde se tiene registros de conteos vehiculares



Nota: Reproducción de "Volúmenes de tránsito". INVIAS (2018)

Para diferentes rutas, se tomó el registro de todas las estaciones del recorrido. Posteriormente, se analizaron cuáles estaciones estaban en una zona rural, con el fin de excluir los TPD que se veían muy influenciados por las ciudades cercanas. La Tabla 34 presenta un ejemplo del proceso anteriormente descrito en la ruta Cartagena-Medellín en donde se señala en amarillo las estaciones que se tuvieron en cuenta para realizar los cálculos.

Tabla 34. Ejemplo estaciones ruta Cartagena - Medellín

Estación	Territorial	Sector	Conteo Total	% automóviles	% buses	% camiones	Total camiones	C2P	C2G	C3 y C4	5 ejes	6 o más ejes
516	Bolívar	Turbaco-Cartagena	17441	69	14	17	2981	610	610	108	387	387
517	Bolívar	Arjona-Turbaco	5982	67	17	16	944	327	532	37	16	32
515	Bolívar	CRUZ DEL VISO-ARJONA	5389	42	9	49	2641	497	564	313	206	1061
506	Bolívar	María La Baja-Cruz Del Viso	2199	44	8	48	1060	318	200	113	84	345
992	Sucre	San Onofre-Maria La Baja	1797	41	6	53	946	195	217	125	93	316
505	Sucre	Toluviejo-San Onofre	2164	44	7	49	1060	226	284	139	114	297
503	Sucre	Toluviejo-El Toro	3456	50	8	42	1466	345	294	220	93	514
1076	Sucre	El Toro-Sincelejo	4845	58	6	36	1764	380	445	273	136	530
502	Sucre	Sampues-Sincelejo	12045	58	8	34	4077	1131	1043	448	228	1227
496	Córdoba	El Viajano-La Ye	2471	36	5	59	1461	136	297	148	96	784
498	Córdoba	Planeta Rica-El Viajano	2491	34	5	61	1528	312	252	154	147	663
486	Córdoba	La Apartada-Planeta Rica	4665	45	6	49	2305	590	506	242	196	771
743	Córdoba	CAUCASIA-LA APARTADA	3843	47	5	48	1850	436	506	168	121	619
484	Antioquia	Puerto Valdivia-Caucasia	3133	39	7	54	1711	462	343	149	147	610
479	Antioquia	Los Llanos-Puerto Valdivia	4252	38	10	52	2228	342	767	207	220	692
476	Antioquia	Don Matías-Los Llanos	4864	44	10	46	2229	577	690	219	170	573

Nota: Elaboración propia

Con las estaciones seleccionadas de cada una de las rutas analizadas, se realizaron diferentes operaciones matemáticas con el fin de encontrar los valores de TPD representativo para dicho trayecto. La Tabla 35 presenta la propuesta del TPD para algunas rutas en donde todas a excepción de Neiva – Florencia, hacen parte de los corredores viales por donde más circula carga en el país. Si desea conocer cuáles fueron las estaciones seleccionadas de cada ruta y las operaciones realizadas para obtener la propuesta de TPD, revise el *Anexo 13*.

Tabla 35. Propuesta TPD para diferentes rutas

Origen	Bogotá	Bogotá	Bogotá	Cartagena	Medellín	Bogotá	Neiva
Destino	Buenaventura	Medellín	Santa Marta	Medellín	Pasto	Neiva	Florencia
TPD	9210	5925	6553	3388	6752	6045	3743
% automóviles	41	44	39	42	44	59	60

% buses	7	8	6	7	10	10	10
% camiones	51.83	47.70	54.57	51.03	45.73	30.89	29.82
Total Camiones	4774	2826	3576	1729	3088	1867	1116
C2P	734.87	488.65	637.64	371.78	672.75	572.39	337.40
C2G	828.43	837.41	683.62	420.76	840.44	644.31	472.15
C3 y C4	485.71	295.79	334.81	179.90	357.59	123.87	77.86
5 Ejes	989.28	337.76	407.77	144.92	293.95	117.87	32.94
6 o más ejes	1735.71	866.39	1512.15	611.65	923.27	408.56	195.65

Nota: Elaboración propia

5.9.3 Propuesta de TPD genérico

Para poder obtener un TPD genérico o representativo de las carreteras de Colombia, se analizaron los TPD de los principales corredores viales del país, teniendo como punto de partida las rutas Bogotá-Buenaventura, Bogotá-Neiva, Bogotá-Santa Marta, Bogotá-Medellín, Medellín-Pasto y Cartagena-Medellín. La Tabla 36 presenta los porcentajes propuestos para un TPD genérico de Colombia. Este TPD puede ser útil para primeras aproximaciones de algunos trabajos, por ejemplo, el cálculo de emisiones. Es de recordar que los porcentajes aplicarían únicamente para carreteras rurales.

Tabla 36. Porcentaje de vehículos en propuesta de TPD genérico

TPD	6312
% automóviles	44.84
% buses	8.00
% C2P	9.19
% C2G	11.23
% C3	3.52
% C4 y C2S2	1.17
% C2S3	0.30
% C3S2	5.75
% C3S3	16.00

Nota: Elaboración propia

Teniendo presente los porcentajes propuestos para los diferentes tipos de vehículo, el 47.16% corresponderían a camiones, donde el número de camiones cuando se tiene un TPD de 6312 se describe en la Tabla 37. Como la propuesta es genérica y se sabe que en verdad cada tramo de carretera tiene un TPD diferente, si no se llegase poseer datos suficientes de cómo es la distribución vehicular de una carretera primaria y rural, se pudieran aplicar los porcentajes descritos en la Tabla 36 y calcular los nuevos valores de la Tabla 37.

Tabla 37. Número de camiones en propuesta TPD genérico

TPD	6312
% camiones	47.16
Total Camiones	2977
C2P	580
C2G	709
C3 y C4	296
5 Ejes	382
6 o más ejes	1010

Nota: Elaboración propia

5.10 Obtención de modelo para estimar emisiones

Tal como se mencionó en el Marco Teórico del presente trabajo, y luego de realizar un análisis comparativo del software disponible para el cálculo de emisiones, se decidió trabajar con HDM-4. Para ello, y teniendo en cuenta que se iba a realizar un trabajo macroscópico, se debió realizar una serie de suposiciones con el fin de poder tener todos los parámetros necesarios para el cálculo de emisiones. Es de recordar que el cálculo de las emisiones se enfocó en los vehículos más usados en el transporte automotor de carga entre las principales ciudades de mayor movimiento de mercancía las cuales se obtuvieron del SICE-TAC que se basa en el RNC.

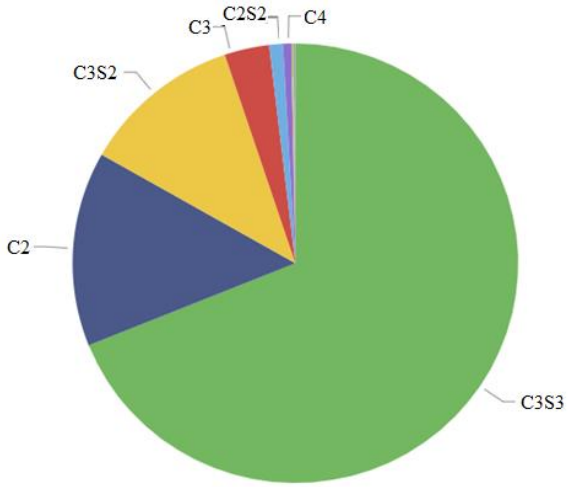
5.10.1 Parámetros generales de entrada en HDM-4

- **TPD**

Tal como se describió en el numeral 3.8, HDM-4 utiliza la categoría vehicular descrita en la Tabla 12. Los vehículos que se usaron en la simulación fueron livianos, buses, C2P, C2G, C3, C4 y C2S2, C2S3, C3S2 y C3S3. Por tal motivo, se debió tomar los datos de TPD del INVIAS, y agruparlos en las configuraciones vehiculares a analizar. Para esto, se tomaron los datos de la Tabla 37 y se agruparon según los datos registrados en 2017 en el Portal Logístico de Colombia. Se tomaron los valores de 2017 debido a que los de 2018 y 2019 aún no se encuentran tan completos como los del año seleccionado.

Según lo recopilado por el Ministerio de Transporte de Colombia por medio del Registro Nacional de Carga, para 2017 se movilizaron aproximadamente 107 millones de toneladas en poco más de 7 millones de viajes (MinTransporte, 2019b). La distribución vehicular en la cual se movió dicha carga se encuentra ilustrada en la Figura 33.

Figura 33. Configuración vehicular para carga transportada en 2017



Nota: Reproducción de "Viajes y toneladas movilizadas durante el 2017", Ministerio de Transporte de Colombia (2019b)

De la Figura 33 y teniendo en cuenta los datos del Portal Logístico de Carga, se puede inferir la Tabla 38, la cual se construye teniendo en cuenta las principales configuraciones vehiculares en las cuales se mueve carga en Colombia.

Tabla 38. Participación de carga movida en 2017 según configuración vehicular

Camión	Toneladas (%)
C2	14.31
C3	3.25
C4	0.1
C2S3	0.59
C2S2	0.99
C3S2	11.64
C3S3	68.91
Otros	0.21

Nota: Adaptación de "Viajes y toneladas movilizadas durante el 2017", Ministerio de Transporte de Colombia (2019b)

Se debió entonces que agrupar los datos del Portal Logístico de Carga, del INVIAS y de HDM-4, de tal forma que teniendo en cuenta los valores de la Tabla 36 y la Tabla 38, más algunos cálculos necesarios, fue posible construir la Tabla 39 la cual contiene el TPD y los porcentajes por tipo de vehículo que se usan en la simulación de HDM-4 para el presente trabajo.

Tabla 39. TPD usado en simulación con HDM-4

TPD	6312
Automóviles (%)	44.84
Buses (%)	8.00
C2P (%)	9.19
C2G (%)	11.23
C3 (%)	3.52
C4 y C2S2 (%)	1.17
C2S3 (%)	0.30
C3S2 (%)	5.75
C3S3 (%)	16.00

Nota: Elaboración propia

- **Clima**

Colombia es un país que debido a su topografía presenta diferentes tipos de climas, dependiendo en su mayoría de la altura a la que la región se encuentre sobre el nivel del mar. Los pisos térmicos que se pueden encontrar en el país son cálido, templado, frío y si la altura es muy elevada (más de 3,000 m.s.n.m.) se conoce como páramo. Debido a su topografía también es probable encontrar en el país diferentes tipos de humedad. El software opera con 5 tipos de humedad que van desde árido hasta muy húmedo. Además, con 5 tipos de temperatura que van desde tropical hasta moderadamente helado. Se decide trabajar con una clasificación por temperatura subtropical y con una clasificación por humedad subhúmeda lo anterior debido a que en Colombia en su mayoría los climas que predominan en el país son los tropicales y los templados de los cuales se destaca de cada uno el tropical húmedo y el mediterráneo oceánico, que entre estos dos tipos de clima no alcanzan a cubrir ni el 50% de todo el país. Destacan también los climas tropical subhúmedo y tropical seco. Entre estos 4 tipos de clima se tiene aproximadamente el 80% de los climas que se presentan en el país.

- **Tipo de carretera**

Para la simulación con HDM-4 se consideró que las carreteras eran de dos carriles, puesto que esta es la configuración más representativa de las carreteras en el país para la comunicación entre ciudades. Para la carretera, se utilizaron los valores por defecto de un uso interurbano, puesto que el enfoque del trabajo es el transporte entre las diferentes ciudades.

- **Potencia vehicular**

A los vehículos de interés, los cuales eran el C2G, C3, C4, C2S2, C3S2, C3S3 se les modificó la potencia (en el software) según las fichas técnicas consultadas que correspondían a las marcas de vehículos de carga más comunes y comerciales en el territorio nacional. De esta forma, se utilizaron los valores descritos en la Tabla 40

Tabla 40. Potencia de camiones

Clasificación	Potencia (kW)
C2	185
C3	240
C4	320
C2S	250
C3S	330

Nota: Elaboración propia

Para revisar e identificar todos los parámetros usados en la simulación realizada en HDM-4 remítase al *Anexo 14* el cual contiene el espacio de trabajo configurado para el cálculo de las emisiones del presente trabajo (si desea visualizar este anexo debe tener instalado HDM-4 en su ordenador).

5.10.2 Resultados obtenidos

Al ejecutar el análisis de un proyecto con HDM-4 se puede activar la opción de emisiones, la cual entrega como resultado las emisiones en gramos de 1000 vehículos - kilómetro. Las emisiones se entregan por cada tipo de vehículo que se incluye en el análisis. Tal como se describe en el marco teórico, HDM-4 tiene en cuenta 7 tipos de emisiones. Sin embargo, para el presente trabajo solo se analizan 6 emisiones, puesto que el Plomo (Pb) en los camiones considerados para el transporte interurbano de carga es nulo, lo anterior debido a que este contaminante está estrechamente relacionado al tipo de combustible del vehículo y en su mayoría, los camiones con configuración C2G o mayor utilizan ACPM. Muchos de los C2P si utilizan gasolina. Sin embargo, éstos no se tuvieron en cuenta pues por su capacidad de carga se consideraron de un uso más urbano.

Los resultados más relevantes encontrados con HDM-4 de las emisiones, los puede consultar en el *Anexo 15*. A partir de ellos, se pueden construir desde la Tabla 41 hasta la Tabla 47, es decir 7 tablas, en las cuales se puede identificar las emisiones unitarias para cada tipo de carretera de las propuestas para el trabajo investigativo (emisiones por kilómetro) según el tipo de vehículo. Los gráficos de Tabla 41 hasta la Tabla 47 se encuentran en el análisis de resultados.

