



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Variación en las emisiones contaminantes de los vehículos debido a cambios en la geometría vial en carreteras de Colombia

Camila Andrea Díaz Jaimes

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2020

Variación en las emisiones contaminantes de los vehículos debido a cambios en la geometría vial en carreteras de Colombia

Camila Andrea Díaz Jaimes

Tesis de grado para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director:
John Jairo Posada Henao, Doctor en Ingeniería

Grupo de Investigación:
Vías y Transporte – VITRA

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2020

A la memoria de mi madre y mis nonitos que me enseñaron el valor de la libertad, la justicia y la equidad.

Agradecimientos

Al profesor John Jairo Posada Henao, director de esta tesis, por su apoyo, acompañamiento, orientación y paciencia.

A la Agencia Nacional de Infraestructura y a las empresas Concesionaria Vial del Oriente, Asociación Público-Privada APP GICA S.A y Concesionaria Desarrollo Vial al Mar – DEVIMAR, sin su valiosa información este trabajo no se hubiese podido materializar.

Al ingeniero Jhon Tacué por su asesoría en el diseño geométrico de vías.

A Edwin por su compañía y apoyo en el último empujoncito.

A mi mejor amiga Francly porque siempre ha estado ahí para mí, en los mejores y peores momentos dándome ánimos.

A la Universidad Nacional de Colombia, a todos sus trabajadores y docentes

Resumen

En la actualidad debido a las afectaciones en la salud de las personas y al medio ambiente producidas por la contaminación atmosférica los gobiernos y organizaciones como la Organización de las Naciones Unidas han incluido en sus políticas públicas iniciativas que contribuyan a la disminución de las emisiones, entre estas las emitidas por las fuentes móviles como son los vehículos de transporte.

Las emisiones vehiculares, y su cantidad, se ven afectadas por diferentes parámetros entre ellos la geometría de la carretera, la operación de la carretera y los vehículos, los cuales influyen directa e indirectamente en el aumento del consumo de combustible y así en las emisiones contaminantes.

El objetivo de este estudio es estimar la variación de las emisiones vehiculares debida a cambios geométricos de la carretera. El estudio se realiza con la ayuda de un modelo que permite estimar las emisiones acordes con diferentes parámetros geométricos de la carretera (especialmente la pendiente y curvatura) aplicado a 7 tipos de carretera (según su geometría) y diferentes proyectos viales donde se realicen intervenciones de mejora. Los resultados obtenidos son la cantidad de emisiones vehiculares para dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre SO_2 y material particulado (PM).

Se encontró que para las emisiones por tipos de geometría al pasar de una carretera recta y plana a una muy ondulada y sinuosa las emisiones de CO_2 en un auto liviano disminuyen el 16% y en los camiones C6 se presenta un aumento del 18%; y en las intervenciones se tiene que cuando disminuyen la curvatura y la pendiente de la carretera las emisiones disminuyen, pero si sólo disminuye la curvatura y hay aumentos en la pendiente, así sean pequeños, las emisiones en general aumentan.

Palabras clave: Emisiones contaminantes, tipología vehicular, geometría vial, clases de carreteras.

Air pollution emission variation due to changes in the geometry of the road in Colombian´s roads.

Abstract

Currently due to the negative effects on human health and the environments caused by the atmospheric pollution governments and organizations such as the World Health Organization (WHO) have included in their public policies some initiatives that contribute to reducing emissions, among these emissions emitted from mobile sources such are the transport vehicles.

Vehicle emissions and their quantity are affected by different parameters among them the road geometry, operation of the road and vehicles, which directly and indirectly affect the increase in fuel consumption and thus polluting emissions.

The aim of this study is to estimate the variation of vehicle emissions due to geometric changes on the road. This study is carried out with a model that allows to estimate emissions accordingly to different geometric parameters of the road (especially the slope and curvature) applied on 7 types of road (accordant to their geometry) and different roads projects where improvement interventions. The obtained results are the vehicle emissions quantity for carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and material particles (PM).

It was found that for emissions by type of geometry, when moving from a straight and level road to a winding and severely undulating road, CO₂ emissions in a light car decrease 16% and C6 trucks there is an increase in 18%; in the road interventions, it was observed that when the curvature and the slope of the road decrease, the emissions decrease, but if only the curvature changes and there are increases in the slope, so they are small, the emissions in general increase.

Keywords: emissions, types of vehicles, road geometry, road classification

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVII
Introducción	1
1. Planteamiento del problema, objetivos y otros.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	5
1.3 Pregunta de la investigación	9
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos.....	9
1.5 Alcance	10
1.6 Hipótesis	10
2. Marco teórico.....	11
2.1 Emisiones de contaminantes atmosféricos.....	11
2.2 Emisiones vehiculares.....	13
2.3 Combustibles para motores de combustión interna	15
2.4 Principales contaminantes atmosféricos emitidos por la combustión de combustibles fósiles.....	20
2.4.1 Metano – CH ₄	21
2.4.2 Hidrocarburos – HC	21
2.4.3 Monóxido de Carbono – CO	21
2.4.4 Dióxido de Carbono – CO ₂	23
2.4.5 Óxidos de Nitrógeno – NO _x	24
2.4.6 Dióxido de Nitrógeno – NO ₂	25
2.4.7 Material Particulado - PM.....	26
2.4.8 Dióxido de Azufre – SO ₂	28
2.5 Emisiones por tipo de combustible	28
2.6 Modelos para estimar emisiones contaminantes	30
2.6.1 Modelo MOVES.....	30
2.6.2 Modelo COPERT	31
2.6.3 Modelo CMEM.....	32
2.6.4 Modelo EMFAC	32

2.6.5	Modelo IVE.....	33
2.6.6	Modelo MODEM.....	34
2.6.7	HDM-4.....	34
2.7	Parámetros que afectan la cantidad de contaminantes emitidos.....	37
2.7.1	Peso del vehículo.....	37
2.7.2	Edad del vehículo.....	37
2.7.3	Velocidad.....	37
2.7.4	Pendiente.....	38
2.7.5	Estilo de conducción.....	38
2.8	Antecedentes de investigaciones similares.....	39
2.8.1	Estudio en la Ciudad de Flint, Michigan, Estados Unidos:.....	39
2.8.2	Estudio en el estado de Vermont, Estados Unidos.....	40
2.8.3	Estudio realizado en el túnel de Caldecott, en el estado de California, Estados Unidos:.....	41
2.8.4	Estudio en el distrito de Headingley, Inglaterra.....	43
2.8.5	Impactos de la pendiente de una vía en el consumo de combustible.....	44
2.8.6	Impacto de las glorietas en las emisiones.....	45
2.8.7	Incorporación de modelos de emisiones vehiculares en los procesos de diseño geométrico de autopistas.....	46
2.8.8	Un método para estimar las emisiones de efecto invernadero basado en el diseño geométrico de una carretera y su aplicación en Corea del Sur.....	47
2.8.9	Impacto del diseño geométrico horizontal y de las características operacionales en carreteras de dos carriles sobre las emisiones vehiculares.....	48
2.8.10	Efectos ambientales: Análisis paramétrico del submodelo del HDM-4.....	49
3.	Metodología.....	51
3.1	Revisión bibliográfica.....	51
3.2	Elección del modelo de estimación de emisiones vehiculares.....	53
3.3	Datos requeridos por el modelo elegido.....	53
3.4	Proyectos viales que considerar.....	61
3.5	Organización de los datos a ingresar en HDM-4.....	62
3.5.1	Datos para la estimación de emisiones contaminantes según diferentes condiciones geométricas de carretera.....	63
3.5.2	Datos para la estimación de emisiones contaminantes para los diferentes proyectos viales.....	66
3.6	Estimación de las emisiones y análisis de la variación.....	68
4.	Resultados.....	69
4.1	Emisiones por tipo de geometría vial.....	69
4.1.1	Emisiones de un vehículo y para los 7 tipos de geometría.....	69
4.1.2	Emisiones afectadas por el TPD y para los 7 tipos de geometría.....	79
4.2	Emisiones por un vehículo y tipo de intervención.....	79
4.2.1	Intervenciones 1 y 5.....	79
4.2.2	Intervenciones 2 y 4.....	87
4.2.3	Intervenciones 3 y 6.....	97
4.3	Emisiones afectadas por el TPD circulante en las carreteras y por tipo de intervención.....	103
4.3.1	Intervenciones 1 y 5.....	103
4.3.2	Intervenciones 2 y 4.....	110
4.3.3	Intervenciones 3 y 6.....	119

5. Conclusiones y recomendaciones.....	125
5.1 Conclusiones.....	125
5.2 Recomendaciones.....	132
A. Anexo: Matriz de modelos de estimación de emisiones	135
B. Anexo: Información carreteras seleccionadas.....	135
C. Anexo: Estimación de emisiones por tipo de geometría vial.....	136
D. Anexo: Resultados.....	137
Bibliografía	138

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Emisiones de CO según fuente de origen, en 2013.....	22
Figura 2-2: Emisiones de CO ₂ según fuente de origen, en 2103	23
Figura 2-3: Emisiones de NOx según fuente de origen, en el 2013	25
Figura 2-4: Emisiones de PM ₁₀ según fuente de origen, en 2013	27
Figura 2-5: Emisiones de PM _{2,5} según fuente de origen, en 2013	27
Figura 2-6: Proceso de combustión ideal	29
Figura 3-1: Datos requeridos en la sección “Datos globales del tramo”	54
Figura 3-2: Subidas+bajadas.....	55
Figura 3-3: Curvatura horizontal.....	56
Figura 3-4: N° de subidas + bajadas	57
Figura 3-5: Datos requeridos en la sección “Estado del pavimento”	58
Figura 3-6: Estructura pavimento para los 7 tipos de geometría.....	64
Figura 3-7: Tramificación de las carreteras.....	67
Figura 4-1: Emisiones de CO ₂ en autos livianos.....	70
Figura 4-2: Emisiones de PM y SO ₂ en autos Livianos.....	71
Figura 4-3: Emisiones de HC, CO y NOx en autos livianos.	72
Figura 4-4: Emisiones de CO ₂ en camiones C5.....	75
Figura 4-5: Emisiones de NOx en camiones C5.	76
Figura 4-6: Emisiones de HC, CO, PM y SO ₂ en camiones C5.....	77
Figura 4-7: Variación de las emisiones en las intervenciones 1 y 5.	81
Figura 4-8: Variación de las emisiones en autos livianos para las intervenciones 1 y 5.....	82
Figura 4-9: Variación de las emisiones en camiones C3-C4 para las intervenciones 1 y 5.....	85
Figura 4-10: Variación de las emisiones en la intervención 2 y 4.....	89
Figura 4-11: Variación de las emisiones en autos livianos para las intervenciones 2 y 4.....	91
Figura 4-12: Variación de las emisiones en camiones C5 para las intervenciones 2 y 4.....	94
Figura 4-13: Variación de las emisiones en las intervenciones 3 y 6.	98
Figura 4-14: Variación de las emisiones en autos livianos para las intervenciones 3 y 6.....	99
Figura 4-15: Variación de las emisiones en camiones C6 para las intervenciones 3 y 6.....	101