Tabla 41. Emisiones de un camión en carretera T1

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	0.745	4.373	11.546	0.654	991.647	0.196
C3	0.833	5.003	13.248	0.752	1138.864	0.225
C4-C2S2	0.842	5.379	14.344	0.819	1236.255	0.244
C2S3	0.877	6.152	16.571	0.955	1433.092	0.283
C3S2	1.459	0.398	24.803	0.597	1695.773	0.334
C3S3	1.511	0.426	26.007	0.624	1786.774	0.352

Nota: Elaboración propia

Tabla 42. Emisiones de un camión en carretera T2

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	1.229	4.940	12.299	0.659	1033.812	0.204
C3	0.949	6.915	18.696	1.081	1619.014	0.319
C4-C2S2	1.000	7.650	20.779	1.206	1802.140	0.355
C2S3	1.190	9.326	25.389	1.476	2203.708	0.434
C3S2	2.308	0.578	38.066	0.926	2570.540	0.507
C3S3	2.500	0.619	41.066	1.000	2768.453	0.546

Nota: Elaboración propia

Tabla 43. Emisiones de un camión en carretera T3

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	0.799	4.204	10.940	0.612	934.780	0.184
C3	0.839	4.997	13.217	0.750	1135.798	0.224
C4-C2S2	0.847	5.380	14.340	0.819	1235.637	0.244
C2S3	0.881	6.156	16.575	0.955	1433.234	0.283
C3S2	1.526	0.379	25.101	0.611	1692.995	0.334
C3S3	1.577	0.410	26.353	0.638	1789.405	0.353

Nota: Elaboración propia

Tabla 44. Emisiones de un camión en carretera T4

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	1.261	4.909	12.146	0.647	1018.482	0.201
C3	1.033	7.010	18.820	1.081	1625.760	0.321
C4-C2S2	1.079	7.748	20.920	1.208	1810.692	0.357
C2S3	1.222	9.368	25.452	1.477	2207.579	0.435
C3S2	2.323	0.575	38.146	0.929	2571.278	0.507
C3S3	2.507	0.618	41.105	1.002	2768.820	0.546

Nota: Elaboración propia

Tabla 45. Emisiones de un camión en carretera T5

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	1.810	6.131	14.720	0.760	1219.726	0.240
C3	1.209	8.537	23.009	1.327	1990.352	0.392
C4-C2S2	1.331	9.604	25.943	1.499	2245.794	0.443
C2S3	1.657	11.956	32.295	1.865	2795.692	0.551
C3S2	3.106	0.680	48.968	1.210	3242.483	0.639
C3S3	3.352	0.736	52.901	1.307	3504.587	0.691

Nota: Elaboración propia

Tabla 46. Emisiones de un camión en carretera T6

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	1.412	4.900	11.829	0.614	982.412	0.194
C3	1.252	7.246	19.098	1.080	1639.142	0.323
C4-C2S2	1.268	7.977	21.236	1.211	1829.113	0.361
C2S3	1.356	9.538	25.699	1.481	2222.786	0.438
C3S2	2.443	0.548	38.810	0.956	2578.605	0.508
C3S3	2.580	0.601	41.504	1.018	2772.926	0.547

Nota: Elaboración propia

Tabla 47. Emisiones de un camión en carretera T7

Vehículo	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	2.492	8.254	19.712	1.012	1629.964	0.321
C3	1.818	12.100	32.415	1.859	2798.094	0.552
C4-C2S2	2.031	13.746	36.891	2.119	3186.351	0.628
C2S3	2.489	17.236	46.368	2.669	4008.295	0.790
C3S2	4.630	0.923	70.899	1.770	4632.896	0.913
C3S3	4.883	1.029	76.053	1.887	5008.588	0.988

Nota: Elaboración propia

5.10.3 Modelo para estimar emisiones

Con los resultados obtenidos, se puede obtener el modelo para el cálculo de emisiones para el transporte automotor de carga entre ciudades, el cual se basa fundamentalmente de la expresión *(9)*. Es de mencionar que el resultado obtenido para el modelo se basa en una sumatoria de modelos.

$$ET = \begin{bmatrix} ET_{HC} \\ ET_{CO} \\ ET_{NO_x} \\ ET_{PM} \\ ET_{CO_2} \\ ET_{SO_2} \end{bmatrix} \qquad (9)$$

Donde

ET: Emisiones totales del trayecto en kilogramos

$ET_{HC:}$ Emisiones totales de hidrocarburos en kilogramos

$ET_{CO:}$ Emisiones totales de monóxido carbono en kilogramos

$ET_{NO_x:}$ Emisiones totales de nitratos en kilogramos

ET_{PM}: Emisiones totales de partículas en kilogramos

ET_{CO_2}: Emisiones totales de carbono en kilogramos

ET_{SO_2}: Emisiones totales de dióxido de azufre en kilogramos

Cada una de las emisiones totales (por tipo de emisión) depende de la sumatoria de cada una de las emisiones de ese mismo contaminante, el cual a su vez depende de la cantidad de vehículos que están circulando de cada categoría, y de la distancia que recorren por cada tipo de carretera.

$$ET_{C_i} = \sum \left(C_{i_{C2G}} + C_{i_{C3}} + C_{i_{C4-C2S2}} + C_{i_{C2S3}} + C_{i_{C3S2}} + C_{i_{C3S3}} \right) \quad (10)$$

Donde:

ET_{C_i}:	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos
$C_{i_{C2G:}}$	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos para los camiones C2G
$C_{i_{C3}}$:	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos para los camiones C3
$C_{i_{C4-C2S2:}}$	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos para los camiones C2-C2S2
$C_{i_{C2S3}}$:	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos para los camiones C2S3
$C_{i_{C3S2}}$:	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos para los camiones C3S2
$C_{i_{C3S3}}$:	Emisiones totales del contaminante *i* en kilogramos para los camiones C3S3

Las emisiones totales de un contaminante *i* están dadas por la sumatoria de las emisiones producidas cuando un determinado número de vehículo transita por determinado tipo de carretera.

Para los hidrocarburos totales por tipo de configuración de camión se utilizan las ecuaciones *(11)* a *(16)*.

$$C_{HC_{C2G}} = (0.745 * DT1 + 1.229 * DT2 + 0.799 * DT3 + 1.261 * DT4 + 1.810 * DT5 + 1.412 * DT6 + 2.492 * DT7) \frac{NC_{C2G}}{1000} \quad (11)$$

$$C_{HC_{C3}} = (0.833 * DT1 + 0.949 * DT2 + 0.839 * DT3 + 1.033 * DT4 + 1.209 * DT5 + 1.252 * DT6 + 1.818 * DT7) \frac{NC_{C3}}{1000} \quad (12)$$

$$C_{HC_{C4-C2S2}} = (0.842 * DT1 + 1.000 * DT2 + 0.847 * DT3 + 1.079 * DT4 + 1.331 * DT5 + 1.268 * DT6 + 2.031 * DT7)\frac{NC_{C4-C2S2}}{1000} \quad (13)$$

$$C_{HC_{C2S3}} = (0.877 * DT1 + 1.190 * DT2 + 0.881 * DT3 + 1.222 * DT4 + 1.657 * DT5 + 1.356 * DT6 + 2.489 * DT7)\frac{NC_{C2S3}}{1000} \quad (14)$$

$$C_{HC_{C3S2}} = (1.459 * DT1 + 2.308 * DT2 + 1.526 * DT3 + 2.323 * DT4 + 3.106 * DT5 + 2.443 * DT6 + 4.630 * DT7)\frac{NC_{C3S2}}{1000} \quad (15)$$

$$C_{HC_{C3S3}} = (1.511 * DT1 + 2.500 * DT2 + 1.577 * DT3 + 2.507 * DT4 + 3.352 * DT5 + 2.580 * DT6 + 4.883 * DT7)\frac{NC_{C3S3}}{1000} \quad (16)$$

Donde:

$DT1$: Distancia en km del tipo de carretera 1

$DT2$: Distancia en km del tipo de carretera 2

$DT3$: Distancia en km del tipo de carretera 3

$DT4$: Distancia en km del tipo de carretera 4

$DT5$: Distancia en km del tipo de carretera 5

$DT6$: Distancia en km del tipo de carretera 6

$DT7$: Distancia en km del tipo de carretera 7

NC_i: Número de camiones de configuración *i*

Para el monóxido de carbono total por tipo de configuración de camión se utilizan las ecuaciones *(17)* a *(22)*.

$$C_{CO_{C2G}} = (4.373 * DT1 + 4.940 * DT2 + 4.204 * DT3 + 4.909 * DT4 + 6.131 * DT5 + 4.900 * DT6 + 8.254 * DT7)\frac{NC_{C2G}}{1000} \quad (17)$$

$$C_{CO_{C3}} = (5.003 * DT1 + 6.915 * DT2 + 4.997 * DT3 + 7.010 * DT4 + 8.537 * DT5 + 7.246 * DT6 + 13.100 * DT7)\frac{NC_{C3}}{1000} \quad (18)$$

$$C_{CO_{C4-C2S2}} = (5.379 * DT1 + 7.650 * DT2 + 5.380 * DT3 + 7.748 * DT4 + 9.604 * DT5 + 7.977 * DT6 + 13.746 * DT7)\frac{NC_{C4-C2S2}}{1000} \quad (19)$$

$$C_{CO_{C2S3}} = (6.152 * DT1 + 9.326 * DT2 + 6.156 * DT3 + 9.368 * DT4 + 11.956 * DT5 + 9.538 * DT6 + 17.236 * DT7)\frac{NC_{C2S3}}{1000} \quad (20)$$

$$C_{CO_{C3S2}} = (0.398 * DT1 + 0.578 * DT2 + 0.379 * DT3 + 0.575 * DT4 + 0.680 * DT5 + 0.548 * DT6 + 0.923 * DT7)\frac{NC_{C3S2}}{1000} \quad (21)$$

$$C_{CO_{C3S3}} = (0.426 * DT1 + 0.619 * DT2 + 0.410 * DT3 + 0.618 * DT4 + 0.736 * DT5 + 0.601 * DT6 + 1.029 * DT7)\frac{NC_{C3S3}}{1000} \quad (22)$$

Para los nitratos totales por tipo de configuración de camión se utilizan las ecuaciones *(23)* a *(28)*.

$$C_{NO_{x\,C2G}} = (11.546 * DT1 + 12.299 * DT2 + 10.940 * DT3 + 12.146 * DT4 + 14.720 * DT5 + 11.829 * DT6 + 19.712 * DT7)\frac{NC_{C2G}}{1000} \quad (23)$$

$$C_{NO_{x\,C3}} = (13.248 * DT1 + 18.696 * DT2 + 13.217 * DT3 + 18.820 * DT4 + 23.009 * DT5 + 19.098 * DT6 + 32.415 * DT7)\frac{NC_{C3}}{1000} \quad (24)$$

$$C_{NO_{x\,C4-C2S2}} = (14.344 * DT1 + 20.779 * DT2 + 14.340 * DT3 + 20.920 * DT4 + 25.943 * DT5 + 21.236 * DT6 + 36.891 * DT7)\frac{NC_{C4-C2S2}}{1000} \quad (25)$$

$$C_{NO_{x\,C2S3}} = (16.571 * DT1 + 25.389 * DT2 + 16.575 * DT3 + 25.452 * DT4 + 32.295 * DT5 + 25.699 * DT6 + 46.368 * DT7)\frac{NC_{C2S3}}{1000} \quad (26)$$

$$C_{NO_{x\,C3S2}} = (24.803 * DT1 + 38.066 * DT2 + 25.101 * DT3 + 38.146 * DT4 + 48.968 * DT5 + 38.810 * DT6 + 70.899 * DT7)\frac{NC_{C3S2}}{1000} \quad (27)$$

$$C_{NO_{x\,C3S3}} = (26.007 * DT1 + 41.066 * DT2 + 26.353 * DT3 + 41.105 * DT4 + 52.901 * DT5 + 41.504 * DT6 + 76.053 * DT7)\frac{NC_{C3S3}}{1000} \quad (28)$$

Para el material particulado por tipo de configuración de camión se utilizan las ecuaciones *(29)* a *(34)*.

$$C_{PM\,C2G} = (0.654 * DT1 + 0.659 * DT2 + 0.612 * DT3 + 0.647 * DT4 + 0.760 * DT5 + 0.614 * DT6 + 1.012 * DT7)\frac{NC_{C2G}}{1000} \quad (29)$$

$$C_{PM\,C3} = (0.752 * DT1 + 1.081 * DT2 + 0.750 * DT3 + 1.081 * DT4 + 1.327 * DT5 + 1.080 * DT6 + 1.859 * DT7)\frac{NC_{C3}}{1000} \quad (30)$$

$$C_{PM\,C4-C2S2} = (0.819 * DT1 + 1.206 * DT2 + 0.819 * DT3 + 1.208 * DT4 + 1.499 * DT5 + 1.211 * DT6 + 2.119 * DT7)\frac{NC_{C4-C2S2}}{1000} \quad (31)$$

$$C_{PM_{C2S3}} = (0.955 * DT1 + 1.476 * DT2 + 0.955 * DT3 + 1.477 * DT4 + 1.865 * DT5 + 1.481 * DT6 + 2.669 * DT7)\frac{NC_{C2S3}}{1000} \quad (32)$$

$$C_{PM_{C3S2}} = (0.597 * DT1 + 0.926 * DT2 + 0.611 * DT3 + 0.929 * DT4 + 1.210 * DT5 + 0.956 * DT6 + 1.770 * DT7)\frac{NC_{C3S2}}{1000} \quad (33)$$

$$C_{PM_{C3S3}} = (0.624 * DT1 + 1.000 * DT2 + 0.638 * DT3 + 1.002 * DT4 + 1.307 * DT5 + 1.018 * DT6 + 1.887 * DT7)\frac{NC_{C3S3}}{1000} \quad (34)$$

Las emisiones de dióxido de carbono totales por tipo de configuración de camión están dadas por las ecuaciones *(35)* a *(40)*.

$$C_{CO_{2_{C2G}}} = (991.647 * DT1 + 1033.812 * DT2 + 934.780 * DT3 + 1018.482 * DT4 + 1219.726 * DT5 + 982.412 * DT6 + 1629.964 * DT7)\frac{NC_{C2G}}{1000} \quad (35)$$

$$C_{CO_{2_{C3}}} = (1138.864 * DT1 + 1619.014 * DT2 + 1135.798 * DT3 + 1625.760 * DT4 + 1990.352 * DT5 + 1639.142 * DT6 + 2798.094 * DT7)\frac{NC_{C3}}{1000} \quad (36)$$

$$C_{CO_{2_{C4-C2S2}}} = (1236.255 * DT1 + 1802.140 * DT2 + 1235.637 * DT3 + 1810.692 * DT4 + 2245.794 * DT5 + 1829.113 * DT6 + 3186.351 * DT7)\frac{NC_{C4-C2S2}}{1000} \quad (37)$$

$$C_{CO_{2_{C2S3}}} = (1433.092 * DT1 + 2203.708 * DT2 + 1433.234 * DT3 + 2207.579 * DT4 + 2795.692 * DT5 + 2222.786 * DT6 + 408.295 * DT7)\frac{NC_{C2S3}}{1000} \quad (38)$$

$$C_{CO_{2_{C3S2}}} = (1695.773 * DT1 + 2570.540 * DT2 + 1692.995 * DT3 + 2571.278 * DT4 + 3242.483 * DT5 + 2578.605 * DT6 + 4632.896 * DT7)\frac{NC_{C3S2}}{1000} \quad (39)$$

$$C_{CO_2 C3S3} = (1786.774 * DT1 + 2768.453 * DT2 + 1789.405 * DT3 + 2768.820 * DT4 + 3504.587 * DT5 + 2772.926 * DT6 + 5008.588 * DT7)\frac{NC_{C3S3}}{1000} \quad (40)$$

Las emisiones de dióxido de azufre totales por tipo de configuración de camión están dadas por las ecuaciones *(41)* a *(46)*.

$$C_{CO_2 C2G} = (0.196 * DT1 + 0.204 * DT2 + 0.184 * DT3 + 0.201 * DT4 + 0.240 * DT5 + 0.194 * DT6 + 0.321 * DT7)\frac{NC_{C2G}}{1000} \quad (41)$$

$$C_{CO_2 C3} = (0.225 * DT1 + 0.319 * DT2 + 0.224 * DT3 + 0.321 * DT4 + 0.392 * DT5 + 0.323 * DT6 + 0.552 * DT7)\frac{NC_{C3}}{1000} \quad (42)$$

$$C_{CO_2 C4-C2S2} = (0.244 * DT1 + 0.355 * DT2 + 0.244 * DT3 + 0.357 * DT4 + 0.443 * DT5 + 0.361 * DT6 + 0.628 * DT7)\frac{NC_{C4-C2S2}}{1000} \quad (43)$$

$$C_{CO_2 C2S3} = (0.283 * DT1 + 0.434 * DT2 + 0.283 * DT3 + 0.435 * DT4 + 0.551 * DT5 + 0.438 * DT6 + 0.790 * DT7)\frac{NC_{C2S3}}{1000} \quad (44)$$

$$C_{CO_2 C3S2} = (0.334 * DT1 + 0.507 * DT2 + 0.334 * DT3 + 0.507 * DT4 + 0.639 * DT5 + 0.508 * DT6 + 0.913 * DT7)\frac{NC_{C3S2}}{1000} \quad (45)$$

$$C_{CO_2 C3S3} = (0.352 * DT1 + 0.546 * DT2 + 0.353 * DT3 + 0.546 * DT4 + 0.691 * DT5 + 0.547 * DT6 + 0.988 * DT7)\frac{NC_{C3S3}}{1000} \quad (46)$$

6. Análisis de resultados

Tal como se evidenció en el capítulo anterior, existen muchas variables para determinar las emisiones que se producen por el transporte automotor de carga entre ciudades. Adicionalmente, es muy importante tener claridad qué es lo que se desea calcular, puesto que de esto dependerá la complejidad del modelo; por ejemplo, no es lo mismo calcular emisiones de seis tipos de contaminante que de uno solo, o no es lo mismo calcular emisiones para todos los camiones que para uno en específico. A continuación, se presenta el análisis de resultados de los principales hallazgos de la tesis.

6.1 Emisiones producidas en tipos de carretera propuestas en la investigación

Con las emisiones unitarias presentadas desde la Tabla 41 a la Tabla 47, es posible construir nuevas tablas en las cuales se puede evaluar las emisiones unitarias de cierto tipo de vehículo cuando se encuentra por los diferentes tipos de carretera propuestas para el presente trabajo investigativo. Se puede entonces construir la Tabla 48 hasta la Tabla 53.

Tabla 48. Emisiones de un camión C2G

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	Monóxido de carbono CO	Nitratos NO_x	Partículas PM	Dióxido de Carbono CO_2	Dióxido de azufre SO_2
T1	0.745	4.373	11.546	0.654	991.647	0.196
T2	1.229	4.940	12.299	0.659	1033.812	0.204
T3	0.799	4.204	10.940	0.612	934.780	0.184
T4	1.261	4.909	12.146	0.647	1018.482	0.201
T5	1.810	6.131	14.720	0.760	1219.726	0.240
T6	1.412	4.900	11.829	0.614	982.412	0.194
T7	2.492	8.254	19.712	1.012	1629.964	0.321

Nota: Elaboración propia

Tabla 49. Emisiones de un camión C3

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
T1	0.833	5.003	13.248	0.752	1138.864	0.225
T2	0.949	6.915	18.696	1.081	1619.014	0.319
T3	0.839	4.997	13.217	0.750	1135.798	0.224
T4	1.033	7.010	18.820	1.081	1625.760	0.321
T5	1.209	8.537	23.009	1.327	1990.352	0.392
T6	1.252	7.246	19.098	1.080	1639.142	0.323
T7	1.818	12.100	32.415	1.859	2798.094	0.552

Nota: Elaboración propia

Tabla 50. Emisiones de un camión C4 y C2S2

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
T1	0.842	5.379	14.344	0.819	1236.255	0.244
T2	1.000	7.650	20.779	1.206	1802.140	0.355
T3	0.847	5.380	14.340	0.819	1235.637	0.244
T4	1.079	7.748	20.920	1.208	1810.692	0.357
T5	1.331	9.604	25.943	1.499	2245.794	0.443
T6	1.268	7.977	21.236	1.211	1829.113	0.361
T7	2.031	13.746	36.891	2.119	3186.351	0.628

Nota: Elaboración propia

Tabla 51. Emisiones de un camión C2S3

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
T1	0.877	6.152	16.571	0.955	1433.092	0.283
T2	1.190	9.326	25.389	1.476	2203.708	0.434
T3	0.881	6.156	16.575	0.955	1433.234	0.283
T4	1.222	9.368	25.452	1.477	2207.579	0.435
T5	1.657	11.956	32.295	1.865	2795.692	0.551
T6	1.356	9.538	25.699	1.481	2222.786	0.438
T7	2.489	17.236	46.368	2.669	4008.295	0.790

Nota: Elaboración propia

Tabla 52. Emisiones de un camión C3S2

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
T1	1.459	0.398	24.803	0.597	1695.773	0.334
T2	2.308	0.578	38.066	0.926	2570.540	0.507
T3	1.526	0.379	25.101	0.611	1692.995	0.334
T4	2.323	0.575	38.146	0.929	2571.278	0.507
T5	3.106	0.680	48.968	1.210	3242.483	0.639
T6	2.443	0.548	38.810	0.956	2578.605	0.508
T7	4.630	0.923	70.899	1.770	4632.896	0.913

Nota: Elaboración propia

Tabla 53. Emisiones de un camión C3S3

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
T1	1.511	0.426	26.007	0.624	1786.774	0.352
T2	2.500	0.619	41.066	1.000	2768.453	0.546
T3	1.577	0.410	26.353	0.638	1789.405	0.353
T4	2.507	0.618	41.105	1.002	2768.820	0.546
T5	3.352	0.736	52.901	1.307	3504.587	0.691
T6	2.580	0.601	41.504	1.018	2772.926	0.547
T7	4.883	1.029	76.053	1.887	5008.588	0.988

Nota: Elaboración propia

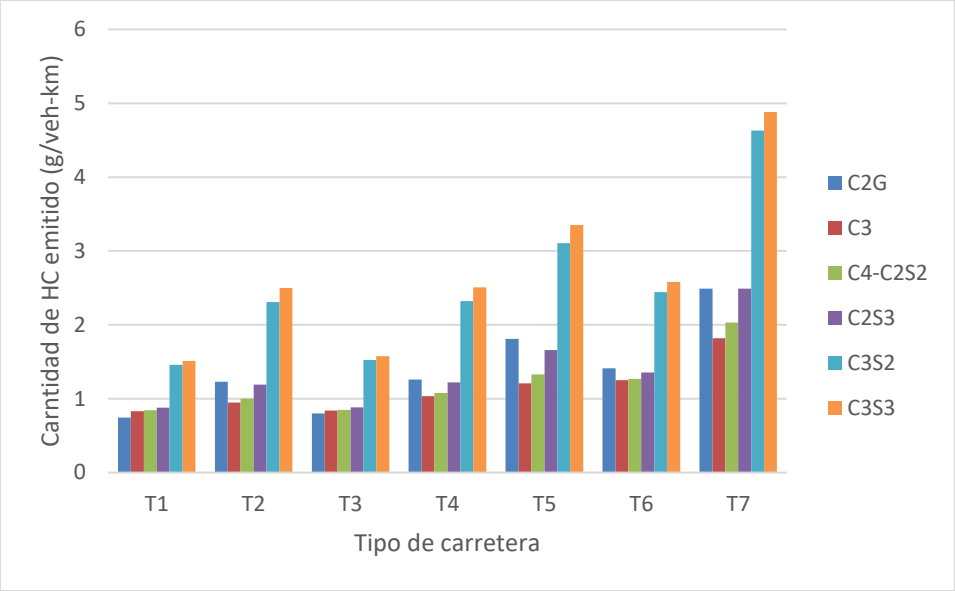
Al realizar un análisis desde la Tabla 48 hasta la Tabla 53, se puede observar cómo la cantidad de emisión (independientemente del contaminante), varían según el tipo de carretera por la cual circula el camión. Adicionalmente, se puede observar en dichas tablas, que, al aumentar la pendiente longitudinal de la carretera y la curvatura media de la misma, se tiene una influencia directa en las emisiones, causando un aumento de estas.

Para explicar lo anteriormente mencionado, se debe tener en cuenta que las carreteras tipo 1 son rectas y muy planas, las tipo 2 son ligeramente sinuosas y ligeramente onduladas, las tipo 3 son sinuosas y poco onduladas (casi planas), las tipo 4 son sinuosas y ligeramente onduladas, las tipo 5 son sinuosas y muy onduladas, las tipo 6 son muy sinuosas y ligeramente onduladas, finalmente las tipo 7 son muy sinuosas y muy onduladas. Lo anterior es muy importante tenerlo presente puesto que la pendiente longitudinal de las carretera tipo 2, 4 y 6 son similares, las tipo 1 y 3 también son similares, y las tipo 5 y 7 son similares.

Adicionalmente, las carreteras 3, 4 y 5 son sinuosas y las carreteras tipo 6 y 7 son muy sinuosas.

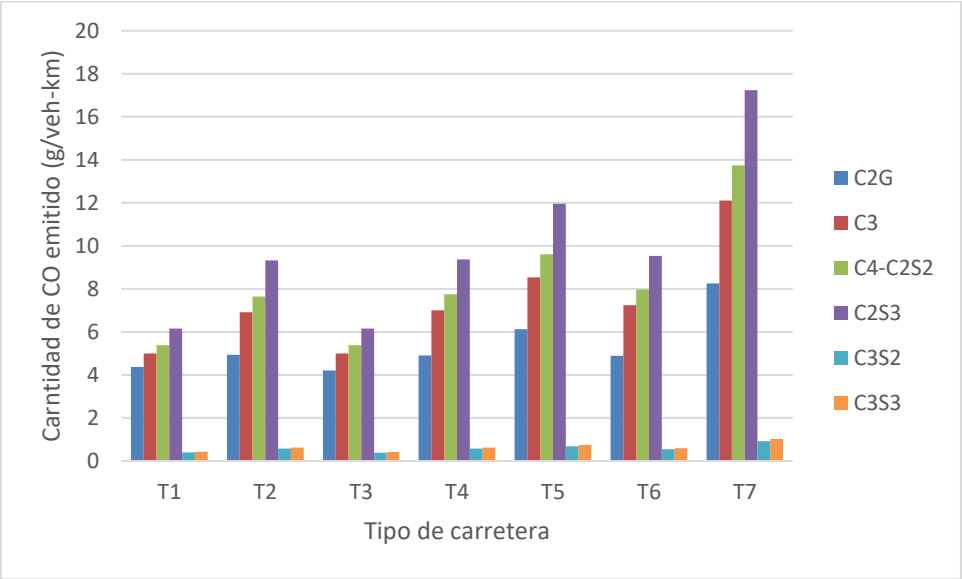
Con ayuda de la Tabla 48 hasta la Tabla 53 se pueden realizar la Figura 34 hasta la Figura 39, dichas figuras presentan la cantidad emitida por un camión de cada uno de los contaminantes analizados, y así visualizar cómo es el comportamiento de las emisiones por contaminante según la configuración del camión y el tipo de vía por la cual circula.