Figura 4-16:	Variación de las emisiones en las intervenciones 1 y 5 considerando TPD.	104
Figura 4-17:	Variación de las emisiones en autos livianos afectados por el TPD para las intervenciones 1 y 5.	105
Figura 4-18:	Variación de las emisiones en camiones C3-C4 afectados por el TPD para las intervenciones 1 y 5.	108
Figura 4-19:	Variación de las emisiones en las intervenciones 2 y 4.	111
Figura 4-20:	Variación de las emisiones en autos livianos afectados por el TPD para las intervenciones 2 y 4.	113
Figura 4-21:	Variación de las emisiones en camiones C5 afectados por el TPD para las intervenciones 2 y 4.	116
Figura 4-22:	Variación de las emisiones en las intervenciones 3 y 6.	119
Figura 4-23:	Variación de las emisiones en autos livianos afectados por el TPD para las intervenciones 3 y 6.	121
Figura 4-24:	Variación de las emisiones en camiones C6 para las intervenciones 3 y 6.	122

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Propiedades fisicoquímicas de la gasolina.....	17
Tabla 2-2: Propiedades fisicoquímicas del ACPM.....	20
Tabla 2-3: Emisión de contaminantes por tipo de combustible.....	29
Tabla 2-4: Clasificación de vehículo en HDM-4	36
Tabla 3-1: Datos mínimos y básicos requeridos para alimentar HDM-4.....	60
Tabla 3-2: Tipo de intervención por carretera y unidad funcional o tramo	62
Tabla 3-3: Tipos de geometría definidas por HDM-4.....	63
Tabla 3-4: Características parque vehicular usado en HDM-4	64
Tabla 3-5: Datos usados en la sección de Estado del pavimento	65
Tabla 3-6: TPD usado para los 7 tipos de geometría	66
Tabla 4-1: Variación de emisiones autos livianos.....	73
Tabla 4-2: Variación de emisiones en camiones C5	78
Tabla 4-3: Variaciones en la geometría vial para las Intervenciones 1 y 5.	80
Tabla 4-4: Resultados para autos livianos en las intervenciones 1 y 5.....	83
Tabla 4-5: Resultados para camiones tipo C3-C4 en las intervenciones 1 y 5.	86
Tabla 4-6: Variaciones en la geometría vial para las Intervenciones 2 y 4.	88
Tabla 4-7: Características geométricas carreteras con intervención 4.	88
Tabla 4-8: Resultados para autos livianos en las intervenciones 2 y 4.....	92
Tabla 4-9: Resultados para camiones C5 en las intervenciones 2 y 4.	95
Tabla 4-10: Variaciones en la geometría vial para las Intervenciones 3 y 6.....	97
Tabla 4-11: Resultados para autos livianos en las intervenciones 3 y 6.	100
Tabla 4-14: Resultados para autos livianos en las intervenciones 3 y 6.	102
Tabla 4-13: Resultados para autos livianos en las intervenciones 1 y 5.	106
Tabla 4-14: Resultados para camiones tipo C3-C4 afectado por TPD en las intervenciones 1 y 5.	109
Tabla 4-15: Resultados para autos livianos en las intervenciones 2 y 4.	114
Tabla 4-16: Resultados para autos livianos en las intervenciones 2 y 4.	117
Tabla 4-17: Resultados para autos livianos en las intervenciones 3 y 6.	121
Tabla 4-18: Resultados para camiones C6 afectados por el TPD en las intervenciones 3 y 6.....	123

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Termino
A	Área frontal del vehículo
a	Coefficiente de resistencia a la rodadura
a_t	Aceleración del vehículo
ARB	Air Resources Board's
ACPM	Aceite combustible para motores
ANI	Agencia Nacional de Infraestructura
atm	Atmosfera
B	Coefficiente de resistencia rotacional
°C	Grados centígrados
C	Coefficiente de resistencia aerodinámica
C_d	Coefficiente de resistencia aerodinámica del vehículo
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
CONAMA	Comisión Nacional de Medio Ambiente
CO	Monóxido de carbono
CORPODIB	Corporación Para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia
COVS	Compuestos orgánicos volátiles
EMFAC	Modelo de Factor de Emisiones
EPA	Environmental Protection Agency
ESTRAUS	Modelo de equilibrio oferta-demanda para redes multimodales de transporte urbano con múltiples clases de usuarios
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística

XVII Variación en las emisiones contaminantes de los vehículos debido a cambios en la geometría vial en carreteras de Colombia

g	Gravedad
GCE	Grupo Consultivo de Expertos
g/cm ³	Gramos por centímetros cúbico
GEI	Gases de efecto invernadero
g/h	Gramos por hora
g/mi	Gramos por milla
Gt	Giga toneladas
HC	Hidrocarburos
HDM-4	Highway Development and Management – v.4
HFC	Hidrofluorocarburos
HNO ₃	Ácido nítrico
INVIAS	Instituto Nacional de Vías
IOM	Índice mínimo de octano
IOR	Índice máximo de octano
IPCC	Panel intergubernamental del cambio climático
kg	Kilogramos
kg/l	Kilogramos por litro
kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
kg/kmol	Kilogramo por kilo mol
Kj /Kg	Kilojulio por kilogramo
km	Kilómetros
km/h	Kilómetros por hora
kPa	Kilo pascales
kWh/m ³	Kilo vatio hora por metro cúbico
kWh/t	Kilo vatio por tonelada
kWh-s/m	Kilo Vatio segundo por metro
kWh-s ² /m ²	Kilo vatio segundo cuadrado por metro cuadrado
kWh-s ³ /m ³	Kilo vatio segundo cúbico por metro cúbico
μ	Rodadura de los neumáticos coeficiente de resistencia
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
MJ/kg	Mega julios por kilogramo

MJ/l	Mega julios por litro
MINENERGIA	Ministerio de Energía de Chile
μm	Micro metros
mm^2/s	Milímetros cuadrados por segundo
m/s	Metro por segundo
m/s^2	Metro por segundo cuadrado
Mt	Megatoneladas
NASA	Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio
N_2O	Óxido nitroso
NO_x	Óxidos de nitrógeno
O_3	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Potencia
ρ_a	Densidad del aire
PFC	Perfluorocarbonos
PM	Material particulado
PM_{10}	Material particulado de 10 micras
$\text{PM}_{2,5}$	Material particulado de 2,5 micras
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
RON	Número de cetano
SEMARNAT	Secretaría de medio ambiente y recursos naturales
SF_6	Hexafluoruro de azufre
SO_4	Sulfato
t	Tonelada
θ	Ángulo de inclinación de la pendiente del camino
W	Vatios
V	Velocidad
VSP	Potencia específica vehicular

Introducción

La presente investigación presenta la metodología usada para la estimación de emisiones contaminantes vehiculares y su cantidad para 7 tipos de carreteras, que se clasifican según sus características geométricas y la variación en la cantidad de estos contaminantes cuando se presentan cambios en la geometría debidos a intervenciones en las carreteras.

Este trabajo se desarrolla ya que en la actualidad la contaminación atmosférica está causando graves afectaciones ambientales como el cambio climático que genera deshielo de los polos, aumento en el nivel del mar, periodos más intensos de lluvias o sequias, entre otras muchas; y también afectaciones en la salud humana como las enfermedades respiratorias asociadas al material particulado. Esta contaminación es producida por diferentes actividades económicas, y dentro de estas las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte son las que más han crecido en comparación con los demás sectores y el transporte de carretera es el que mayor aporte de emisiones tiene, por lo que se hace necesario conocer el comportamiento de las emisiones en diferentes situaciones de geometría vial así como su variación cuando se presentan proyectos de mejora en las carreteras y tener así estimación de que tan beneficiosas son estas intervenciones en cuanto a la contaminación producida por el tráfico vehicular que por estas circula.

Diferentes estudios han estimado las emisiones para diferentes condiciones de pendiente o curvatura en la carretera, pero se conoce poco el impacto que tienen las mejoras o intervenciones que se hacen al ejecutar un proyecto vial, por ello en este trabajo se estiman las emisiones para dichos cambios, como se ha mencionado antes.

Para esto primero se realizó una revisión bibliográfica donde se identifica la flota vehicular típica que circula por las carreteras, los combustibles usados, las principales emisiones contaminantes producidas y diferentes modelos que permiten su estimación. Teniendo identificadas las emisiones se elige un modelo que permita estimarlas y que tenga en

cuenta características geométricas de la carretera; luego con la elección del modelo a usar se hace una revisión de los datos que son requeridos para alimentarlo y se estiman las emisiones para 7 tipos de carreteras que se diferencian entre sí por la curvatura y pendiente pasando de carreteras planas y rectas a carreteras muy sinuosas y onduladas y se analiza como varían las emisiones para cada tipo de carretera y para cada categoría vehicular.

A la par de esto se consultan diferentes proyectos viales donde se planea realizar intervenciones a las carreteras; al tener identificados los datos requeridos por el modelo y los proyectos viales se solicita la información a las entidades competentes. Se organizan los datos de las carreteras como los pide el modelo, se estiman las emisiones para las carreteras actuales y proyectadas y se analiza como varían estas.

El documento presenta en el capítulo 1 el Planteamiento del problema la justificación, los objetivos, el alcance y la hipótesis, en el capítulo 2 se presenta el marco teórico donde se describen los combustibles usados en motores de combustión interna, sus principales emisiones contaminantes, los modelos que permiten su estimación y diferentes parámetros que han sido estudiados que afectan la cantidad de contaminantes emitidos. El capítulo 3, tiene la metodología desarrollada para la obtención de resultados.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos donde se aprecia como varían las emisiones dependiendo del tipo de carretera y debido a las intervenciones que se plantean en diferentes carreteras, y en el capítulo 5 las conclusiones obtenidas en la investigación y recomendaciones que se derivan del trabajo realizado.

1. Planteamiento del problema, objetivos y otros

1.1 Planteamiento del problema

Debido a la creciente problemática ambiental, entre esta la contaminación atmosférica la cual no sólo trae afectaciones al clima sino también a la salud de las personas expuestas a esta, los gobiernos y organizaciones no gubernamentales han creado políticas que contribuyan a la mitigación de la contaminación, algunas de estas son:

- Convenio de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia, celebrado en 1979, cuyo objetivo es reducir gradualmente y prevenir la contaminación, incluida la que se desplaza largas distancias, traspasando fronteras, como lo es la contaminación atmosférica (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020).
- Convenio marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático de 1994: su objetivo principal es estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero de modo que disminuyan las afectaciones antropogénicas en el sistema climático, permitiendo que los ecosistemas se adapten al cambio climático ya generado y asegurar la producción alimentaria y el desarrollo económico de una manera sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).
- Protocolo de Kyoto: firmado en el año 1997, tiene como objetivo que los diferentes países vinculados se comprometan, dentro de un marco legal, a la reducción de 6 gases contaminantes: Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y los gases industriales, hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

- Acuerdo de París firmado en el 2015 en las 21ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21) y cuyo objetivo principal es evitar que la temperatura global aumente más de 1,5 grados centígrados mediante el compromiso de 125 países, dentro de estos compromisos están informar periódicamente sobre sus emisiones y sobre los esfuerzos que se toman para disminuir las emisiones (United Nations Climate Change, 2020).