Figura 34. Cantidad estimada de HC emitido por un camión



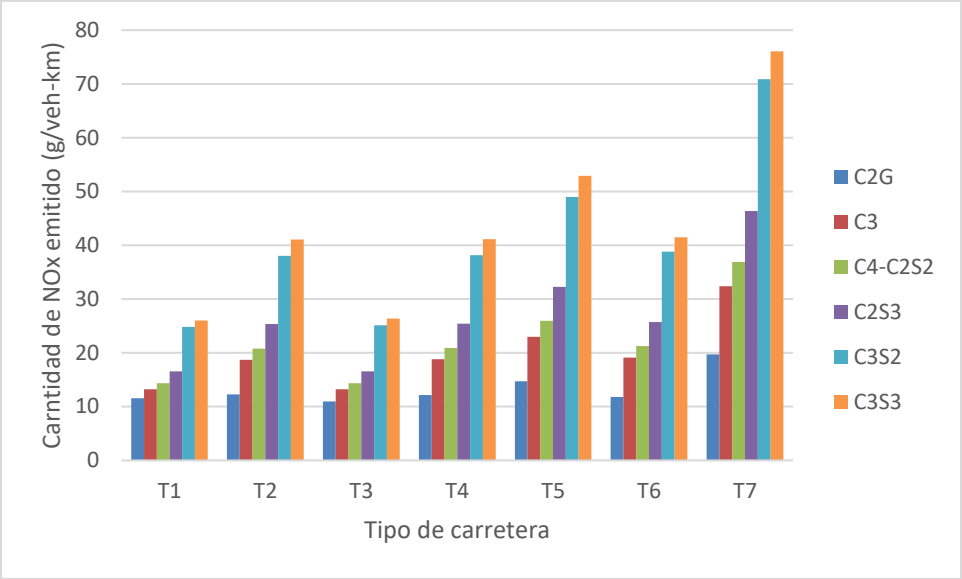
Nota: Elaboración propia

Figura 35. Cantidad estimada de CO emitido por un camión



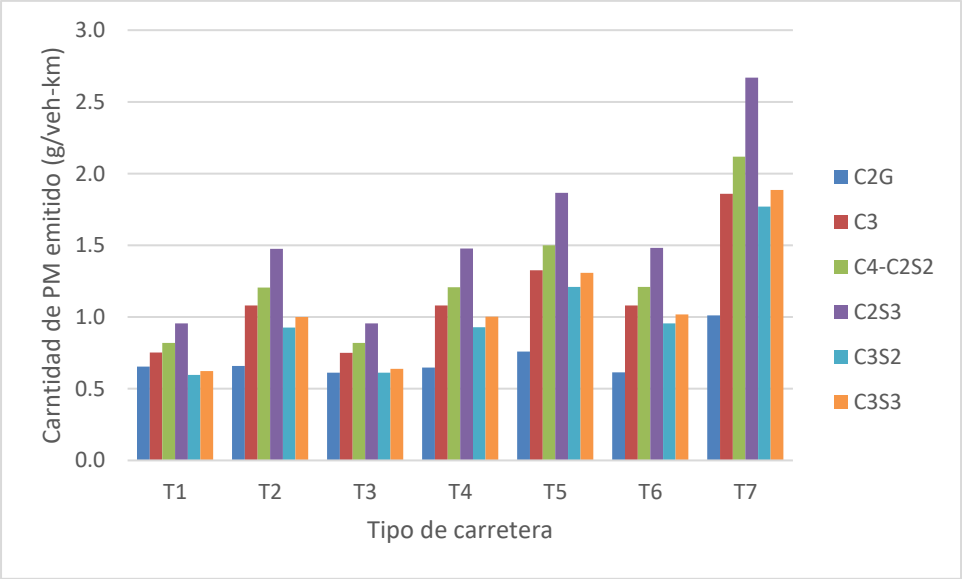
Nota: Elaboración propia

Figura 36. Cantidad estimada de NO_x emitido por un camión



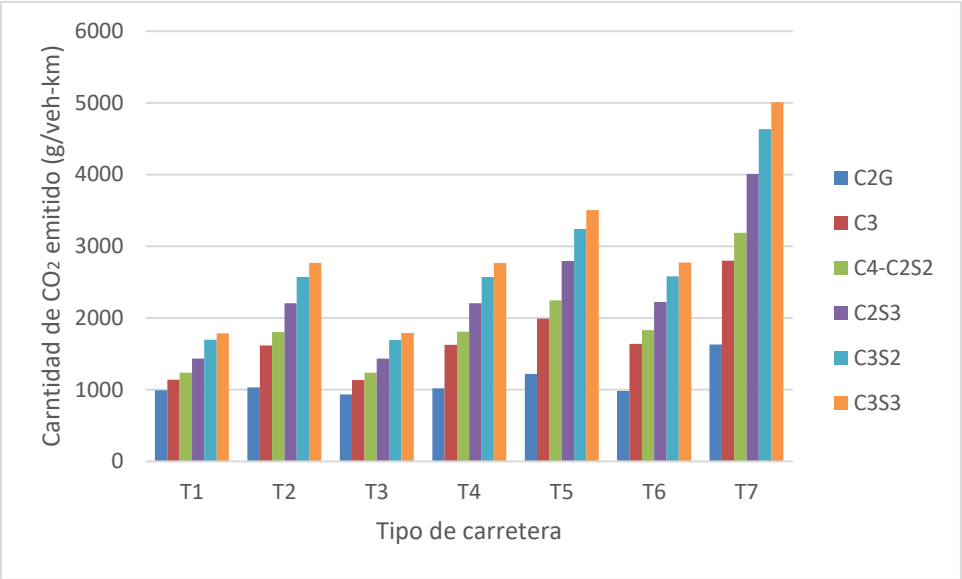
Nota: Elaboración propia

Figura 37. Cantidad estimada de PM emitido por un camión



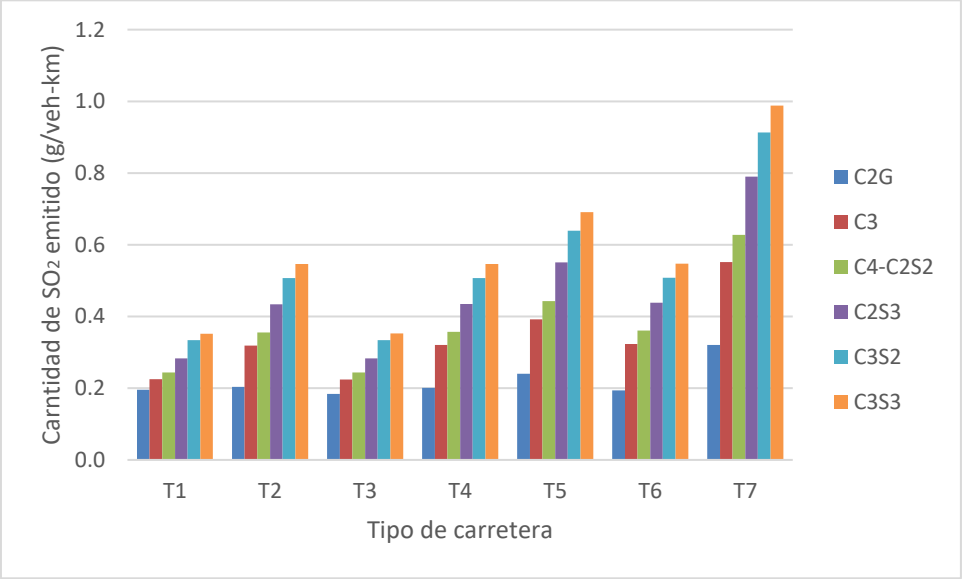
Nota: Elaboración propia

Figura 38. Cantidad estimada de CO_2 emitido por un camión



Nota: Elaboración propia

Figura 39. Cantidad estimada de SO_2 emitido por un camión



Nota: Elaboración propia

Cuando se analiza la Figura 34 hasta la Figura 39, se evidencia como a medida que la pendiente longitudinal de la carretera aumenta, las emisiones también lo hacen, siendo esta variable la que más influye en una carretera; por ejemplo al pasar de una carretera como la

tipo 1 que es plana a otra tipo 2 que es ligeramente ondulada, las emisiones producidas en la tipo 2 son mayores, y esto se repite por los diferentes tipos de carretera.

Sin embargo, y como se ha expresado, el grado de sinuosidad también afecta, por ejemplo, a pesar de que la carretera tipo 1 tiene la misma pendiente longitudinal que la tipo 3, las emisiones en la tipo 3 son mayores y esto se debe a que la sinuosidad horizontal es mayor en este tipo de carretera.

Para poder evaluar cómo afecta el cambio de pendiente longitudinal y el cambio de la curvatura media horizontal de la carretera a la cantidad de emisiones de cada contaminante, se realiza para cada uno de estos, tablas similares a las Tabla 54 y Tabla 55. Si desea visualizar cada una de dichas tablas, remítase al *Anexo 16*

La Tabla 54 muestra un ejemplo del porcentaje de cambio en las emisiones de Hidrocarburos al pasar de uno a otro tipo de curvatura media horizontal.

Tabla 54. Ejemplo de incremento de emisiones por cambio de curvatura media

Vehículo	**Cambio de HC emitido (%)**		
	Recta a Sinuosa	**Ligeramente sinuosa a Sinuosa**	**Sinuosa a Muy sinuosa**
C2G	6.76	2.54	10.69
C3	0.72	8.13	17.49
C4-C2S2	0.59	7.32	14.91
C2S3	0.45	2.62	9.88
C3S2	4.39	0.65	4.91
C3S3	4.19	0.28	2.83

Nota: Elaboración propia

Si se analizan todas las tablas similares a la Tabla 54 y presentadas en el *Anexo 16*, se puede observar como el cambio de curvatura media horizontal afecta aproximadamente hasta 17.49% a los HC, 5.01% a los CO, 5.54% a los NO_x, 6.86% al PM, 6.08% al CO_2 y 6.52% al SO_2.

La Tabla 55 muestra un ejemplo del porcentaje de cambio en las emisiones de Hidrocarburos al cambiar de uno a otro tipo de pendiente longitudinal de la carretera.

Tabla 55. Ejemplo de incremento de emisiones por cambio de pendiente

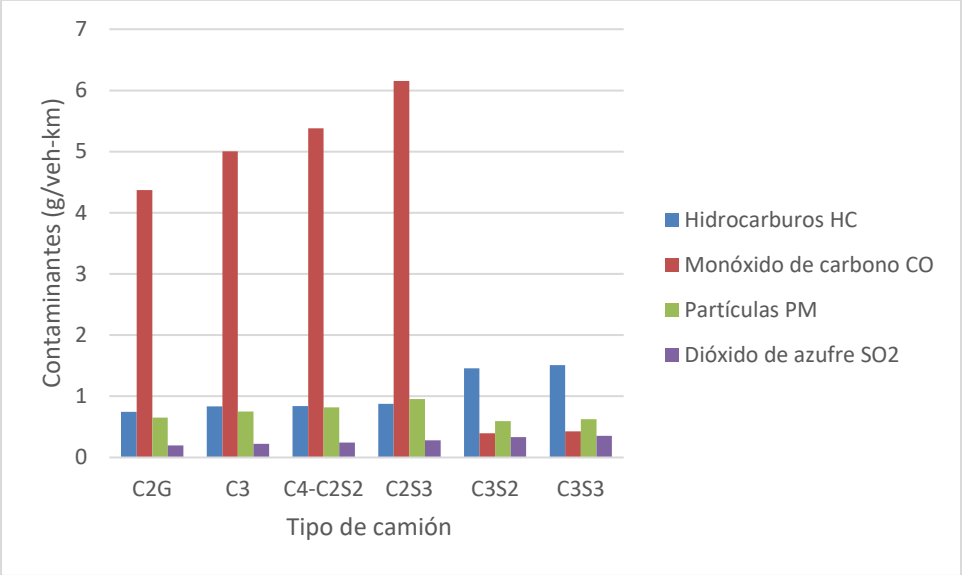
Vehículo	Cambio de HC emitido (%)	
	Plana a Ondulada	Ondulado a Montañoso
C2G	36.64	30.33
C3	18.78	14.56
C4-C2S2	21.50	18.93
C2S3	27.91	26.25
C3S2	34.31	25.21
C3S3	37.10	25.21

Nota: Elaboración propia

Al analizar todas las tablas similares a la Tabla 55 y presentadas en el *Anexo 16*, se puede observar como el cambio de pendiente longitudinal de la carretera afecta aproximadamente entre 14.56% y 37.10% a los HC, entre 14.36% y 34.29% a los CO, entre 9.93% y 35.89% a los NO_x, entre 5.41% y 36.33% al PM, entre 8.22% y 35.37% al CO_2 y entre 8.46% y 35.35% al SO_2.

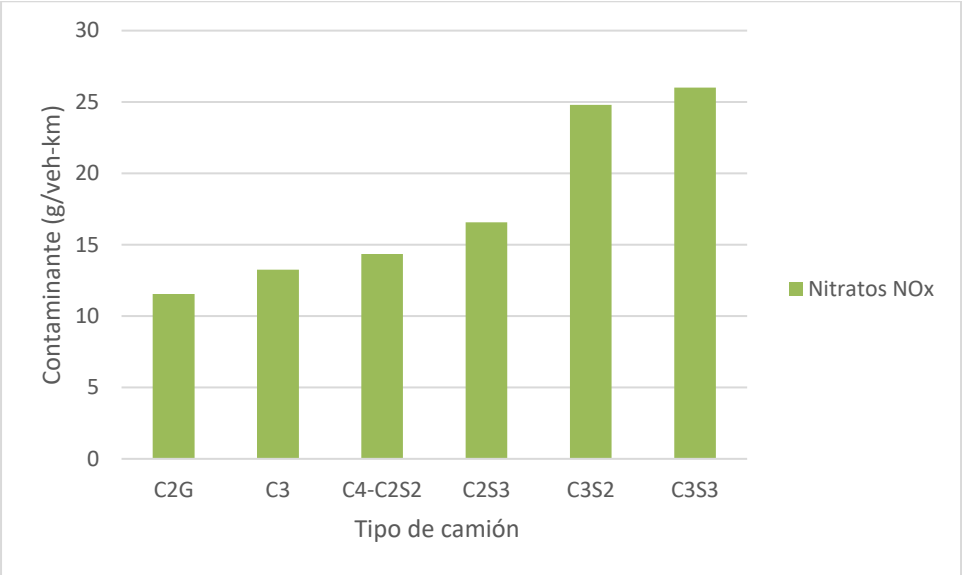
Si se quisieran comparar los 6 contaminantes analizados, respecto a la cantidad de gramos por kilómetro según el tipo de camión y según el tipo de carretera, se tendrían que unificar en un mismo gráfico, sin embargo, la cantidad elevada de Nitrato y Dióxido de Carbono no dejaría evidenciar otro tipo de contaminantes como los Hidrocarburos, las Partículas y el Dióxido de Azufre, tal como lo muestra las Figura 40 a Figura 42, las cuales presentan un ejemplo de las carreteras tipo 1. Si desea ver figuras similares para cada uno de los siete tipos de carretera, diríjase al *Anexo 16.*

Figura 40. Cantidad de emisiones (g/veh-km) de un camión en carreteras tipo 1



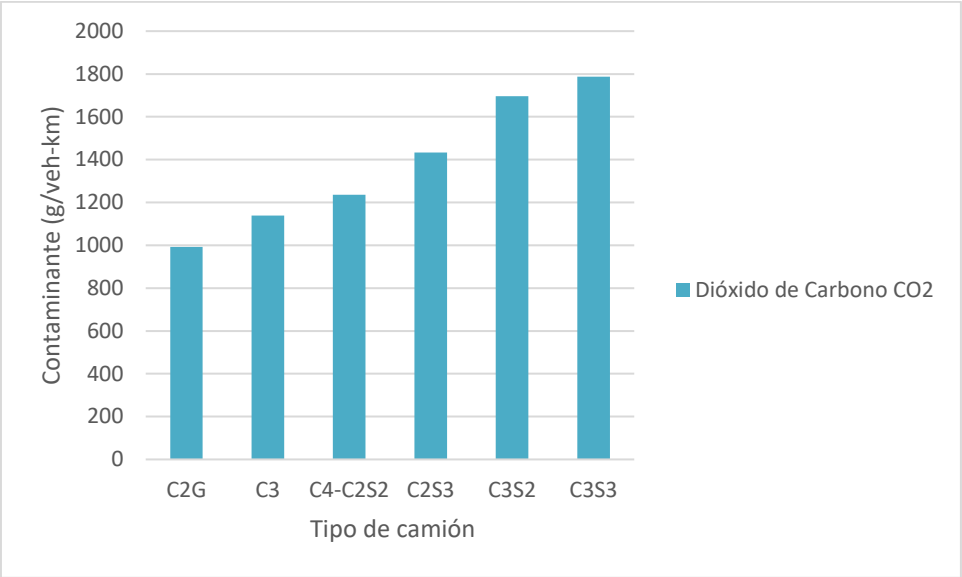
Nota: Elaboración propia

Figura 41. Cantidad de NO_x (g/veh-km) de un camión en carreteras tipo 1



Nota: Elaboración propia

Figura 42. Cantidad de CO_2 (g/veh-km) de un camión en carreteras tipo 1



Nota: Elaboración propia

La diferencia de gramos por kilómetro de cada tipo de contaminante para un mismo tipo de carretera y camión se debe a que cada contaminante tiene unos efectos adversos de acuerdo con la cantidad de un determinado contaminante que se emita. Por ejemplo, el Dióxido de Azufre es nocivo para las personas cuando se tienen valores iguales y superiores a 300 microgramos por metro cúbico de aire. Mientras que 1 gramo de Dióxido de Carbono no tendría un efecto significativo para el medio ambiente.

Algo interesante que se evidencia en los resultados obtenidos en las tablas y figuras es que, en la mayoría de los tipos de emisiones, a medida que se aumenta el tamaño y capacidad de carga del camión, la cantidad de emisiones aumentan. En los únicos contaminantes que esto no sucede es en el Monóxido de Carbono y Material Particulado los cuales se reducen para las configuraciones C3S2 y C3S3. El porqué de este hecho, puede ser investigado en futuros estudios. Sin embargo, se pudiera comenzar por analizar los camiones por defecto usados en el HDM-4 puesto que para estas dos configuraciones se utilizó el tipo de vehículo 11, el cual corresponde a camión articulado.

6.2 Emisiones producidas en tipos de carretera usadas por el Ministerio de Transporte

Teniendo presente que la pendiente longitudinal de la carretera es una de las variables que más afecta las emisiones producidas por los camiones de carga, se realiza un análisis de cómo se pudiera aplicar el modelo encontrado a los tipos de carretera que actualmente maneja el gobierno de Colombia, especialmente a aquellos con los que opera la herramienta SICE-TAC del Ministerio de Transporte. Luego de realizar diferentes opciones (el *Anexo*

16 contiene el análisis de las dos opciones que dieron mejor resultado), se puede transformar la Tabla 48 hasta la Tabla 53 y construir desde la Tabla 56 hasta la Tabla 61, teniendo en cuenta los tres tipos de carretera usados en el SICE-TAC.

Tabla 56. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C2G

Tipo de carretera	**Contaminante (g/veh-km)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Plana	0.772	4.289	11.243	0.633	963.214	0.190
Ondulada	1.245	4.925	12.223	0.653	1026.147	0.203
Montañosa	1.905	6.428	15.420	0.795	1277.367	0.252

Nota: Elaboración propia

Tabla 57. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C3

Tipo de carretera	**Contaminante (g/veh-km)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Plana	0.836	5.000	13.233	0.751	1137.331	0.225
Ondulada	0.991	6.963	18.758	1.081	1622.387	0.320
Montañosa	1.426	9.294	24.841	1.422	2142.529	0.422

Nota: Elaboración propia

Tabla 58. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C4-C2S2

Tipo de carretera	**Contaminante (g/veh-km)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Plana	0.845	5.380	14.342	0.819	1235.946	0.244
Ondulada	1.040	7.699	20.850	1.207	1806.416	0.356
Montañosa	1.543	10.442	28.023	1.610	2420.419	0.477

Nota: Elaboración propia

Tabla 59. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C2S3

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Plana	0.879	6.154	16.573	0.955	1433.163	0.283
Ondulada	1.206	9.347	25.421	1.477	2205.644	0.435
Montañosa	1.834	12.910	34.787	2.005	3008.924	0.593

Nota: Elaboración propia

Tabla 60. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C3S2

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Plana	1.493	0.389	24.952	0.604	1694.384	0.334
Ondulada	2.316	0.577	38.106	0.928	2570.909	0.507
Montañosa	3.393	0.717	52.892	1.312	3484.661	0.687

Nota: Elaboración propia

Tabla 61. Emisiones propuestas para SICE-TAC de un camión C3S3

Tipo de carretera	Contaminante (g/veh-km)					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Plana	1.544	0.418	26.180	0.631	1788.090	0.353
Ondulada	2.504	0.619	41.086	1.001	2768.637	0.546
Montañosa	3.605	0.789	56.819	1.404	3762.034	0.742

Nota: Elaboración propia

Las Tabla 56 hasta la Tabla 61 presentan los mejores resultados que se encontraron para identificar las emisiones enfocado únicamente a pendiente longitudinal de la carretera, que es con lo que actualmente trabaja el Ministerio de Transporte. Para encontrar los resultados mostrados, se tuvo en cuenta los tipos de clasificación de carreteras que se propusieron en este trabajo, de esta forma para obtener el tipo de carretera plana, se promediaron las carreteras tipo 1 y tipo 3; para las onduladas se trabajó con el promedio de las carreteras tipo 2 y 4; mientras que para las montañosas se promediaron las carreteras tipo 5, 6 y 7.

De esta forma, se puede modificar los modelos encontrados y propuestos en el desarrollo de la metodología, con los parámetros unitarios de las Tabla 56 hasta la Tabla 61 y realizar

modelos más simples en los cuales solo dependan del tipo de vehículo y la distancia recorrida por tipo de pendiente longitudinal. De esta forma se puede construir tablas como el ejemplo mostrado en la Tabla 62 en el cual se evalúa las emisiones producidas por un solo camión (en este caso un C3S3) al realizar un trayecto entre ciudades. Para ver la aplicación del modelo en las 932 rutas, diríjase a la base de datos de la hoja SICE-TAC Unitarios del *Anexo 16*.

Tabla 62. Ejemplo emisiones en trayecto de un camión C3S3 según SICE-TAC

Origen	Destino	Contaminante (kg/veh)					
		Hidrocarburos HC	Monóxido de carbono CO	Nitratos NO_x	Partículas PM	Dióxido de Carbono CO_2	Dióxido de azufre SO_2
Armenia	Barrancabermeja	1.384	0.342	22.717	0.553	1530.834	0.302
Armenia	Barranquilla	2.307	0.566	37.761	0.921	2541.829	0.501
Armenia	Bogotá	0.805	0.188	12.954	0.318	865.507	0.171
Armenia	Bucaramanga	1.406	0.341	22.916	0.560	1539.895	0.304
Armenia	Buenaventura	0.550	0.132	8.943	0.219	600.159	0.118
Armenia	Buga	0.276	0.068	4.529	0.110	305.214	0.060
Armenia	Cali	0.306	0.079	5.103	0.124	345.989	0.068

Nota: Elaboración propia

Además, si se posee información del TPD predominante en la ruta, se puede obtener las emisiones totales del transporte automotor de carga en dicha ruta, tal como lo muestra el ejemplo realizado en la Tabla 63, la cual se realiza para todas las rutas con un TPD de 6312 vehículos. Si desea conocer toda la base de datos de las emisiones totales de las 932 rutas, con un TPD de 6312 cada una, diríjase a la hoja SICE-TAC Total del *Anexo 16*.

Tabla 63. Ejemplo emisiones totales en trayecto con TPD de 6312 según SICE-TAC

Origen	Destino	Contaminante (kg)					
		Hidrocarburos HC	Monóxido de carbono CO	Nitratos NO_x	Partículas PM	Dióxido de Carbono CO_2	Dióxido de azufre SO_2
Armenia	Barrancabermeja	2527.732	3659.456	38806.532	1198.743	2760648.269	544.468
Armenia	Barranquilla	4254.059	6305.380	65191.753	2031.170	4640555.069	915.133
Armenia	Bogotá	1493.256	2107.931	22205.900	688.432	1567636.682	309.105
Armenia	Bucaramanga	2613.902	3921.131	39857.719	1249.321	2835798.261	559.174
Armenia	Buenaventura	1023.120	1516.505	15513.777	485.330	1101945.391	217.284
Armenia	Buga	503.974	729.615	7737.163	239.003	550412.112	108.555
Armenia	Cali	575.598	962.810	9144.955	293.037	659065.553	129.955

Nota: Elaboración propia

6.3 Comparación de emisiones obtenidas por tipos de carretera propuestos y usados por el Ministerio de Transporte

Es posible comparar los resultados del modelo obtenido con los tipos de carretera definidos en el trabajo investigativo, con los que considera el Ministerio de Transporte. Sin embargo, se recuerda que dentro de todo el análisis que se ha realizado en el presente trabajo, se ha informado en reiteradas ocasiones que se han encontrado aparentes errores en los datos con los cuales trabaja el Ministerio de Transporte. Por ejemplo, el hecho que algunas rutas entre ciudades sólo contemplan un tipo de carretera, cuando se sabe que en esa ruta existen tramos de carretera que pertenecen a otro tipo. La Tabla 64 presentan las emisiones para una misma ruta con el TPD genérico encontrado en el desarrollo de la metodología, la diferencia es que el método de clasificación propuesto utiliza los siete tipos de carretera presentados en el numeral 5.6, mientras que el método Mintransporte utiliza los 3 tipos de carretera adoptados por el Ministerio de Transporte para la herramienta SICE-TAC, considerando la adaptación de parámetros realizadas en el numeral 0

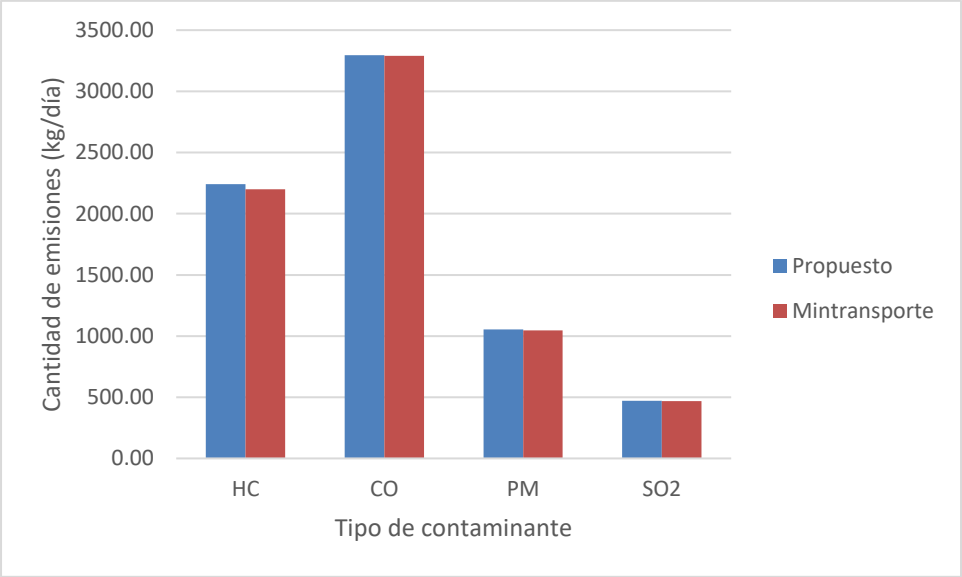
Tabla 64. Kilogramos totales de emisiones diarias del transporte de carga para la ruta Bogotá – Buenaventura

Método de clasificación de carreteras	**Contaminante (kg)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
Propuesto	2242.04	3295.62	33705.34	1054.91	2388983.16	471.09
Mintransporte	2200.42	3288.83	33393.85	1047.32	2373238.41	467.95