Sin embargo, se observa que, pese a los esfuerzos realizados por los gobiernos desde la década de los setenta las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han venido en ascenso. Entre el año de 1970 y el año 2000 las emisiones de CO₂ fueron en promedio de 0,4 Gt/año, pero entre el año 2000 y 2010 se registraron las más altas emisiones en la historia de la humanidad llegando a 49 Gt/año para el año 2010. El principal motor que ha impulsado el crecimiento acelerado de las concentraciones de gases contaminantes a nivel mundial ha sido el crecimiento económico y demográfico, las emisiones derivadas de estos factores han sido superiores a las reducidas gracias a las políticas de energías sustentables (IPCC, 2014).

Diferentes sectores económicos son los responsables de la producción de GEI, el sector transporte genera el 14% del total de las emisiones, pero las emisiones de este sector han tenido el mayor crecimiento en comparación con los demás sectores económicos, entre el año 1970 y 2014 se duplicaron. En el sector transporte, el 72% de sus emisiones son causadas por el transporte de carretera (IPCC, 2014).

Unas de las principales causas de que el transporte de carretera sea el sector que mayor aporte a la contaminación es su acelerado crecimiento, en Colombia entre el año 2011 y el 2018 el parque vehicular ha tenido un incremento del 17,21% (Ministerio de Transporte, 2018).

Diferentes factores influyen en la cantidad de gases contaminantes emitidos por los vehículos, como los son, entre otros; el tipo de vehículo, el combustible, la velocidad, el estilo de conducción y la pendiente de la vía (Chester & Harrison, 1987; Clark, Kern, Atkinson, & Nine, 2016; Greenwood, Dunn, & Raine, 2007; Posada, 2012; Yao, Wei, Perugu, Liu, & Li, 2014). Algunos de estos parámetros están asociados a la potencia del vehículo (a su vez la cantidad de gases emitidos están asociados a la potencia del

vehículo). Los elementos que más demandan potencia en un vehículo son: la velocidad, el peso y la pendiente. A medida que se aumenta la potencia requerida, la cantidad de combustible quemado aumenta, y la tasa de emisiones reguladas producidas generalmente aumentará (Clark et al., 2016).

Estos parámetros están relacionados con la geometría de la vía, luego estudiar cómo influye la geometría de una vía (en su conjunto y no como elementos separados) permitiría tener herramientas para disminuir los niveles de contaminación atmosférica.

1.2 Justificación

Los problemas ambientales de los últimos años han suscitado interés en la comunidad en general, esto se evidencia con la aplicación de iniciativas como el uso de transporte sostenible, uso racional de los recursos no renovables, mejor disposición de residuos sólidos, entre otros. Pese a esto y la conciencia ambiental que se viene adoptando las actividades humanas continúan afectando en gran medida el medio ambiente. Uno de los factores causantes del deterioro ambiental y con el que se convive a diario es la emisión de contaminantes por parte de los vehículos, problema que va a la par con el crecimiento económico y demográfico, como se había mencionado anteriormente.

Estudios realizados explican que las emisiones del sector del transporte llegaron a 1492,5 Mt en el 2012 que se distribuían de la siguiente manera: 1300 Mt de CO₂, 120 Mt de monóxido de carbono (CO), 35 Mt de óxidos de nitrógeno (NO_x), 25 de HFC, 9 Mt de material particulado (PM) y 3,5 Mt de dióxido de azufre (SO₂) (Santamarta, 2014). En Colombia según cifras del inventario de GEI realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el 2010 el país contribuyó con el 0,46% del total de las emisiones de GEI mundiales (García, Barrera, Gómez, & Suárez, 2015) y en el 2013 las emisiones por parte del sector transporte fueron las siguientes: 23950t de CO₂, 350t de dióxido de nitrógeno (NO₂), 242t de NO_x, 106t de compuestos orgánicos volátiles (COVs), 60t de CO y 50t de CH₄ (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013). Según proyecciones, para el año 2030 Colombia habrá duplicado sus emisiones si no se toman medidas que mitiguen esta situación (García et al., 2015).

Según García et al. (2015) a pesar de que las emisiones generadas por Colombia son bajas, en comparación con otros países, se sitúa dentro de los primeros 40 países que generan GEI debido a la deforestación y con el fin de disminuir las afectaciones ambientales que genera el país el gobierno nacional dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2018 - 2022, ha trazado unos objetivos de desarrollo sostenible donde se busca que todos los sectores productivos del país adopten prácticas de desarrollo económico, social y ambiental sostenible, uso racional y eficiente de los recursos consumidos por los diferentes sectores de la economía, esto con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar el bienestar de toda la población y la adaptación de los territorios al clima del futuro. De igual forma Colombia en la convención del marco del cambio climático mundial, realizado en París, Francia, en el 2015 se comprometió a reducir sus emisiones en un 20% para el año 2030.

Todos estos esfuerzos, tanto nacionales como internacionales, se han realizado debido a que el incremento de las emisiones tiene cada vez más impactos desfavorables tanto para el medio ambiente como para la humanidad.

Dentro de las afectaciones ambientales se tiene el cambio climático, una de las mayores evidencias que se está atravesando por este es el aumento en la temperatura, entre el año 1905 y el 2005 la temperatura marina y terrestre tuvo un incremento de 0,74 °C, siendo las regiones terrestres las de incrementos más rápidos predominando la región Norteamericana, Asiática y Europea (Semarnat, 2009). Según la Organización Mundial Meteorológica después de la industrialización la temperatura global ha aumentado un grado centígrado (los 10 primeros meses de 2018 fue 0,98 grados por encima de los niveles que existían entre 1850 y 1900) y los registros de mayor temperatura se encuentran entre el 2015 y 2019 y de seguir esta tendencia la temperatura global aumentaría entre 3 y 5 grados centígrados (British Broadcasting Corporation, 2018). Según el informe del IPCC, se pudiera pensar que un grado no representa mayor cosa, pero si las temperaturas siguen aumentando y los gobiernos no redoblan sus esfuerzos podrían seguir aumentando el nivel del mar, aumentar la acidez de los océanos y disminuirse la capacidad de sembrar alimentos (IPCC, 2014).

Otra consecuencia del cambio climático ha sido el deshielo: la capa de hielo del Ártico se ha reducido en promedio unos 950 mil km², cerca del 20% de su superficie en los últimos

30 años y en la Antártida según datos de la NASA entre el año 2002 y 2006 cerca de 150 a 250 km³ de hielo se han derretido (Semarnat, 2009). El deshielo y el aumento en la temperatura han ocasionado también un aumento en el nivel del mar, este subió unos 17 centímetros en el siglo pasado, sin embargo, la velocidad en la última década es casi el doble que en el siglo pasado (Church & White, 2006) entre mayo del 2014 y el 2019 se ha incrementado en 5 mm por año (McGrath, 2019).

Dentro de las demás consecuencias que tiene el cambio climático están los asociados a los problemas con la producción agrícola, las inundaciones y la propagación de enfermedades como el dengue o la malaria, extinción de diferentes especies de fauna y flora, eventos más extensos de calor, extinción de los corales marinos de los cuales dependen muchas personas para alimentos, entre otros (Becerra & Mance, 2009).

En América Latina ya se observan los impactos que ha tenido el cambio climático como las inundaciones, las cuales no son nuevas, pero cada vez son menos predecibles y más intensas y han dejado en países como Argentina y Uruguay pérdidas de hasta 2500 millones de dólares para el año 2018 y a la par, cuando en unas regiones se presentan lluvias en otras se experimentan sequías extensas, como en Chile donde hay escases de lluvia desde hace una década (Gozzer, 2019). En Colombia las afectaciones debidas al cambio climático son visibles, dentro de las más graves encontramos que ha desaparecido el 84% del área de glaciación, pérdidas de playas y erosión en las zonas costeras afectando no sólo la naturaleza sino la economía de estos sectores debido a la disminución del turismo y al igual que en las demás regiones el aumento de lluvias en algunas zonas y sequías donde se tenían lluvias regulares aumentando la vulnerabilidad a los incendios forestales (Semana, 2017).

En el país también se ha presentado la disminución en un 30% de la lluvia, lo que generaría escasez de agua en las zonas más pobladas del país y la capacidad hidroeléctrica se podría disminuir. Con el aumento del nivel del mar se podrían ver afectadas las zonas industriales de la ciudad de Barranquilla y Cartagena y la pérdida de cerca del 17% del territorio de San Andrés y 500.000 zonas costeras. En solo 45 años, 78% de los picos nevados podrían desaparecer, el 56% de los páramos podrían transformarse en otros ecosistemas y debido al clima seco se aumentaría la desertificación del suelo (Becerra & Mance, 2009).

Dentro de las afectaciones que las emisiones tienen en la salud humana se ha encontrado que la inhalación de CO, debido a su toxicidad, genera dificultades en el transporte de oxígeno a las células y tejido. El CO al ingresar al organismo se une a las enzimas Hem de la hemoglobina, desplazando el oxígeno, lo que genera una hipoxia celular generalizada, a esto se le llama carboxihemoglobina (Téllez, Rodríguez, & Fajardo, 2006). El aumento de la morbilidad y la mortalidad en personas mayores y niños asociado a problemas de asma y bronquitis crónica está relacionada con los efectos del SO₂ (Fundación para la Salud Geoambiental, 2013).

La exposición al NO₂ en un tiempo entre 1 a 24 horas tiene efectos inmediatos en el aumento de problemas respiratorios incluyendo inflamación de las vías respiratorias y el aumento de síntomas para las personas que padecen asma. Con la exposición a largo plazo de NO₂ con la formación de partículas que se ubican en todo el tracto respiratorio, pueden aumentar problemas cardiovasculares, bronquitis, asma y muerte prematura para la población más vulnerable (Acevedo, Boracejo, & Velásquez, 2013).

El PM menor a 2.5 µm al ser inhalado tiende a evadir el sistema de defensa del sistema respiratorio y alojarse en el tejido pulmonar aumentando la probabilidad de padecer de neumonía, asma y bronquitis, especialmente en niños y ancianos. En Estados Unidos se encontró que la exposición a largo plazo a 10 µg/m³ de PM menor a 2.5 µm, aumenta entre un 5% y 10% la mortalidad en general y en un porcentaje más alto la mortalidad a causa de problemas cardiorrespiratorios, en este mismo estudio se encontró que un incremento de 1 µg/m³ de la media anual de este contaminante aumenta en un 3,2% la incidencia de enfermedades respiratorias en adultos entre los 18 y 65 años (Sbarato et al., 1997)

Debido a todas las afectaciones que se tienen por la contaminación atmosférica, surge la necesidad de estudiar e identificar nuevas estrategias que podrían mitigar el impacto negativo de esta en la calidad del aire. Dentro del sector transporte, como se mencionaba anteriormente, el que mayor aporte tiene es el transporte por carretera (con el 72% del total de las emisiones provenientes del transporte) (IPCC, 2014). Según lo descrito en el numeral 1.1 diferentes estudios realizados han identificado diversos factores que inciden en la cantidad de emisiones contaminantes producidas por los vehículos. Se han estudiado factores vehiculares como el peso del vehículo, la edad (Nigiel, Kern, Atkinson, & Nine, 2002) y la tecnología de este, factores de operación como la velocidad y el estilo de

conducción y factores viales como la pendiente de la vía (Clark et al., 2016) y muchos de estos parámetros están asociados a la geometría de una vía.

En la revisión bibliográfica que se ha llevado a cabo para este trabajo se ha observado que los estudios existentes han evaluado cada uno de estos parámetros de forma aislada y no en conjunto. Al estudiar cómo las características de la geometría vial, de forma global, pueden incidir en la cantidad de emisiones generadas por los vehículos, se podrían tener herramientas para plantear que mejoras geométricas se puedan realizar a una carretera para que sean ambientalmente viables y disminuya la contaminación atmosférica generada por los vehículos que circulen por ella.