Nota: Elaboración propia

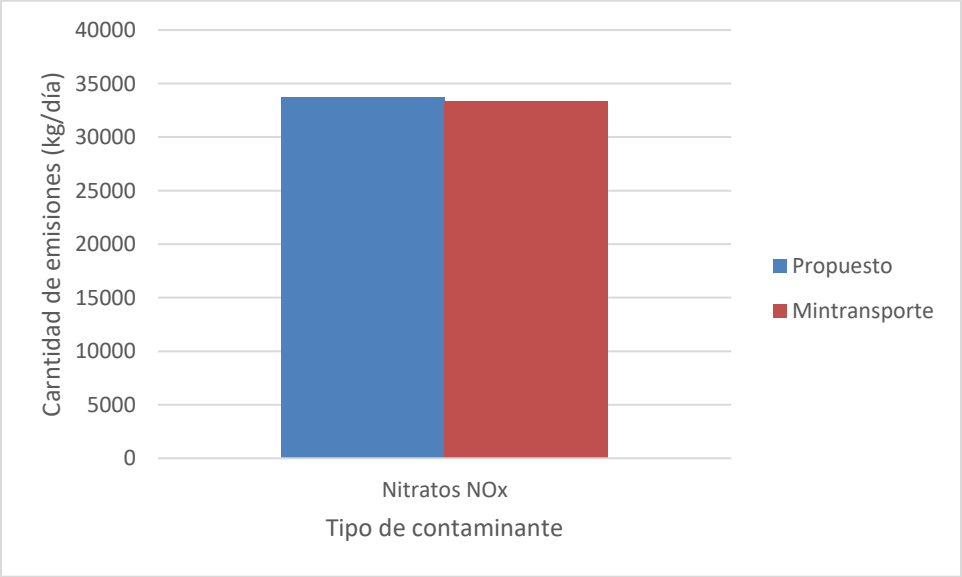
Los resultados de las emisiones totales mostrados en la Tabla 64 reúnen la sumatoria de las emisiones producidas por los camiones utilizados para el presente trabajo en la ruta Bogotá – Buenaventura, para el cálculo de los kilómetros recorridos por cada camión en los diferentes tipos de carretera, independiente si eran del método propuesto en el presente trabajo investigativo o el usado por el Ministerio de Transporte, se utilizó la metodología descrita en el numeral 5.8 y para el caso de los tipos de carretera del Ministerio de Transporte, se adaptó con lo descrito en el numeral 0. De esta forma se garantizó que en ambos análisis se recorriera la misma cantidad de kilómetros por camión para cada tipo de carretera. Las Figura 43 a Figura 45 presentan comparación gráfica de cada uno de los contaminantes de la Tabla 64.

Figura 43. Kilogramos totales de contaminante diarias ruta Bogotá – Buenaventura



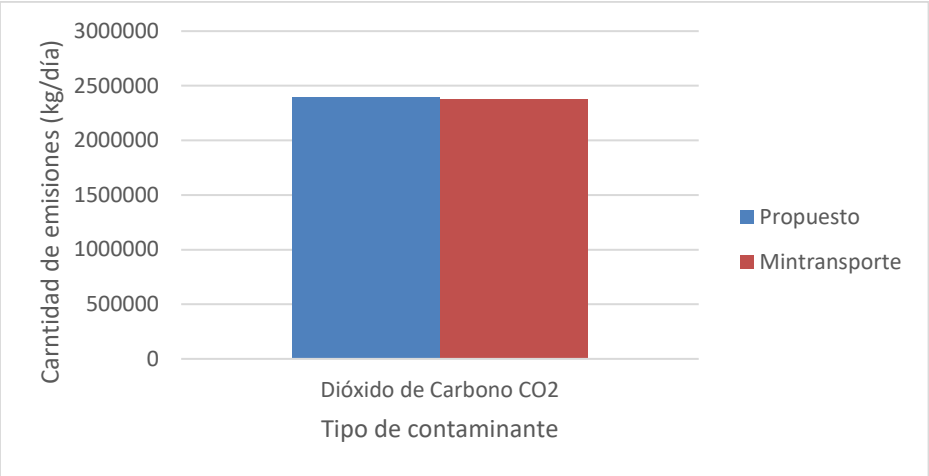
Nota: Elaboración propia

Figura 44. Kilogramos totales de NO_x diarias ruta Bogotá – Buenaventura



Nota: Elaboración propia

Figura 45. Kilogramos totales de CO_2 diarias ruta Bogotá – Buenaventura



Nota: Elaboración propia

Con la adaptación y promedios realizados para agrupar los 7 tipos de carretera que se propusieron en el trabajo investigativo, en los tres tipos de carretera usados por el Ministerio de Transporte, se encontró que independientemente del tipo de carretera usado (propuesto o Ministerio de Transporte), las emisiones totales producidas por cada tipo de camión no variaron en más de un 3%. Mientras que para las emisiones totales de todo el trayecto usando un mismo TPD, la diferencia no fue mayor a un 2%, lo que permitiría afirmar que el modelo propuesto puede ser usado para el cálculo de las emisiones en los siete tipos de carretera propuestos, o en los tres tipos de carretera que actualmente utiliza el Ministerio de Transporte en el SICE-TAC, tal como lo muestra la Tabla 65

Tabla 65. Relación entre emisiones producidas por tipos de carretera propuesto y las usadas por el Ministerio

Tipo de camión	**Relación (%)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	1.84	-0.36	-0.78	-1.18	-0.94	-1.01
C3	2.76	1.19	1.00	0.85	0.94	0.92
C4-C2S2	2.48	1.19	1.06	0.94	1.01	1.02
C2S3	1.62	1.07	1.02	0.97	1.00	0.99
C3S2	2.02	-0.32	1.26	1.52	0.93	0.96
C3S3	1.70	0.18	1.19	1.34	0.97	1.00
Total emisiones	1.86	0.21	0.92	0.72	0.66	0.67

Nota: Elaboración propia

El mismo ejercicio se realizó con otra ruta completamente diferente, y los resultados encontrados fueron similares, es decir, que la variación entre el uso del modelo para los tipos

de carretera propuestos y los usados por el Ministerio de Transporte no era significativa. Para corroborar lo anterior diríjase al *Anexo 16.*

No por esto la propuesta de este trabajo es improcedente ya que como sea indicado anteriormente los datos en SICE-TAC de longitud de carretera por tipo de esta presenta inconsistencias.

6.4 Aplicación del modelo según tipo de carretera, TPD y tipología del camión.

En los resultados presentados hasta ahora, se mostró cómo el modelo podía ser usado para el cálculo de las emisiones del transporte automotor de carga en diferentes rutas interurbanas, teniendo un TPD genérico. Sin embargo, para que el cálculo de las emisiones de cada ruta sea más exacto, se recomienda analizar cuál es el TPD promedio de dicha ruta. La Tabla 66 presenta un ejemplo de las emisiones que se producen en el transporte automotor de carga en una de las principales rutas del país, en este caso la ruta entre Bogotá y Medellín. Para este caso no se utilizó el TPD genérico, lo que se hizo fue usar el TPD específico de esa ruta, es decir, el TPD promedio entre Bogotá y Medellín que se calculó con las estaciones del INVIAS, el cual contaba con un TPD de 2826 camiones. El mismo ejercicio de calcular las emisiones con el TPD específico de la ruta se realizó en algunos de los principales corredores del transporte de carga del país, para visualizar los resultados diríjase al *Anexo 16.*

Tabla 66. Emisiones totales diarias en ruta Bogotá - Medellín con TPD de 2826 camiones

Camión	**Contaminante (kg)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	979.14	3854.21	9557.49	510.27	802119.06	158.14
C3	215.00	1386.52	3701.55	211.68	319132.70	62.94
C4-C2S2	75.73	512.14	1374.32	78.94	118700.45	23.41
C2S3	19.91	142.27	383.94	22.16	33225.81	6.55
C3S2	686.01	156.93	10969.92	269.67	730996.35	144.08
C3S3	1960.58	460.96	31637.99	775.39	2116625.90	417.41
Total	3936.38	6513.04	57625.21	1868.10	4120800.26	812.53

Nota: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los diferentes corredores viales que se analizaron, y por los cuales se transporta la mayor cantidad de kilogramos de carga del país, se evidenció que la mayor cantidad de emisiones se produce en las rutas que tienen como destino la capital del país. Lo

anterior tiene una relación directa con el número de habitantes de Bogotá, puesto que al ser la ciudad más poblada y la que tiene el mayor flujo de económico en el país, es la que mayor demanda tiene de carga por lo cual requiere mayor flujo de camiones. Adicionalmente al estar en el interior de Colombia, y estar a una altura considerable del nivel del mar, los vehículos que se dirigen hacia dicha ciudad deben transitar diferentes tipos de carreteras, entre ellas muchas que tienen unos altos porcentajes de pendiente longitudinal.

6.5 Relación entre peso neto transportado y las emisiones producidas

Es muy importante conocer la diferencia entre peso bruto vehicular, peso neto y peso tara. Cuando se habla de peso bruto vehicular, se hace referencia al peso propio del vehículo más la carga transportada. Por otra parte, el peso neto hace referencia únicamente al peso de la carga transportada. Finalmente, el peso tara se refiere al peso propio del vehículo sin carga. Teniendo claro lo anterior se puede realizar un análisis de cuántas son las emisiones por tonelada transportada que produce cada camión por kilómetro considerando el tipo de carretera por la que circula y el tipo de vehículo usado.

Con lo anterior, es posible construir la Tabla 67, la cual presenta un ejemplo de los gramos de emisiones unitarias producidas por tonelada transportada por kilómetro por tipo de vehículo en el tipo de carretera 7 (muy sinuosa y muy ondulada). Es de mencionar que los resultados de la Tabla 67 son basados en un Peso Neto al 70%; es decir que asimiló que los vehículos operan a un 70% de su capacidad de carga en toneladas. También se presenta una columna de cuanto es el peso neto total que puede transportar cada tipo de camión únicamente para que el lector tenga una referencia.

Tabla 67. Emisiones por tonelada transportada un camión en carretera T7

Camión	**Peso Neto total (ton)**	**Peso Neto (ton) 70%**	**Contaminante (g/veh-km)**					
			Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos NO_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	9	6.3	0.396	1.310	3.129	0.161	258.724	0.051
C3	16	11.2	0.162	1.080	2.894	0.166	249.830	0.049
C4-C2S2	22	15.4	0.132	0.893	2.396	0.138	206.906	0.041
C2S3	27	18.9	0.132	0.912	2.453	0.141	212.079	0.042
C3S2	31	21.7	0.213	0.043	3.267	0.082	213.498	0.042
C3S3	34	23.8	0.205	0.043	3.196	0.079	210.445	0.042

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 67 es posible evidenciar como cada tipología de camión tiene una capacidad de carga neta asociada. Por ejemplo, un camión C2G tiene una capacidad para transportar aproximadamente 9 toneladas, mientras que un C3S3 puede transportar en promedio 34 toneladas de carga. Los valores de peso tara de una misma tipología de camión pueden variar según la marca y el modelo del vehículo, por ejemplo, no es lo mismo el peso tara de un camión C3S3 marca Chevrolet que el de un Kenworth; por lo cual en la mayoría de los casos se habla de Peso Bruto Vehicular (PBV). Sin embargo, cuando se están evaluando los costos asociados al transporte de carga, se habla de las toneladas que puede transportar cada vehículo (peso neto), por lo cual se han adoptado unos valores representativos de cada tipología de camión. Los valores adoptados de peso neto en Colombia se presentan en la columna "Peso Neto total (ton)".

Como en el trabajo investigativo se realizó la suposición que en general los camiones circulan a un 70% de su capacidad, el cálculo de las emisiones por tonelada transportada por kilómetro, presentadas en la Tabla 67 se realizó con esa misma suposición, es decir, se trabajó con un 70% del peso neto. El mismo ejercicio se realizó para los 7 tipos de carretera. Para ver los resultados remítase a las hojas T1 hasta T7 del *Anexo 16*. Dentro de los resultados obtenidos para cada tipo de carretera, se puede ver como los vehículos óptimos en cuanto a menor cantidad de emisiones por tonelada trasportada, son los C3S3 y los C4-C2S2, para tipos de carretera donde la pendiente longitudinal es muy elevada, los más eficientes son los C2S2 (carreteras tipo 5 y 7) mientras que para el resto de las carreteras (tipo 1, 2, 3 y 6) el más eficiente es el C3S3 (ver *Anexo 16*).

6.6 Reducción en las emisiones producidas por el transporte interurbano de carga por carretera

Tal como se describió en el numeral 3.5, en el transporte automotor de carga se producen principalmente emisiones evaporativas, de escape, por el desgaste del pavimento, neumáticos y frenos. Tal como se menciona en el numeral 3.9, el modelo usado por HDM-4 permite predecir algunas emisiones de escape.

Dentro de las emisiones analizadas, el dióxido de carbono (CO_2) y el material particulado (PM) son los contaminantes que más se tiene en cuenta para el transporte automotor. Puesto que el sector transporte es uno de principales responsables de dichas emisiones, las cuales incrementan el efecto de gas invernadero (CO_2) y provocan graves problemas de salud (PM). Sin embargo, para el transporte interurbano de carga, el de mayor importancia es el CO_2, puesto que el mayor número de kilómetros del recorrido es por zonas rurales, en las cuales la afectación a la salud humana no va a ser tan alta (debido a la densidad poblacional), comparado con la afectación al medio ambiente.

Con el fin de evaluar la posible reducción de emisiones por tonelada transportada, se realizó un ejercicio en el cual a los camiones se les aumentó la carga transportada al máximo, es decir, se asumió que todos los camiones operaban a un 100% de su capacidad de carga. Los resultados obtenidos con HDM-4 se pueden observar en el *Anexo 17*. Con dichos resultados, fue posible comparar las emisiones por toneladas transportada, cuando un vehículo opera a un 70% y un 100% de su capacidad de carga en peso.

De esta manera, se encontró los porcentajes de reducción de cada tipo de contaminante por cada tipo de camión al circular por los diferentes tipos de carretera. La Tabla 68 presenta un ejemplo del porcentaje que se redujo las emisiones por tonelada transportada en cada uno de los camiones al circular por una carretera tipo 1, cuando estos operan a un 100% de su capacidad de carga; para ver la reducción en los 7 tipos de carretera, diríjase al *Anexo 18*.