1.3 Pregunta de la investigación

¿Cuál es el efecto en las emisiones vehiculares que generan los cambios en la geometría de una carretera?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Estimar la variación de las emisiones vehiculares debida a cambios geométricos de la carretera.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar las emisiones contaminantes que generan los vehículos a gasolina y ACPM y los modelos de simulación que permiten su estimación.
- Estimar las principales emisiones, y cantidad de estas, según condiciones geométricas de la carretera.
- Determinar la variación de las principales emisiones generadas por los vehículos debida a cambios en la geometría vial.

1.5 Alcance

Se realizará la estimación de la variación de las emisiones vehiculares acorde con el cambio en el trazado de carreteras que funcionen a flujo libre. La estimación se realizará para dos escenarios: uno actual con las condiciones geométricas existentes, y uno futuro con las condiciones geométricas proyectadas. Se evaluarán diferentes tipos de vehículos, entre los que se encuentran los livianos, buses y camiones, representativos de la flota vehicular circulante por la carretera. Dentro de estos vehículos solo se tendrán en cuenta los vehículos con motores a gasolina y diésel que utilizan gasolina y ACPM como fuente de energía para su locomoción, respectivamente.

Esta estimación se llevará a cabo mediante modelos para estimación de emisiones, donde se evaluarán los parámetros geométricos de forma global y no como parámetros aislados.

1.6 Hipótesis

La cantidad de emisiones vehiculares disminuyen al mejorar la geometría de una carretera.

2.Marco teórico

A continuación, se presentan diferentes temas que permiten una mejor comprensión de cómo las características geométricas de una carretera pueden llegar a afectar la cantidad de emisiones contaminantes iniciando con temas básicos como qué es la contaminación atmosférica, cuáles son los principales contaminantes, qué combustibles son los usados por los vehículos; pasando a mencionar y dar una breve explicación de los modelos que permiten la estimación de los contaminantes y algunos de los factores que inciden en la cantidad de contaminación emitida por los vehículos

2.1 Emisiones de contaminantes atmosféricos

La contaminación atmosférica es la presencia en el aire de elementos que cambian su composición fisicoquímica original y que traen consigo implicaciones de riesgo, daño o molestia para las personas o ecosistemas donde se genere (Aranjuez et al, 1999). La Organización Mundial de la Salud la define como “la aparición de sustancias extrañas en determinadas cantidades y durante determinados periodos de tiempo, que pueden resultar nocivas para el ser humano, los animales, las plantas o las tierras, así como perturbar el bienestar o el uso de los bienes” (Oms, 2005).

El principal aspecto que define los efectos nocivos de los contaminantes es su concentración, por lo cual es de suma importancia controlar la presencia y los niveles de estos elementos y estos pueden ser de carácter local, cuando su impacto afecta zonas muy próximas al mismo, o global, que debido a las singularidades del contaminante, se afecta la totalidad del planeta y zonas que se encuentran a grandes distancias (Amable et al., 2017).

Los contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en primarios y secundarios:

- Los contaminantes primarios son los emitidos hacia la atmósfera directamente, como por ejemplo SO_2 , que perjudica las plantas y tiene efectos de irritación en los pulmones (Amable et al., 2017).
- Los contaminantes secundarios son los que se generan a partir de reacciones químicas en la atmósfera y que afectan a los contaminantes primarios, uno de los principales son el NO_2 , y el ozono (O_3) (Amable et al., 2017).

Gracias a esta distinción se puede tener un control de la contaminación atmosférica, ya que la disminución de los contaminantes primarios disminuye la concentración de los secundarios, aunque no siempre se cumple esta proporción. (Boldo, 2019)

La concentración de los contaminantes en el aire se define por las emisiones de las fuentes naturales, sin embargo, son las acciones humanas las que causan los cambios más rápidos y destructivos. Con base en lo anterior se dice que las emisiones pueden ser de origen natural o antropogénico (Boldo, 2019).

- Emisiones de Origen natural: son aquellas que provienen de la actividad natural de la geosfera, biosfera, atmósfera e hidrosfera como: las erupciones volcánicas y los incendios forestales que se producen de manera natural (Aránguez et al., 1999) . Este tipo de emisiones hacen parte de los ciclos naturales del planeta, los cuales ayudan a regularizar la temperatura global, dan pie al equilibrio químico de la atmósfera y han tenido una gran influencia en la evolución de los ecosistemas (Boldo, 2019).
- Emisiones de Origen antropogénico: son las generadas por las actividades del ser humano como el transporte, la industria, la agricultura y la ganadería, y la incineración de residuos sólidos; su principal fuente es la combustión de combustibles fósiles (Aránguez et al., 1999).

Las fuentes que emiten contaminación, normalmente, se definen como estacionarias o móviles, una de las fuentes móviles de contaminación del aire con más impacto es el transporte terrestre, que se refiere a las emisiones generadas por el tráfico vehicular, ya que estas fuentes se encuentran muy cerca a los sitios en donde las personas viven, pasean y trabajan. Por el contrario, las fuentes estacionarias, son principalmente las

industrias, las cuales durante su proceso de producción usualmente utilizan la quema de diferentes combustibles (Ubilla & Yohannessen, 2017).

2.2 Emisiones vehiculares

Las emisiones vehiculares se definen como los elementos que son entregados a la atmosfera por las fuentes de emisión móviles en ruta, o fuera de ruta, que posteriormente generan una concentración aérea de contaminantes. Existen algunas metodologías que se emplean para medir una aproximación de las emisiones vehiculares como los factores de emisión y los modelos de inventario de emisiones, los factores de emisión ofrecen datos de emisión unitaria para algunas combinaciones de tipos de vehículos y algunos modos de uso, están dados por una relación de la cantidad de algún contaminante emitida por la longitud recorrida. Los modelos de inventario de emisiones relacionan las actividades urbanas con los tipos de vehículos y sus modos de uso (Valencia et al., 2015).

El tráfico vehicular se ha impuesto como la principal fuente de contaminación y congestión en las áreas urbanas. El crecimiento continuo del tráfico y de la contaminación que este conlleva, es preocupante debido al impacto en la calidad del aire y por ende en la salud de la población (Péres, Ruiz, Nesmachnow, & Olivera, 2016).

Las emisiones generadas por los vehículos se pueden clasificar como emisiones evaporativas, de tubo de escape y las emisiones de partículas por desgaste de frenos o llantas, a continuación, se describen brevemente cada una de ellas.

- Emisiones evaporativas: son las que se generan por la evaporación del combustible, se puede presentar cuando el vehículo está estacionado, así como cuando está en circulación. La cantidad de estas emisiones depende de diferentes factores como las características del vehículo, la altitud, la temperatura ambiente y principalmente de la presión de vapor del combustible (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2012). La mayoría de las emisiones evaporativas se producen de los sistemas de combustibles, como el tanque, el sistema de inyección y las líneas de combustible (Gaitán & Cárdenas, 2017). Las emisiones evaporativas corresponden a (Gaitán & Cárdenas, 2017):

- Emisiones del motor en caliente: se producen por la volatilización del combustible después de que se apaga el motor.
 - Emisiones de operación: ocurren por fugas de combustible en estado líquido o en vapor, cuando el motor está funcionando.
 - Emisiones durante la recarga de combustible: se producen en el tanque de combustible durante su recarga.
 - Emisiones diurnas: éstas se producen debido al aumento de temperatura del combustible y el aumento de la presión de vapor, a causa de la alta temperatura del ambiente en horas de luz, el calor que aporta el sistema de escape o el calor que refleja la superficie en la cual se circula.
 - Emisiones en reposo: se presentan cuando el motor no está funcionando, por fugas de combustible y permeabilidad del vapor que viaja a través de las líneas de alimentación de combustible
-
- Emisiones de tubo de escape: son las resultantes de la combustión del combustible y son liberadas por el escape del vehículo. Producto de esta combustión se generan una serie de contaminantes como el CO, CO₂, hidrocarburos (HC), NO_x y PM. Este tipo de emisiones dependen de las características, tecnología, mantenimiento y sistema de control de emisiones del vehículo. Así mismo depende de factores de operación como la velocidad de circulación, la frecuencia e intensidad de las aceleraciones y las características del combustible (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2012). Los vehículos más pesados o potentes tienden a producir mayor cantidad de contaminantes con relación a las distancias recorridas; la normativa que regula la construcción de dichos vehículos define desde su tecnología hasta la presencia de equipos que controlen sus emisiones. El mantenimiento del vehículo y los factores operativos de este, tienen un papel importante en las emisiones por escape (SEMARNAT, 2006).
-
- Emisiones de partículas: se producen por la combustión, el desgaste de los neumáticos, recubrimiento de frenos y superficies de rodadura. También pueden ser generadas por el levantamiento del polvo encontrado en las vías o el polvo que se recoge en las llantas (Lara et al., 2009). Existen tres fuentes principales de emisiones de partículas vehiculares (Caballero, 2011):

- Partículas emitidas desde motores Diesel.
- El humo acarreado desde la extracción y combustión del carbón
- El polvo levantado por los vehículos en los caminos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha pronunciado sobre el impacto del material particulado aerotransportado sobre la salud, las cuales están clasificadas según su diámetro, y se define que son de importante cuidado las partículas de 10 micrómetros o menos, porque estas partículas pueden llegar a las zonas más profundas de los pulmones y puede llegar hasta el torrente sanguíneo (Caballero, 2011).

2.3 Combustibles para motores de combustión interna

Los vehículos, en su mayoría, utilizan motores de combustión interna. Un motor de combustión interna es aquel que obtiene su energía mecánica directamente de la energía química de una mezcla comprimida de aire y combustible que se quema dentro de una cámara cerrada o cilindro, esto incrementa la presión y se genera el movimiento lineal del pistón (Orozco, 2014). El motor de combustión interna ha estado en una continua evolución gracias a los avances que ha tenido la ciencia y la tecnología, y sigue siendo la máquina que transforma la energía química en energía mecánica más usada para la propulsión de la mayor parte de medios de transporte en el mundo (Henaó, Romero, & Quintero, 2019).

La combustión es el proceso en el cual el oxígeno presente en el aire reacciona fácilmente con el hidrógeno y carbono presentes en el combustible, de este proceso resulta agua y CO o CO₂ (Crouse & Anglin, 1992).

Los combustibles para motores de combustión interna de mayor uso son los derivados del petróleo, entre estos la gasolina y el ACPM ocupan un puesto importante ya que impulsan el movimiento de millones de vehículos en el mundo (Martín & Sala, 2004).

La formulación de estos combustibles es el resultado de un acuerdo técnico-económico entre las industrias del motor, el sector de la refinación y la energía. En esta formulación también se debe tener presente el impacto de estos sobre el medio ambiente, garantizando algunas cosas como ofrecer un adecuado rendimiento energético en el motor y que las emisiones producidas durante su combustión estén dentro de los estándares

medioambientales que son exigidos (Ministerio de Educación de la República de Cuba, 2010).

A continuación, se describen y explican las principales características de los combustibles que son de relevancia para esta investigación (gasolina y ACPM).

- **Gasolina**

La gasolina es un hidrocarburo, lo que significa que está compuesta principalmente por hidrogeno y carbono. Está se obtiene de la refinación del petróleo y en general se evaporan a bajas temperaturas, es incolora o ligeramente coloreada y su densidad varía entre 0,700 y 0,790 kg/l. Este tipo de combustible es comúnmente usado en los vehículos livianos.

Las principales propiedades que definen la calidad de la gasolina son según el Ministerio de Educación de la República de Cuba (2010):

- Volatilidad: Rapidez con la que se evapora la gasolina. Una gasolina de buena calidad se evapora rápidamente (Crouse & Anglin, 1992), como la volatilidad depende directamente de la temperatura, en zonas donde se producen cambios extremos se ha tenido que definir condiciones diferentes para el verano y para el invierno.
- Contenido de azufre: Un alto contenido de azufre puede disminuir la vida del motor ya que puede generar compuestos ácidos que reducen la eficiencia del aceite lubricante y sus aditivos (Corporación para el Desarrollo de la Biotecnología y Producción Limpia, 2004).
- Número de Octano: Es una de las principales propiedades de la gasolina ya que está relacionada con el rendimiento del motor, el número de octano mide la tendencia de la gasolina a detonar en el motor (Corporación para el Desarrollo de la Biotecnología y Producción Limpia, 2004). Existen dos tipos de octanaje que miden el comportamiento de la gasolina en dos situaciones diferentes, el IOM que es el probado en un motor estático e intenta simular lo que pasa en carretera y el IOR que describe el comportamiento del combustible a bajas velocidades y temperaturas y es medido en el laboratorio.

- **Densidad:** es una propiedad que tiene una gran importancia debido a que afecta diferentes aspectos, por ejemplo, en los sistemas de inyección modernos la masa del combustible inyectado depende de la densidad, ya que pueden haber algunas variaciones en la relación del aire con el combustible lo cual debe ser regulado por un sistema de control apropiado, el cual tiene un nivel alto de importancia en la regulación de los motores, además de ser un indicador de calor y es usado como variable en el proceso de producción.
- **Oxigenación:** son compuestos de alcoholes y éteres, que son usados como blending de gasolinas, principalmente para mejorar el número de octano.
- **Estabilidad:** la gasolina es un producto que debe estar estable durante su almacenamiento, ya que sus propiedades se deben mantener desde el momento de su fabricación hasta el de su consumo. La propiedad de este combustible que se relaciona con este aspecto es la tendencia a sufrir reacciones de oxidación y polimerización.

Algunas de las propiedades fisicoquímicas más importantes de la gasolina y sus valores característicos generales se pueden apreciar en **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1: Propiedades fisicoquímicas de la gasolina

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	kg/l	0,75
Volatilidad	kg/cm ²	0,75
Relación estequiométrica máxima	Aire/combustible	15,2
Calor de Vaporización	kJ/kg	376
Índice de Octano	IOM	85
Índice de Octano	IOR	95
Auto Ignición	°C	367
Poder Calorífico Inferior - PCI	kJ/kg	42900

Fuente: Fernández, Lucas, & Ballesteros (2012)

Debido a que en el momento de la combustión la gasolina no se quema totalmente, se generan hidrocarburos y monóxido de carbono liberados por el tubo de escape contaminando el aire, si la combustión entre la gasolina y el aire fuese perfecta solo se produciría agua y dióxido de carbono (Crouse & Anglin, 1992).

Para que la gasolina obtenga el rendimiento máximo en los motores y se limite la cantidad de contaminación que causa su combustión la mezcla debe estar compuesta por moléculas con número de átomos de carbono que se encuentren entre C_4 y C_{11} y que se destilan entre $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. También debe poseer algunos componentes oxigenados como éteres, derivados del metanol y etanol, y alcoholes en proporciones variables y tener un contenido muy bajo de azufre y nitrógeno. Además, es común que se le agreguen aditivos de estabilidad, antidetonantes, antihielo, detergentes, etc. (Ministerio de Educación de la República de Cuba, 2010).

▪ **ACPM**

Es un combustible líquido derivado del petróleo que se obtiene a partir de la destilación de éste y se encuentra en el grupo de las naftas. Es un líquido viscoso e incoloro o ligeramente rojizo, este último usado para los vehículos agrícolas (Martín & Sala, 2004). Es utilizado en motores cuyo encendido es por compresión (Martí, 1996). Los vehículos que comúnmente utilizan este tipo de combustible son los buses y los vehículos pesados. El ACPM al igual que la gasolina es una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente de parafinas y aromáticos, con un contenido de olefina que alcanza solamente un pequeño porcentaje por volumen. El número de carbonos que lo forman se encuentra entre 10 y 22, aproximadamente. Los motores diésel convencionales usan tan solo el 70% del combustible requerido por un motor comparable que funcione con gasolina. Este combustible también posee mayor masa molecular, densidad y menor volatilidad en comparación con la gasolina (Blumberg, Walsh, & Pera, 2003).

Las principales propiedades que definen la calidad del ACPM son según el Ministerio de Educación de la República de Cuba (2010):

- Índice de cetano: define la calidad del combustible, a mayor número de cetano, menor tiempo tomará la combustión, un índice de cetano de 55 o mayor representará un diésel de óptima calidad (Parreño Ibañez, 2012).
- Viscosidad: La viscosidad se define como una magnitud física que indica cual es la resistencia que tiene una sustancia a fluir. Es un aspecto importante en los sistemas que se encargan de inyectar y generar la atomización del combustible que produce una mezcla homogénea en la cámara de combustión, cuando existe una viscosidad alta se

produce una atomización de mala calidad ya que las gotas son demasiado grandes, por el contrario, una viscosidad baja impide que el combustible llegue a todas las cámaras evitando también que se produzca una mezcla homogénea.

- Densidad: las implicaciones son parecidas a las que se definen para la gasolina, aunque su influencia es más significativa en la regulación de los motores. Las especificaciones definen una densidad mínima de 820 Kg/m^3 , con lo cual se limita el incorporar a esta mezcla componentes muy ligeros y que tengan muy bajo cetano.
- Volatilidad: esta característica tiene un gran papel en el rendimiento de los motores que trabajan con este tipo de combustible. Uno de los parámetros que miden esta propiedad es la curva de destilación, cuando hay puntos finales de destilación altos indica tiempos de combustión elevados, lo cual produce altas emisiones de humo. Otro parámetro es el punto de inflamación, el cual mide la temperatura mínima en la cual se produce la inflamación de los gases provenientes de la evaporación del combustible superficial.
- Estabilidad: este producto también tiene que ser estable en el sentido de que tiene que mantener sus mismas propiedades siempre, desde su fabricación hasta su consumo. Las propiedades que se relacionan a esta propiedad es su tendencia de sufrir reacciones de oxidación y polimerización.
- Contenido de azufre: tal como pasa con la gasolina, la manipulación, distribución, almacenamiento y uso del producto, no debe afectar los equipos con los cuales se realizan estas actividades. El contenido de azufre se define con el mismo método que se usa con la gasolina, la tendencia de formar depósitos se evalúa de la misma forma, pero hay otras propiedades que se relacionan con este aspecto determinada como residuo carbonoso y cenizas.

Algunas de las propiedades fisicoquímicas más importantes del diésel y sus valores característicos se muestran en la **Tabla 2-2**.

Tabla 2-2: Propiedades fisicoquímicas del ACPM

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	0,835
Poder calorífico	kcal/kg	10200
Punto de Ignición	°C	63
PCS específico	MJ/L	38,4
PCI específico	MJ/l	35,4
Viscosidad a 20°	mm ² /s	5,1
Viscosidad a 50°	mm ² /s	2,6
No. De Cetano	RON	>45
Residuo Carbonoso	%	0,15
Azufre	%	0.29

Fuente: Fernández et al. (2012)

Un motor diésel al utilizar el 70% de combustible que usa un motor equivalente de gasolina, reduce significativamente sus emisiones de CO₂. Al igual que los vehículos a gasolina, los que funcionan a ACPM tienen un control automático para sus emisiones de CO y HC, y al disponer ampliamente de oxígenos, estas son escasamente producidas y se oxidan con mayor rapidez en el tubo de escape. El diésel al tener baja volatilidad elimina notoriamente las emisiones de HC, luego las emisiones de CO son menores que las producidas por la gasolina y las emisiones de HC se reducen en un tercio. La principal desventaja de este combustible son las emisiones de NO_x y PM (Blumberg et al., 2003).

2.4 Principales contaminantes atmosféricos emitidos por la combustión de combustibles fósiles

Las partículas que se derivan del uso de combustibles fósiles y el dióxido de azufre son los principales contaminantes atmosféricos en las zonas urbanas, por esta razón también son los más estudiados. Las entidades encargadas de vigilar la contaminación atmosférica miden la concentración de cada contaminante en el aire (Aránguez et al., 1999).

A continuación, se describen los principales contaminantes emitidos por la combustión de combustibles fósiles.

2.4.1 Metano – CH₄

El metano es un gas incoloro perteneciente al grupo de los hidrocarburos más específicamente al grupo de los alcanos (Fernández et al., 2012). Este gas es producido tanto por fuentes antropogénicas como naturales. Este gas se produce debido a la descomposición del material orgánico cuando la presencia de oxígeno es reducida, también se forma en procesos de digestión de los animales rumiantes, se estima que esta fuente puede llegar a producir cerca al 37% del metano que existe en la atmosfera, se estima que cada vaca genera 90 kilos de metano anual. Lo cual equivale energéticamente a 120 litros de gasolina (Benavides & León, 2007).

2.4.2 Hidrocarburos – HC

Estas emisiones se producen en los vehículos cuando hay una combustión ineficiente y no se quema o es quemado de forma parcial el hidrocarburo usado.

La forma en la que se producen estas emisiones varía entre tipo de combustible y la tecnología del motor.

En el motor a gasolina una mezcla casi homogénea de aire-combustible es comprimida, y la llama se difunde a través de la cámara de combustión. Las emisiones de hidrocarburos aparecen en el motor a gasolina cuando la mezcla aire-combustible se esconde en lugares inaccesibles a la llama. El lugar más significativo es el volumen contenido entre el pistón y la pared del cilindro, sobre el anillo del pistón. En un motor diésel sólo el aire es comprimido dentro de este volumen. Esto reduce el aire disponible para la combustión, pero permite que la cantidad importante de combustible no escape de la combustión (Caballero, 2011, p.14).

2.4.3 Monóxido de Carbono – CO

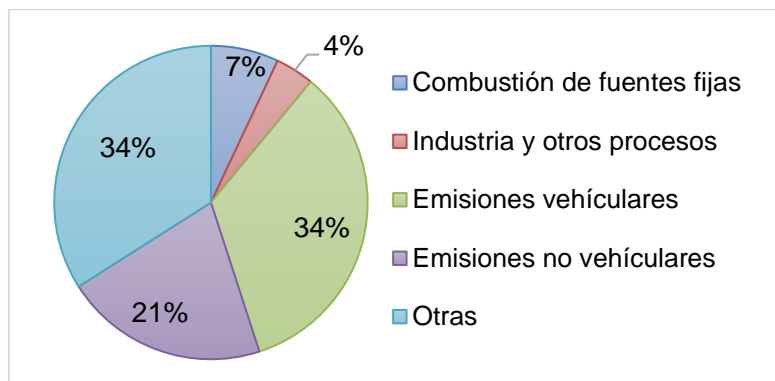
El monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico sin sabor que se encuentra tanto en el aire de interiores como de exteriores, es considerado uno de los contaminantes más nocivos para la atmosfera terrestre. En las partes exteriores, aproximadamente el 80% de las fuentes de carbono son producidos por vehículos

automotores que utilizan como combustible gasolina o diésel seguido por los procesos industriales que utilizan compuestos del carbono. También se genera naturalmente por incendios. En los interiores (por ejemplo, casas, apartamentos, u oficina) se genera dependiendo de la presencia de artefactos industriales, calentadores de ambientes de queroseno o gas, calderas, cocina (estufa, estufa de leña), generadores y otros equipos que funcionen con gasolina, el humo del tabaco etc. (Téllez et al., 2006).