Tabla 68. Ejemplo reducción de emisiones por tonelada transportada en carreteras T1

Vehículo	**Contaminante (%)**					
	Hidrocarburos HC	**Monóxido de carbono CO**	**Nitratos No_x**	**Partículas PM**	**Dióxido de Carbono CO_2**	**Dióxido de azufre SO_2**
C2G	24.27	27.77	28.22	28.61	28.37	28.57
C3	26.39	16.20	14.98	13.90	14.54	14.76
C4-C2S2	24.35	14.81	13.73	12.74	13.36	13.36
C2S3	21.06	12.04	11.12	10.36	10.81	10.95
C3S2	17.62	7.31	13.82	14.99	12.29	12.19
C3S3	16.57	6.17	12.64	13.96	11.08	10.91

Nota: Elaboración propia

Según los resultados que se muestran en el *Anexo 18*; cuando se pasa de un 70% a un 100%, se puede tener una reducción de emisiones por tonelada transportada hasta de un 28.5% sin embargo dicho porcentaje dependerá del tipo de vehículo, el tipo de contaminante y el tipo de carretera. Por ejemplo, según el tipo de camión, para uno de los contaminantes más analizados en el transporte como lo es el dióxido de carbono, la reducción de emisiones por tonelada transportada está aproximadamente entre 10.8% y 28.4% para carreteras tipo 1, entre 3.2% y 11.2% para carreteras tipo 2, entre 10.8% y 26.76% para carreteras tipo 3, entre 3.1% y 9.9% para carreteras tipo 4, entre 1.8% y 7.7% para carreteras tipo 5, entre 3.4% y 7.3% para carreteras tipo 6 y entre 0.7% y 5.03% para carreteras tipo 7. Lo que quiere decir que entre más plana y recta se tenga la carretera, la reducción de emisiones por tonelada transportada será mayor al pasar de vehículos operando de un 70% a un 100% de su capacidad de carga.

Se ha visto que, al aumentar el número de toneladas de carga transportada, o en otras palabras el peso neto; el número de emisiones por tonelada transportada es menor. Por lo cual, y teniendo en cuenta que el peso bruto vehicular está estipulado por norma, se sugiere

buscar adecuaciones en los materiales de la carrocería del vehículo, los cuales reduzcan el peso tara de este. De esta forma se pudiera, aumentar el peso neto.

Cuando en el material a transportar prima el volumen por encima del peso, es decir que, para el tamaño de la carga, el peso es relativamente bajo, se sugiere utilizar vehículos de la categoría C2S2. Puesto que en cuanto a volumen pudieran transportar lo mismo que vehículos con características superiores, como el C2S3, C3S2 o C3S3; emitiendo menos emisiones en la mayoría de los tipos de carreteras. Para ver todas las emisiones por tipo de vehículo y tipo de carretera, diríjase al *Anexo 18.*

Se debe buscar la forma de reducir los viajes vacíos, para esto se sugiere crear un medio en cabeza del gobierno y de las empresas transportadoras en el cual, cuando una empresa o persona requiera transportar mercancía de un lugar a otro, se busque otra persona u empresa que requiera realizar esa misma operación pero en sentido opuesto en el que no se tienen carga de compensación (o de regreso), de esta forma saldría al tiempo dos camiones uno desde la ciudad A y otro desde la ciudad B, los cuales a mitad de camino pudieran intercambiar la carga (se requiere del uso de tractocamiones) y así cada uno volver a su lugar de origen. Por ejemplo, si una empresa requiere transportar carga de Medellín a Bogotá y otra empresa de Bogotá a Medellín, las tractomulas se pudieran encontrar en la Dorada y allí realizar cambio del semirremolque. Esto reduciría las emisiones de los viajes en vacío a la vez que reduciría los costos del transporte de carga.

Otra forma de reducir la cantidad de emisiones es realizando recorridos con un cambio de tipo de vehículo después de cierto punto del trayecto. Tal cómo se ha visto, entre más cantidad de toneladas pueda transportar la unidad tractora, las emisiones por tonelada serán menores. Por lo cual se pudiera pensar en realizar el movimiento de mercancía interurbano por medio de vehículos C3S3 los cuales antes de llegar al área urbana destino (antes de la llamada última milla), llegue a Centros de Consolidación, en los cuales se pudiera realizar un cambio a otro tipo de vehículos según la necesidad.

Se debería realizar un análisis para verificar el punto óptimo de carga neta de otros modos de transporte como el férreo o fluvial, de esta forma, se pudiera tener menos emisiones por tonelada transportada si se realiza un transporte intermodal, por ejemplo, por medio de ríos navegables, sería posible llevar la carga hasta cierto punto o Centro de Consolidación, a partir del cual el recorrido continuaría con el uso de camiones. También, se pudiera pensar en la creación de puertos secos, a los cuales pudiera llegar la carga por medio de trenes, y posteriormente trasladarla a camiones, de esta forma no solo se reducirían las emisiones, sino también pudiera agilizar el proceso logístico.

El numeral 3.9 menciona que existen diferentes variables que pueden afectar el número de emisiones producidas en el transporte automotor de carga, entre las cuales se encuentra la aceleración y la velocidad de conducción; dos factores que dependen mucho de la persona

que conduce el vehículo. Por tal motivo se recomienda dar capacitaciones constantes a los conductores para que éstos tengan conciencia sobre su forma de conducir, y así lograr condiciones óptimas de conducción.

Colombia es un país que tiene una alta variabilidad de modelos (año) de camiones para el transporte de carga. Con el pasar de los años, los fabricantes han buscado mejorar los vehículos, haciéndolos más eficientes y mejorando otro tipo de aspectos. Algunas mejoras se deben a las regulaciones internacionales las cuales cada vez buscan una reducción de los contaminantes y sus cantidades emitidas. Se pudiera pensar entonces en una prohibición a la circulación de ciertos modelos de vehículos, para esto se debería realizar un estudio en el que se verifique la edad límite que puede tener un camión de carga que circule por las carreteras.

7. Conclusiones y recomendaciones

- El trabajo investigativo, permitió obtener el modelo el cual permite estimar la cantidad de 6 tipos diferentes de contaminantes producidos (emisiones) por los camiones en el transporte interurbano de carga (ver numeral 5.10.3 y las ecuaciones *(9)* a *(46)*). Dicho modelo se basa en emisiones unitarias, por lo cual, si se cuenta con la información suficiente, se puede calcular tanto las emisiones de un camión, como las que producen todos los camiones que circulan por cualquier ruta a analizar.
- En las emisiones producidas por el transporte automotor de carga entre ciudades, son muchas las variables que hacen que éstas se incrementen o disminuyan, algunas de mayor relevancia que otras. Dentro del estudio, se encontró que aparte de las características propias de cada vehículo, dentro de las variables externas que más influye en la cantidad de emisiones se encuentran aspectos relacionados a las características geométricas de las carreteras por donde circulan los vehículos; siendo la pendiente longitudinal de la carretera la que mayor influencia tiene en la cantidad de emisiones que se producen. Sin embargo, la curvatura horizontal media de la carretera también aporta, aunque en menor grado, por lo cual se recomienda siempre tener presente estos dos aspectos al momento de analizar las emisiones.
- El cambio de curvatura media horizontal afecta aproximadamente entre 0.28% y 17.49% a los HC, entre 0.02% y 5.01% a los CO, entre 0.02% y 5.54% a los NOx, entre 0% y 6.86% al PM, entre 0.01% y 6.08% al CO_2 y entre 0% y 6.52% al SO_2.
- El cambio de pendiente longitudinal de la carretera afecta aproximadamente entre 14.56% y 37.10% a los HC, entre 14.36% y 34.29% a los CO, entre 9.93% y 35.89% a los NOx, entre 5.41% y 36.33% al PM, entre 8.22% y 35.37% al CO_2 y entre 8.46% y 35.35% al SO_2.

- Existen diferentes tipos de camiones que se usan para el transporte de carga entre ciudades. Se debe tener en cuenta que por su relación peso-potencia, algunos producen menos emisiones que otros por tonelada transportada, este es el caso de los camiones C3S3 y C4-C2S2, los cuales mostraron que son los óptimos para el transporte de carga en relación a las emisiones que se producen. Sin embargo, no siempre se requiere de un vehículo de estas características debido a la cantidad de carga que se desea transportar, por lo cual y para reducir emisiones y a la vez costos en el transporte, se recomienda buscar aliados estratégicos, con los cuales se pueda compartir un vehículo para transportar diferentes productos. Esto es algo que han venido realizando algunas empresas del país, ya que optimiza los costos de operación.
- Un aumento en el peso neto transportado pudiera llegar a significar hasta una disminución aproximada del 30% en las emisiones por tonelada transportada. Sin embargo, este valor depende del tipo de contaminante, el tipo de vehículo y el tipo de carretera, tal como se explica en el numeral 6.6 y el *Anexo 18*.
- El modelo se basa en las emisiones unitarias de los camiones, por lo cual puede ser usado para conocer cuantas emisiones produce un solo camión, pero si se conoce información del TPD, se puede realizar un análisis más completo de las emisiones totales que se producen en una ruta.
- El Transito Promedio Diario (TPD) tiene una influencia directa en la cantidad de emisiones totales que se producen para una ruta en particular. Por esto, siempre se recomienda aplicarle al modelo la variable de número de vehículos por configuración. Sin embargo, si no se conoce este número, el TPD genérico podría dar una aproximación que puede servir como punto de partida para el análisis de emisiones entre una ruta y otra.
- Hasta ahora el Gobierno Nacional en cabeza del Ministerio de Transporte ha desarrollado herramientas las cuales han servido para diferentes aspectos como por ejemplo el cálculo de los costos eficientes del transporte automotor de carga. Sin embargo, se han encontrado algunas inconsistencias las cuales se recomienda revisar para ajustar las herramientas creadas hasta ahora. Para muchos cálculos el Ministerio de Transporte aparentemente tiene únicamente en cuenta la pendiente longitudinal

de la carretera. Por otra parte, en el cálculo de los costos de operación vehicular en vías pavimentadas (ver *Anexo 05*), el INVIAS ha usado la curvatura horizontal media y ésta la ha mezclado con la pendiente longitudinal de la carretera, lo cual se aproxima mucho a lo propuesto en el presente trabajo investigativo.

- Debido a la diferencia porcentual encontrada en el numeral 6.3; se puede concluir que el modelo encontrado puede ser usado tanto para los tipos de carretera que se propusieron, como para los tipos de carretera con los cuales actualmente opera el SICE-TAC. Por simplicidad se recomienda usar los tres tipos de carretera con los cuales opera actualmente el Ministerio de Transporte, sin embargo, para trabajos más detallados o si se pretende estudiar los efectos específicos de la curvatura media horizontal, se recomienda usar los tipos de carretera propuestos.
- Los resultados presentados en el trabajo investigativo detallan un análisis genérico de la zona de estudio. Sin embargo, la metodología y el desarrollo de la misma puede ser replicado para otro tipo de análisis. Por ejemplo, si se desea un análisis detallado de un tramo de ruta en particular, se pueden adaptar condiciones para que los datos recopilados sean más ajustados, como con el uso de un GPS que tome datos segundos a segundo, de esta forma se podría representar las condiciones y características geométricas de la carretera de una forma más detallada, y se pudiera obtener promedios de velocidad en tramos más cortos.
- Al comparar los valores de las cantidades de emisiones unitarias, para cada tipo de contaminante, se puede concluir que el Dióxido de Carbono CO_2 es el contaminante que más gramos aporta en el transporte de carga por carretera, seguido de los Nitratos $NO_{x.}$ Sin embargo, se debe aclarar que cada contaminante tiene un efecto diferente según la cantidad que se emita, es decir que no tiene el mismo efecto 1 gramo de Material Particulado PM que 1 gramo de Dióxido de Carbono CO_2.
- La forma de conducción por parte del chofer, por ejemplo, las altas y las bajas velocidades, las aceleraciones fuertes, entre otros. Hace que se produzca un mayor número de emisiones.
- Se recomienda dar capacitaciones constantes a los conductores para que éstos realicen su actividad de mejor manera y con consciencia ambiental, es decir

buscando una conducción y aceleración óptima, la cual ayude en la reducción de emisiones.

- La intermodalidad en los procesos de transporte de carga pudiera llegar a reducir las emisiones producidas por toneladas transportadas. Adicionalmente, es importante articular estos procesos con infraestructura física como centros de consolidación o puertos secos.
- Para reducir las emisiones del transporte de carga automotor, se debe evitar los viajes vacíos, una forma de realizar esto, es la articulación entre diferentes empresas, o el intercambio de carga a mitad de trayecto, lo cual garantiza que los camiones estén cargados en la mayoría de sus recorridos.
- Por la topografía que tiene Colombia, y el costo que implica ciertas obras como túneles y viaductos; en muchas ocasiones, existen trayectos desde una ciudad origen hasta una ciudad destino, en los cuales los vehículos deben realizar grandes ascensos y descensos. Tal como se evidenció en el trabajo de tesis, la pendiente longitudinal de la carretera tiene una influencia directa en la cantidad de emisiones producidas por los vehículos de carga y posiblemente sobre todos los vehículos. Por lo cual, para reducir las emisiones, al momento de la planeación de las carreteras, se deberían realizar obras que eviten tramos de ascenso y descensos "innecesarios". Es de notar que muy seguramente los costos de construcción aumentan, pero se debe realizar un análisis económico a varios años pues con este tipo de obras, no solo se reduciría las emisiones, sino también los costos del transporte, los tiempos de viaje, entre otros.
- El clasificar las carreteras teniendo en cuenta aspectos de los alineamientos horizontal (curvatura) y vertical (pendientes), puede ser un proceso largo, por lo cual se recomienda que al momento de realizar una mejora, ampliación o construcción de una carretera nueva, se realice un trabajo cuidadoso con los planos récord, con los cuales se pueda alimentar una base de datos para un portal de datos abiertos los cuales permitan fomentar las investigaciones que involucren características geométricas de las carreteras.
- Se recomienda migrar de una clasificación de carreteras que sólo tienen en cuenta la pendiente longitudinal, a uno que tenga en cuenta otros aspectos geométricos; los

tipos de carretera propuestos en el trabajo investigativo pueden ser un primer paso para esto.

- Se recomienda buscar la forma de realizar una renovación del parque automotor, en el cual se pueda adquirir vehículos con mejores tecnologías o con tipos de combustibles que ayuden a reducir la cantidad de contaminantes, por ejemplo, camiones eléctricos, a gas e híbridos, los cuales han comenzado a adquirir algunas empresas.
- Para reducir las emisiones del transporte de carga, se sugiere emitir restricciones a ciertos vehículos antiguos, e incentivar a aquellos que reducen considerablemente la cantidad de contaminantes.
- Se debe llevar a cabo estudios sobre cómo se altera la velocidad de los camiones, considerando los diferentes tipos de camión, peso de la carga y características geométricas de la carretera.
- A futuro se debería complementar el trabajo, con investigaciones que muestren cómo las características propias de los vehículos pueden generar menores o mayores cantidades de emisiones por vehículo, cuando éste se enfrenta a unas mismas condiciones de carretera. De esta forma se podría ir buscando adaptaciones a los vehículos las cuales busquen la reducción en las emisiones de contaminantes.
- Se recomienda para trabajos futuros realizar un análisis y comparar cómo la variación de algunas variables afecta la cantidad de emisiones; por ejemplo, cómo afecta el tipo de combustible (gasolina, ACPM, biocombustible, gas, entre otros), la cantidad de carga transportada por tipo de camión, entre otros.
- Para futuros trabajos, se recomienda agrupar diferentes rutas con varios TPD genéricos, de esta forma se pueden obtener diferentes modelos que se puedan aplicar según la ruta a analizar.

A. Anexos:

Se anexa al presente trabajo información complementaria en medio digital así:

- Anexo 01 - Estimación de emisiones con HDM.pdf
- Anexo 02 - Búsqueda SICE-TAC.pdf
- Anexo 03 - Distancias y Rutas SICE-TAC.xlsm
- Anexo 04 - Carta Empresas.pdf
- Anexo 05 - Velocidades INVIAS.xls
- Anexo 06 - Velocidades HDM-4.pdf
- Anexo 07- Opciones para velocidad de camiones.pdf
- Anexo 08 - Potencia camiones.xlsx
- Anexo 09 - Desarrollo de ecuaciones para encontrar velocidad op 9.xlsx
- Anexo 10 - Ejemplo recorrido GPS.xlsx
- Anexo 11 - Casos de estudio clasificación carretera (carpeta)
- Anexo 12 - TPD.xlsx
- Anexo 13 - TPDS.xlsx
- Anexo 14 - Simulación HDM-4 (carpeta)
- Anexo 15 - Resultados HDM-4 (carpeta)
- Anexo 16 – Análisis resultados.xlsx
- Anexo 17 – Resultados emisiones vehículos 100% carga HDM-4.pdf
- Anexo 18 - Emisiones 70% vs 100% carga.xlsx

Bibliografía

Adams, R. (2000). *100 Years of Semi Trucks*. Osceola, WI: MBI Publishing Company.

Agencia Nacional de Infraestructura. (2016). ANI. Retrieved September 5, 2019, from https://www.ani.gov.co/puertos2

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2011). *AASHTO Green Book* (6th ed.). Washington, D.C.

Archondo-Callao, R. S., & Faiz, A. (1994). *Estimating Vehicle Operating Costs*. Washington, D.C.

Barth, M, An, F., Norbeck, J., & Ross, M. (1996). Modal emissions modeling: A physical approach. *Transportation Research Record*. https://doi.org/10.3141/1520-10

Barth, M, Scora, G., & Younglove, T. (2004). Modal emissions model for heavy-duty diesel vehicles. *Transportation Research Record*. https://doi.org/10.3141/1880-02

Barth, Mattehew, An, F., Younglove, T., Scora, G., Levine, C., Ross, M., & Wenzel, T. (2000). NCHRP Project 25-11 Final Report: The Development of a Comprehensive Modal Emissions Model ACKNOWLEDGMENT.

Bennett, C. R., & Greenwood, I. D. (2004). *HDM4 - Volume Seven: Modelling Road User And Environmental Effects*. Paris: The World Road Association (PIARC) and The World Bank.

Bob, D. (2003). Britannica Concise Encyclopedia. *Reference Reviews*, *17*(8). https://doi.org/10.1108/09504120310503656

Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2008). Impacts of freeway high-occupancy vehicle lane configuration on vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *13*(2), 112–125. https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.01.001

California Air Resources Board. (2014). EMFAC2014 Volume I - User's Guide.

Centro de Estudios Urbanos - Universidad el Rosario. (2012). 74% de la población

colombiana habita en zonas urbanas. Bogotá.

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2013). CONPES 3759. Bogotá D.C.

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2020). CONPES 3982. Bogotá D.C.

DANE. (2019). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Retrieved September 5, 2019, from https://www.dane.gov.co

Department of Transportation of Australia. (2019). Vehicle classes. Retrieved November 20, 2019, from https://www.transport.wa.gov.au/

EMISIA S.A. (2016). COPERT Manual. Retrieved March 20, 2018, from https://copert.emisia.com/manual/

EMISIA S.A. (2018). COPERT the industry standard emissions calculator. Retrieved March 22, 2019, from https://www.emisia.com/utilities/copert/

European Environment Agency. (2018a). Exhaust emissions from road transport – Update Jul. 2018. In *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016* (p. 143). Luxembourg: Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2800/247535

European Environment Agency. (2018b). Gasoline evaporation – Update Apr. 2018. In *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016* (p. 37). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Federal Highway Administration [FHWA]. (2015). *Compilation of Existing State Truck Size and Weight Limit Laws*. Washington, DC.

Federal Highway Administration [FHWA]. (2016). Traffic Monitoring Guide. Washington, D.C. Retrieved from http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/tmguide/

Flores, O., Fabela, M., Blake, C., Vázquez, D., & Hernández, R. (2014). Regulación de emisiones contaminantes de los motores de combustión interna. *Instituto Mexicano Del Transporte Publicación Bimestral de Divulgación Externa Núm. 149*.

Gibbins, E., & Graeme, E. (1978). *Pictorial History of Trucks*. Secaucus, New Jersey: Orbis.

Giraldo, L. A., & Behrentz, E. (2006). Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. Bogotá D.C: Universidad de Los Andes. Retrieved from https://bogota.gov.co/

Hausberger, S., Rexeis, M., Zallinger, M., & Luz, R. (2009). Emission Factors from the

Model PHEM for the HBEFA Version 3. *Graz University of Technology*. Graz, Austria. Retrieved from http://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA32_EF_Euro_5_6_TUG.pdf

Hauseberger, S., & Matzer, C. (2017). Update of Emission Factors for EURO4, EURO 5 and EURO 6 Dieasel Passenger Cars for the HBEFA Version 3.3. *Graz University of Technology*. Graz, Austria.

Heaps, C. . (2016). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. Somerville; MA; USA. Retrieved from https://www.energycommunity.org

Holguín-Veras, J. (2016). *Impacts of Freight Parking Policies in Urban Areas: The Case of New York City*. *Utrc*. New York. Retrieved from http://www.utrc2.org/sites/default/files/Final-Report-Impacts-of-Freight-Parking-Policies.pdf

INFRAS. (2017). HBEFA. Retrieved April 2, 2018, from http://www.hbefa.net

Instituto Nacional de Vías [INVIAS]. (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá.

Instituto Nacional de Vías [INVIAS]. (2015). *Manual de Capacidad y Niveles de servicio Para Vías Multicarril* (Primera). Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías [INVIAS]. (2018). Volúmenes de Tránsito. Retrieved May 19, 2020, from https://hermes.invias.gov.co/volumenes/

Instituto Nacional de Vías, & Universidad del Cauca. (1996). *Manual de Capacidad y Niveles de Servicio Para Carreteras de Dos Carriles* (Segunda). Popayán.

International Sustainable Systems Research Center. (2008). Manual del Usuario del Modelo IVE.

Keller, M., Wüthrich, P., & Notter, B. (2017). Handbook emission factors for road transport 3.1 / 3.2 / 3.3 Quick reference. Retrieved from http://www.hbefa.net/e/help/HBEFA33_help_en.pdf

Kerali, H. G. R., McMullen, D., & Odoki, J. B. (2000). *HDM4 - Volume Two: Applications Guide*. *Highway Development and Management Series* (First). Birmingham, United Kingdom.

Kerali, H. G. R., Odoki, J. B., & Stannard, E. E. (2006). *HDM4 - Volume One: Overview of*

HDM-4. Highway Development and Management Series (Second, Vol. 4).

Ministerio de Fomento España. (2016). Instrucción de Carreteras Norma 3.1-IC. Madrid. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Ministry Of Works Tanzania. (2011). Road Geomatric Design Manual. The United Republic of Tanzania.

MinTransporte. (2004). Resolución 4100 de 2004. Bogotá D.C. Retrieved from https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241

MinTransporte. (2005). Resolución 2888 de 2005. Bogotá D.C.

MinTransporte. (2014a). Decreto 1478 de 2014. Retrieved from http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/AGOSTO/05/DECRETO 1478 DEL 5 DE AGOSTO DE 2014.pdf

MinTransporte. (2014b). Plan de Acción Sectorial de Mitigación (PAS) Sector Transporte. *Ministerio de Transporte, Republica de Colombia*. Bogotá D.C.

MinTransporte. (2015). Resolución 164 de 2015. Bogotá D.C.

MinTransporte. (2017). Propuesta para la definición de parámetros de eficiencia del SICE-TAC: Rendimiento de combustible por tipo de terreno y configuración vehicular. Bogotá.

MinTransporte. (2018). *Transporte en Cifras Estadísticas 2017*. Bogotá. Retrieved from https://www.mintransporte.gov.co/documentos/15/estadisticas/

MinTransporte. (2019a). Corredores logísticos de importancia estratégica. Retrieved April 11, 2020, from https://plc.mintransporte.gov.co/

MinTransporte. (2019b). Portal Logístico de Colombia. Retrieved August 7, 2020, from https://plc.mintransporte.gov.co/

MinTransporte. (2019c). Viajes y galones movilizados durante el 2018. Retrieved September 6, 2019, from https://plc.mintransporte.gov.co/

MinTransporte. (2019d). Viajes y toneladas movilizadas durante el 2018. Retrieved February 3, 2020, from https://plc.mintransporte.gov.co/

Morosiuk, G., Riley, M., & Toole, T. (2006). *HDM4 - Volume Two: Applications Guide. Highway Development and Management Series* (Second). Birmingham, United Kingdom.

Mueller, M. (1999). *The American Pickup Truck* (illustrate). MBI Publishing Company.

Narwal, A. (2016). Review On Vehicular Emission Models (Hdm4). *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*, *4*(6), 44–49.

Natural Resources Canada. (2018). Fuel-efficient driving techniques. Retrieved April 15, 2019, from https://www.nrcan.gc.ca

Nelson, J. C. (1936). The Motor Carrier Act of 1935. *Journal of Political Economy*, *Vol. 44*(4), 464–504. Retrieved from https://www.jstor.org/stable/1823197

Odoki, J. B., & Kerali, H. G. R. (2006). HDM4 - Volume four: Analytical Framework and Model Descriptions. *Highway Development and Management Series*, *4*. Retrieved from http://piarc.rmto.ir/DocLib4/Volume4.pdf

Osses Alvarado, M. (2003). Modelo de Emisiones Vehiculares, MODEM. Santiago; Chile.

Paterson, W. D. O. (1990). *Road Deterioration and Maintenance Effects*. *Transportation Research Part A: General*. Washington, D.C.

Posada Henao, J. J. (2003). *HDM-4 Guía básica para su uso*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Posada Henao, J. J. (2006). *Evaluacion de Proyectos de Inversion en Carreteras con el HDM-4* (Primera Ed). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Posada Henao, J. J. (2012). *Efecto de la Cantidad de Carga en el Consumo de Combustible en Camiones*. Universidad Nacional de Colombia.

República Federativa de Brasil. (1986). Manual Interamericano de Normas de Diseño Geométrico de Carreteras. In *XV Congreso Panamericano de Carreteras*. México D.F.

Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems* (Third edit). New York: Routledge.

Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2011). Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras. https://doi.org/10.1109/ICIP.2003.1246782

Stannard, E. E., Wightman, D. C., & Dakin, J. M. (2006). *HDM4 - Volume Three: Software User Guide*. *Highway Developmenet & Management Series* (Second).

Steadieseifi, 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

Torras-Ortiz, S., Telléz-Gutiérrez, R., & Mendoza-Sánchez, J. F. (2005). *Análisis paramétrico del submodelo de efectos ambientales del HDM-4*. Querétaro.

Transportation Research Board. (2010). *HCM 2010 : Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.

United Nations - Department of Economic and Social Affairs - Population Division. (2015). *World Urbanization Prospects The 2014 Revision* (Vol. (ST/ESA/SE). New York.

United States Environmental Protection Agency. (2015). MOVES2014a User Guide. Retrieved from https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100NNCY.txt

US Environmental Protection Agency. (2005). EPA's National Inventory Model (NMIM), A Consolidated Emissions Modeling System for MOBILE6 and NONROAD. Retrieved from www.epa.gov/otaq/models/nmim/420r05024.pdf

Volvo Research and Educational Foundations, & Regional Plan Association. (2016). Why Goods Movement Matters.

Watanatada, T., Dhareshwar, As., & Rezende-Lima, P. R. (1987). *Vehicle Speeds and Operating Costs*. *Models for Road*. Washington, D.C. Retrieved from http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2000/04/05/000178830_98101911002866/Rendered/PDF/multi_page.pdf

World Road Association. (2018). PIARC. Retrieved May 20, 2018, from https://www.piarc.org