Cuando el monóxido de carbono es liberado en el medio ambiente puede permanecer en el aire aproximadamente 2 meses. El mecanismo de formación del CO en los vehículos de combustión interna está directamente influenciado por el estilo de conducción, la tecnología, el tamaño, la antigüedad y el mantenimiento de este. Las emisiones pueden variar si se trata de instalaciones mal gestionadas o cuyo estado de mantenimiento es deficiente, como podría ser el caso de las unidades más antiguas (Antamba, Reyes, & Granja, 2016)

A continuación, en la **Figura 2-1** se muestra las emisiones de CO según sus diversas fuentes:

Figura 2-1: Emisiones de CO según fuente de origen, en 2013



Fuente: U.S. Department of Transportation (2016)

Como se observa en la **Figura 2-1** las emisiones de CO producidas por los vehículos son las que mayor proporción representa.

2.4.4 Dióxido de Carbono – CO₂

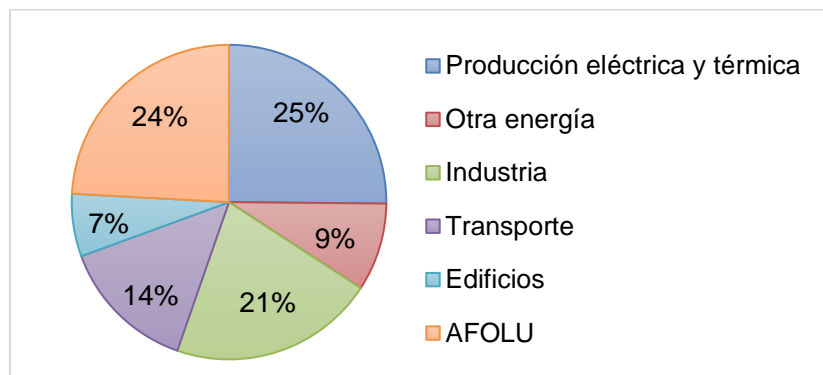
El CO₂ es un gas incoloro e inodoro que en altas concentraciones puede producir un sabor ácido, gracias a que es un gas no inflamable sirve para apagar incendios, este gas tiene a depositarse en las zonas bajas de la atmósfera por ser más pesado que el aire (Martín & Sala, 2004)

Sus emisiones son derivadas de las actividades humanas como: la combustión de productos fósiles (carbón, petróleo, gas, etc.), incendios forestales y quemas de restos agrícolas, deforestación, producción de cemento y hormigón, así como de hierro y acero, entre otros procesos industriales (Metz, Davidson, De Coninck, Loos, & Meyer, 2005) y como producto de procesos naturales como la respiración animal y vegetal, la descomposición de materia orgánica, las erupciones volcánicas y los incendios producidos de manera natural (National Aeronautics and Space Administration, 2016).

Las emisiones de CO₂ son las que más contribuyen al calentamiento global, cerca del 60% de este problema es causado por estas emisiones. En los países industrializados, el CO₂ representa más del 80% de las emisiones de los GEI (IPCC, 2014). Estudios han determinado que desde la revolución industrial las emisiones de este gas han aumentado en un 30%, las concentraciones actuales en la atmósfera son más altas ahora que en cualquier otro período de los últimos 650.000 años y se estima que se producen 25.000 millones de toneladas anuales (Unión Europea, 2011).

En la **Figura 2-2** se muestra las emisiones de CO₂ según sus diversas fuentes:

Figura 2-2: Emisiones de CO₂ según fuente de origen, en 2013



Fuente: U.S. Department of Transportation (2016).

Nota: En la **Figura 2-2** AFOLU hace referencia a las emisiones provenientes de la silvicultura y otros usos del suelo.

Las emisiones de CO₂ provenientes de los vehículos se producen por la combustión de combustibles fósiles, en condiciones ideales el contenido total del carbono debería transformarse en CO₂. Debido a que estos procesos no son perfectos la parte del carbón que no es liberada en forma de CO₂ es transformada en otros gases como CH₄, CO y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) y alguna parte que queda sin quemar es transformada en hollín y ceniza (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

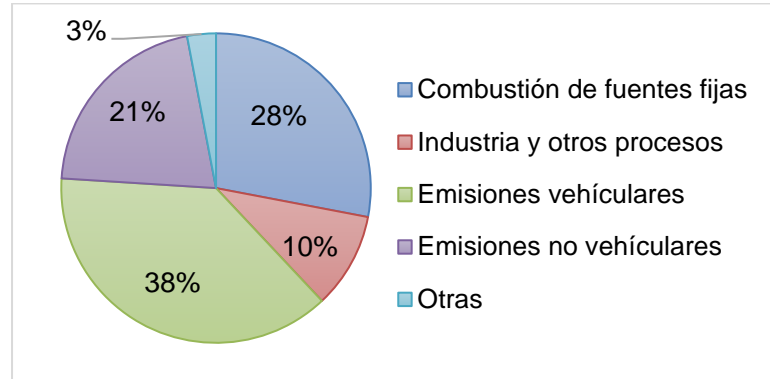
2.4.5 Óxidos de Nitrógeno – NO_x

El nitrógeno es un gas sin olor, color ni sabor, que constituye el 78% del aire. Aunque en condiciones normales no es perjudicial para la salud, se puede combinar con oxígeno para formar diversos óxidos de nitrógeno, entre los que se destacan el óxido nítrico (NO) y NO₂, los cuales juntos son llamados comúnmente óxidos de nitrógeno debido a su estrecha relación de inter conversión (Aránguez et al., 1999).

Los NO_x forman la mayor parte de la alta troposfera y en atmósferas contaminadas son los responsables del ozono, el smog fotoquímico y las lluvias ácidas que se forman por la alta concentración de óxido nítrico, por esto estos contaminantes son considerados como GEI y han sido objeto de políticas públicas (Benavides & León, 2007).

La formación de NO_x en el proceso de combustión en los motores se debe a las altas temperaturas y presiones en los cilindros que hacen que el oxígeno presente en el aire reaccione con los radicales de nitrógeno presentes en el combustible (Escobar, Bordones, Norambuena, & Reinoso, 2011). Este tipo de emisiones aumentan dependiendo del tipo de equipo y la tecnología de operación, para los combustibles líquidos derivados del petróleo (Gasolina y ACPM) estas emisiones dependen de la relación aire/combustible de la mezcla, las temperaturas de combustión, así como los equipos de control, pero en general las emisiones de NO_x en los vehículos a ACPM son menores que los de gasolina y en vehículos livianos más bajas que en vehículos pesados.

En la **Figura 2-3** se muestran las emisiones de NO_x según sus diversas fuentes.

Figura 2-3: Emisiones de NO_x según fuente de origen, en el 2013

Fuente: U.S. Department of Transportation (2016)

Como se observa en la **Figura 2-3** las emisiones de NO_x provienen en su mayoría de fuentes móviles.

2.4.6 Dióxido de Nitrógeno – NO₂

El NO₂ es un líquido pardo amarillento a temperatura normal, es muy volátil y en estado gaseoso presenta un color pardo rojizo, su olor es irritante y al reaccionar con el agua forma ácidos nítricos y nitrosos, al ser un agente oxidante sirve de carburante en los combustibles, se produce de forma natural en cantidades muy superiores a las generadas por las actividades del hombre, pero en el momento que está distribuida sobre toda la superficie de la tierra la concentración en la atmosfera es relativamente pequeña. La oxidación del dióxido de nitrógeno debido a oxidantes presentes en la atmosfera tales como el ozono, sucede con rapidez luego la presencia en el aire de este contaminante contribuye a la formación y modificación de otros contaminantes tales como el ozono y las partículas en suspensión, así como a la aparición de la lluvia ácida y es responsable del 6% de los GEI y por lo tanto del cambio climático. Este gas también es un contaminante importante en ambientes interiores, generado por el uso del tabaco y la combustión de gas inadecuadas o con mala ventilación (Aránguez et al., 1999).

Para disminuir las emisiones de NO₂ se pueden usar medidas primarias, que son principalmente procesos en los cuales se escalona el suministro de aire, la combustión en lecho fluido y los quemadores especiales, en estos casos las emisiones de NO₂ se disminuye considerablemente durante el proceso de combustión. O también están las

alternativas secundarias, las cuales intervienen en los gases de combustión después de abandonar la cámara de combustión, estos gases se mezclan con amoníaco y aire, produciendo nitrógeno y agua mediante su reacción química (Aránguez et al., 1999).

2.4.7 Material Particulado - PM

El material particulado presente en la troposfera baja está formado principalmente por partículas de carbón no quemado, nitratos, amonio, cloro y partículas de metales como el hierro, mercurio y plomo (Ruiz & Córdoba, 2006). Las partículas se han clasificado según su diámetro, diferenciándolas en las que tienen un diámetro menor a 2,5 μm denominadas $\text{PM}_{2.5}$ y aquellas cuyo diámetro está entre 2,5 y 10 μm como PM_{10} , esta clasificación se originó debido a que el material particulado presente en el aire es de tamaño, forma y composición diversa (Arciniegas, 2012). Existen otro tipo de partículas cuyo diámetro es menor a 0,1 μm las cuales son denominadas ultrafinas (Barrios, 2007).

El material particulado es uno de los contaminantes más estudiados alrededor del mundo, su presencia en la atmósfera tiene diversos impactos en la vegetación, materiales y el ser humano, como la disminución visual en la atmósfera debido a la absorción y dispersión de la luz, también está asociado al aumento del riesgo de muerte por problemas cardiopulmonares en la población (Arciniegas, 2012)

Existen diferentes fuentes de material particulado, las fuentes de origen natural son por ejemplo el material mineral, erupciones volcánicas, emisiones biogénicas, incendios forestales; y las fuentes de origen antropogénicas como las emisiones debidas al tráfico, a procesos industriales y ganaderos, usos de combustibles domésticos, entre otros. El material particulado también puede ser clasificado como primario si es emitido directamente a la atmósfera como el polvo de las carreteras, el generado por la construcción, las quemas, la combustión del diésel, desgaste de las llantas y frenos entre otros, y secundario si es formado en la atmósfera por transformaciones de las emisiones gaseosas como los óxidos de azufre, nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (Borrás, 2013).

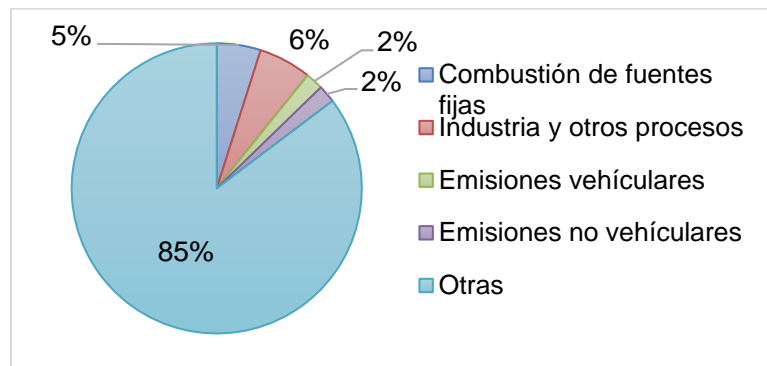
Uno de los factores que afecta el nivel de las emisiones producidas por los vehículos es la concentración de azufre que tenga el combustible y su calidad (Rojas, 2004), según el Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong (HKEPD), el escape de los

vehículos diésel es la principal causa del alto nivel de PM en las zonas urbanas (Arciniegas, 2012).

Algunas tecnologías que se usan para controlar las emisiones del material particulado, aparte del uso de combustibles más limpios, pueden ser: ciclones, que son equipos que recolectan el polvo de corrientes gaseosas; multiciclones, son un conjunto de varios ciclones pequeños que separan las partículas del gas mediante la centrifuga del mismo; lavador Venturi, el cual inyecta chorros finos de líquidos con alta velocidad haciendo que las partículas se mezclen con el agua; precipitador electrostático, que usa fuerzas eléctricas para separar las partículas de la corriente de gas; filtros de mangas, recoge las partículas haciendo que el flujo de gas pasen por una especie de tejidos (Arciniegas, 2012)

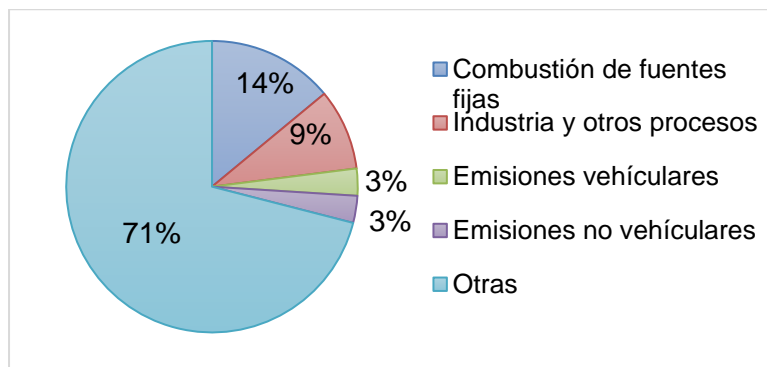
En la **Figura 2-4** y **Figura 2-5** se muestran las emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} según sus diversas fuentes.

Figura 2-4: Emisiones de PM₁₀ según fuente de origen, en 2013



Fuente: U.S. Department of Transportation (2016).

Figura 2-5: Emisiones de PM_{2.5} según fuente de origen, en 2013



Fuente: U.S. Department of Transportation (2016).

Como se observa en la **Figura 2-4** y **Figura 2-5** las emisiones de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) provienen en su mayoría de fuentes que no están asociadas a la combustión de combustibles y el aporte de las emisiones vehiculares es pequeño, sin superar el 3%

2.4.8 Dióxido de Azufre – SO_2

Es un gas incoloro, irritante, con un olor penetrante que se comienza a percibir con 0,3 a 1,4 ppm y es perfectamente distinguible a partir de 3 ppm. Su densidad es el doble que la del aire. No es un gas inflamable, ni explosivo y tiene mucha estabilidad, es muy soluble en agua y en contacto con ella se convierte en ácido sulfúrico. Debido a que la mayor parte de los combustibles fósiles y menas metálicas no ferrosas contienen azufre, se producen grandes volúmenes de SO_2 residual en grandes instalaciones de combustión y de producción de metales no ferrosos (Borrás, 2013).

La principal fuente de emisión de dióxido de azufre a la atmósfera es la combustión de productos petrolíferos y la quema de carbón en centrales eléctricas y calefacciones centrales, existen también algunas fuentes naturales, como es el caso de los volcanes. Los gases de salida generados en la combustión normalmente contienen menos de 0.5 % vol. de SO_2 , siendo el contenido de azufre en el combustible el que determina tal porcentaje. En el caso de procesos de fabricación de metales que emplean sulfuros metálicos, se genera una corriente de gases que alcanza hasta un 11 % vol. SO_2 (Benavides & León, 2007)

Durante su proceso de oxidación en la atmósfera, este gas forma sulfatos, estos forman parte del material particulado PM_{10} . El SO_2 es higroscópico, es decir, en presencia de humedad el dióxido de azufre forma ácidos en forma de aerosoles y se produce una parte importante del material particulado secundario o fino ($PM_{2.5}$). El SO_2 es el responsable de la lluvia ácida (Borrás, 2013)

2.5 Emisiones por tipo de combustible

La mayoría de los contaminantes vehiculares se generan debido a la combustión, la cual es el proceso donde un combustible derivado del petróleo reacciona con el oxígeno presente en el aire debido a una energía de activación aplicada, si este proceso fuera ideal

en la combustión sólo se produciría vapor de agua y CO₂. En la **Figura 2-6** se muestra un proceso de combustión ideal (Xunta de Galicia, 2012).

Figura 2-6: Proceso de combustión ideal



Fuente: Elaboración propia a partir de Xunta de Galicia (n.d.)

Debido a que no se realiza un proceso de combustión completo y el hidrocarburo no se consume en su totalidad se generan otro tipo de emisiones y su concentración variara dependiendo del combustible usado y el tipo de motor. Las emisiones generadas por este proceso en la gasolina y el ACPM son muy similares y las principales son: N₂, CO₂, H₂O, HC, NO_x, CO, SO₂ y PM (Bernaola, 2013 y Pérez, 2018).

Si se comparan las emisiones de escape del motor de gasolina con el de diésel convencional, se comprueba que este último, sin depuración de gases, alcanza valores más bajos de HC y CO mientras que la emisión de gases nitrosos es similar, aunque hay una tendencia a aumentar en el de gasolina con los años de uso. En cambio, el motor diésel produce mayor cantidad de partículas (hollín) formando un aglomerado de carbono al que se adhieren HC, agua, sulfatos, azufre y óxidos metálicos (Bernaola, 2013, p.14-15)

En la **Tabla 2-3** se puede observar de manera general cuantos kg de emisión por cada tipo de contaminante se producen al consumir un kg de combustible.

Tabla 2-3: Emisión de contaminantes por tipo de combustible

Combustible	Emisiones (kg emisión/kg combustible)					
	CO	CO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂
Gasolina	0,018	0,26444	0,00296	0,00182	0,00182	0,000153
Diésel	0,0173	0,2678	0,0801	0,00282	0,0068	0,00425
Biogás	0,064	0,18911	0,352	0,000204	0,000204	0,0001
Gas Natural	0,064	0,1548	0,352	0,000204	0,000204	0,0001

Fuente: Elaboración propia a partir de Escobar et al. (2011) y Martín & Sala (2004)

2.6 Modelos para estimar emisiones contaminantes

Las emisiones vehiculares pueden ser conocidas de manera directa mediante la medición de estas en los vehículos o de manera indirecta mediante el uso de modelos matemáticos que permite realizar una estimación, este estudio se enfoca en estos modelos ya que el objetivo es la estimación de la cantidad de contaminantes y conocer las variaciones de estas que se pueden tener al realizar modificaciones a la geometría de una vía.

A continuación, se describen algunos modelos:

2.6.1 Modelo MOVES

El **Motor Vehicle Emission Simulator** es un sistema de modelación de emisiones desarrollado por la EPA, más específicamente por la oficina de transporte (OTAQ por sus siglas en inglés). MOVES estima factores de emisión para fuentes móviles con condiciones definidas por el usuario (Environmental Protection Agency, 2015). MOVES permite estimar diferentes fuentes de emisiones como por frenado, desgaste de los neumáticos, evaporación de vapores de combustible, fugas de combustible, entre otras. MOVES estima emisiones en diferentes posiciones geográficas en Estados Unidos diferenciando entre estados, condados, ciudades o un proyecto específico; diferenciando entre 9 tipos de carreteras entre rurales y urbanas. Así mismo permite tener inventarios de emisiones para un año, mes, día u hora por tipo de contaminante y tipo de combustible usado y permite estimar factores de emisión por contaminante y tipo de vehículo, tipo de combustible entre otros (Chamberlin, Swanson, Talbot, Dumont, & Pesci, 2011).

- **Categorización vehicular:** posee 13 tipos de vehículos entre motocicletas, autos livianos, buses y camiones (esta categorización tiene en cuenta el número de pasajeros, actividad o trabajo, distancia recorrida y patrones de operación hora/día) (Ordóñez, 2018), estos difieren entre sí porque los divide según el año del motor, tipo de tecnología, peso del vehículo cargado y combustible, los combustibles que permite evaluar son gasolina, diésel, gas licuado de petróleo (GLP), gas natural vehicular (GNV), biodiésel, bioetanol y etanol (Environmental Protection Agency, 2015).

- Contaminantes: MOVES permite estimar los factores de emisión para PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_x , NO_2 , NH_4 , SO_2 , CO , CO_2 , CH_4 , COV y HC (Environmental Protection Agency, 2015).

Se realizó un estudio donde se estimaron las emisiones de CO , NO_x , $PM_{2.5}$ y los $VOCs$ teniendo en cuenta la temperatura, la humedad, la fracción de pendiente en la vía, la distribución por edades y la velocidad media. Se estimaron las emisiones con MOBILE 6,2, EMFAC y MOVES llegando a la conclusión que las emisiones estimadas por MOVES son muy sensibles a la velocidad, así como al tipo de vehículo y su edad (Yao et al., 2014).

2.6.2 Modelo COPERT

El **CO**mputer **P**rogramme to **C**alculate **E**missions from **R**oad **T**ransport (COPERT) que fue desarrollado con la financiación de la Agencia Europea de Medioambiente (EEA) estima inventarios nacionales anuales, aunque también se puede usar en inventarios urbanos con una resolución espacial de 1X1 Km y una resolución temporal de una hora (Ntziachristos & Samaras, 2000).

- Categorización vehicular: el modelo permite estimar emisiones para 10 tipos de vehículos, que se clasifican según su peso, número de pasajeros y tipo de combustible incluyendo motocicletas (Ordóñez, 2018).
- Contaminantes: permite estimar las emisiones del sector del transporte que incluyen: CO , NO_x , COV , PM , NO_2 , NH_3 , SO_2 , y el consumo de combustible (Ntziachristos & Samaras, 2000).

COPERT IV es una versión actualizada que incluye una revisión de los elementos metodológicos y una interfaz rediseñada con miras a una elaboración de inventarios nacionales más ágil. La nueva versión permite conocer aparte de las emisiones ya mencionadas, una extensa lista de contaminantes, el efecto de antigüedad del vehículo sobre las emisiones, la opción de activar o desactivar la influencia del plomo, asignación de gasolina para vehículos de pre-catalizador y otros (Ntziachristos & Samaras, 2000).

2.6.3 Modelo CMEM

Desarrollado en la década de 1990 con el patrocinio del Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras (NCHRP) y la EPA para cumplir con la necesidad de modelar las emisiones de manera microscópica (Chamberlin et al., 2011), los datos necesarios que requiere este modelo para estimar las emisiones incluyen la actividad del vehículo (velocidad segundo a segundo) y la composición de la flota de tráfico que se está modelando, normas de certificación de emisiones, el kilometraje, la relación potencia-peso (Barth, Younglove, & Scora, 2005).

- **Categorización vehicular:** La última versión de CMEM permite clasificar los vehículos en 28 categorías de poca potencia y 3 categorías de vehículos de alta potencia (Farnsworth, 2001).
- **Contaminantes:** permite estimar las emisiones segundo a segundo del tubo de escape de los siguientes contaminantes: NO_x, CO, CH₄ y HC y el consumo de combustible teniendo en cuenta la composición vehicular, el motor, la tecnología y estado del vehículo (Borrego et al., 2016).

2.6.4 Modelo EMFAC

En el estado de California, Estados Unidos, se creó EMFAC, este modelo de emisiones es desarrollado por California Air Resources Board (ARB) para evaluar las emisiones de los vehículos, su última versión fue realizada en 2017. EMFAC ayuda a controlar la calidad del aire según las regulaciones dadas por la ARB y Administración Federal de Carreteras de California (California Air Resources Board, 2018).

- **Categorización vehicular:** EMFAC estima las emisiones para una combinación de 42 tipos de vehículos que los diferencia por tipo de combustible, categoría vehicular (incluyendo las motocicletas), peso del vehículo, año de producción, tecnología del vehículo (carburador controlado, carburador con inyección directa) y el nivel de emisiones (normal, moderada, alto, muy alto, súper) (California Air Resources Board, 2018).

- Contaminantes: este modelo proporciona la estimación de emisiones básicas en g/ml para CO, HC, NOx, CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, CH₄ y SOx.

EMFAC también permite incluir la temperatura, el deterioro de los vehículos, uso de aire acondicionado, humedad, altitud, y la volatilidad del combustible. Con este modelo se pueden ver la variación de las emisiones con el tiempo y permite realizar proyecciones a futuro, con esta información la ARB evalúa los programas de control existentes y determina las propuestas más eficaces, basadas en la ciencia para proteger el entorno (Ministerio de Ecología Desarrollo Sostenible y Energía, 2012).

2.6.5 Modelo IVE

El modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) fue diseñado en un esfuerzo conjunto entre del Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de California en Riverside, Investigación de Sistemas Sustentables Globales y el Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales con el apoyo financiero de la EPA, su propósito es ser de utilidad a los países en desarrollo para estimar emisiones vehiculares. El modelo estima contaminantes atmosféricos locales, gases responsables del efecto invernadero y tóxicos (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

- Categorización vehicular: IVE permite clasificar la flota vehicular según las siguientes características (International Sustainable Systems Research Center, 2008):
 - Tamaño de vehículo (7 opciones incluyendo camiones)
 - Tipo de combustible (5 opciones)
 - Uso de vehículo (3 opciones)
 - Sistema de entrega de combustible (3 opciones)
 - Sistema de control emisiones evaporativas (varios)
 - Sistema / Estándar de control de escape (varios)
- Contaminantes: Con este modelo se pueden estimar CO, COVs, NOx, SOx, PM₁₀ CO₂, NO₂ y CH₄ tóxicos (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

Este modelo tiene en cuenta diferentes factores como los perfiles de velocidad y aceleración, altitud, pendiente, temperatura y características del combustible como su calidad, cantidad de contaminantes y aditivos tóxicos (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

2.6.6 Modelo MODEM

MODEM fue creado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, la metodología se desarrolló en el 2001 y se basa en la empleada por CONAMA para elaborar los Inventarios de Emisión para las principales ciudades de Chile causadas por fuentes móviles. MODEM considera las emisiones por tubo de escape, emisiones en frío y las emisiones evaporativas, además, estima las emisiones de polvo suspendidas, las emisiones por desgaste de frenos y neumáticos, dando como resultados factores de emisión por tipo de vehículo y por contaminante (Universidad Pontificia Católica de Chile, 2010).

- Categorización vehicular: permite estimar las emisiones para 61 vehículos que se diferencian entre sí por su nivel de emisión y uso (Osses & Henríquez, 2017)
- Contaminantes: Con este modelo se pueden estimar emisiones de CO, HC, NO_x, SO₂, N₂O, NH₃, CH₄, CO₂ y PM₁₀ (Osses & Henríquez, 2017).

MODEM recibe información de los modelos de tráfico provenientes de ESTRAUS como red vial, tipo de vía, niveles de flujos vehiculares, velocidades promedio, tipo de vehículos, etc.; y da como resultado la estimación de emisiones corregidas por la velocidad y la aceleración (Universidad Pontificia Católica de Chile, 2010).

2.6.7 HDM-4

HDM-4 es un software cuyo objetivo principal es servir como herramienta para el análisis, la planificación, gestión y evaluación del mantenimiento, mejoramiento y decisiones de inversión de carreteras, optimizando el costo del transporte por carretera (costos del estado más costos de los usuarios), para esto HDM-4 realiza un análisis a partir de los siguientes modelos (Núñez & Pérez, 2005):

- Deterioro de la carretera: predice el deterioro del pavimento

- Efectos de las actuaciones: implementa programas de actuaciones y determina los costos
- Efectos sobre los usuarios: determina costos de circulación, tiempos de viaje y accidentes
- Efectos sociales y medioambientales: estima las emisiones de los vehículos según las características geométricas de la carretera, su estado; así como el de los vehículos, el ruido, predice el número de accidentes (según tasas pre-establecidas) y la cantidad de consumo de energía.

Este modelo se originó en 1968 como un modelo conceptual de costos de carreteras llamado Highway Cost Model (HCM) el cual fue desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) a petición del Banco Mundial y se considera como la primera versión del HDM. En el año 1976 el MIT realizó nuevos desarrollos del HCM y se produjo el Highway Design and Maintenance Standard Model (HDM) considerado como HDM-II. En 1987 el Banco Mundial desarrolla el HDM-III usando estudios que se habían realizado en diferentes partes del mundo y en 1994 produce dos versiones más, una donde incorpora los efectos del tráfico y otra donde mejora la interfaz para facilitar su uso. En 1997 debido a la necesidad de modernizar el modelo debido a diferentes factores que habían cambiado como los costos de operación de los vehículos debidos a mejora en las tecnologías se inició el Estudio Internacional del Desarrollo y Gestión de Carreteras (International Study of Highway Development and Management) ISOHDM. Como principal resultado del mismo, el año 2000 se anunció la terminación del modelo HDM-4 (Pradena & Posada, 2007).

Como se había mencionado HDM-4 en su modelo de efectos sociales y medioambientales permite estimar las emisiones vehiculares, lo hace en función del consumo de combustible, exceptuando las emisiones de CO₂, que se modelan con una ecuación de balance de carbono, en donde cualquier carbono no consumido por las otras emisiones, de forma predeterminada se emite en forma de CO₂. El modelo de consumo de combustible que usa HDM-4 a su vez está afectado por la pendiente, el IRI, la textura y la curvatura, siendo estas características de la vía, condiciones del tráfico y características del vehículo que tienen efecto sobre las fuerzas de oposición al movimiento como el área frontal (Bennett & Greenwood, 2001).

El modelo para predecir las emisiones se considera como un modelo a escala meso – macroscópica, esto debido al grado de sofisticación y de agregación de los datos. Sólo considera emisiones en caliente y del tubo de escape (Mendoza & Torras, 2008).

- Categorización vehicular: los vehículos en HDM-4 se clasifican primero por categoría en motorizados y no motorizados y luego de esta clasificación se dividen según la clase y el tipo como se muestra en la **Tabla 2-4**.

Tabla 2-4: Clasificación de vehículo en HDM-4

Categoría	Clase	Tipo
Motorizado	Liviano	Pequeño
		Mediano
		Grande
	Furgoneta	Reparto Ligero
		Mediano Tracción cuatro ruedas
Camión	Ligero	
	Mediano Pesado Articulado	
Bus	Pequeño	
	Ligero	
	Mediano	
	Pesado De línea	
	Motocicleta	Motocicleta
No Motorizado	Bicicleta	Bicicleta
	Peatón	Peatón
	Tracción humana	Tracción humana
	Tracción animal	Tracción animal

Fuente: Posada (2003)

- Contaminantes: las emisiones que HDM-4 permite evaluar son los HC, CO, NO, SO₂, CO₂, PM (incluido PM₁₀ y PM_{2.5}) y plomo (Núñez & Pérez, 2005).

2.7 Parámetros que afectan la cantidad de emisiones vehiculares

Existen diferentes parámetros que afectan la cantidad de contaminantes emitidos, entre estos encontramos características vehiculares como el peso, la edad, la velocidad de operación; de la carretera como la pendiente; y el estilo de conducción, entre otros (Nigiel et al., 2002)

A continuación, se describen algunos de estos parámetros

2.7.1 Peso del vehículo

Está asociado a las emisiones por la potencia que demanda, a mayor peso de un vehículo mayor será la potencia que requiere, la cantidad de combustible quemado para producir energía también aumentará y la tasa de emisiones generalmente aumentará (Nigiel et al., 2002). Según el estudio realizado por Brodrick, Dwyer, Farshchi, Harris, & King (2002) cuando un vehículo de carga funciona vacío sus emisiones de NO_x, HC y CO₂ se reducen al mínimo.

2.7.2 Edad del vehículo

Está asociado a las emisiones por dos causas: la primera de ellas es que a mayor edad de uso del vehículo éste acumula más kilómetros recorridos, el motor está más desgastado y por esto va a producir mayores emisiones, aunque el deterioro de motores diésel es menor. La segunda causa es el cambio en la tecnología, debido a que los motores fabricados en la actualidad deben cumplir normas más estrictas para las emisiones que los vehículos más antiguos (Nigiel et al., 2002).

2.7.3 Velocidad

La cantidad de gases contaminantes emitidos por un vehículo está relacionada con la cantidad de combustible consumido y éste a su vez está estrechamente relacionado con los cambios en la velocidad del vehículo. La velocidad (que es una condición de funcionamiento) se ve afectada por la congestión, el estilo de conducción las señales de tráfico, los límites de velocidad, entre otros. Tener una mejor comprensión de la relación entre las condiciones de funcionamiento y las emisiones permitirá que en el futuro se

valoren diferentes tipos de intervenciones como la adición de carriles, la sincronización de las señales de tránsito, medidas para disminuir el tráfico, el cálculo de la pendiente y el cambio de la velocidad forzando a cumplir los límites establecidos, para mitigar los impactos generador por las emisiones contaminantes (Kean & Kendall, 2003).

En un estudio realizado con el modelo MOVES, se realizó la comparación entre la tasa de emisión y velocidad de operación en la cual se observó que en los rangos de velocidad más baja (por debajo de 40 km/h), las tasas de emisión pueden ser cuatro veces mayor que en los rangos de velocidad más alta (entre 40 km/h y 120 km/h). Sin embargo, para la mayoría de los contaminantes modelados, las tasas de emisión tienden a aumentar mientras que la velocidad de funcionamiento del vehículo es mayor que 120 km/h (Yao et al., 2014).

2.7.4 Pendiente

La pendiente de la carretera está asociada a la potencia. Los factores que más demandan potencia en un vehículo son: la velocidad, el peso y la pendiente (Posada, 2012). A medida que se aumenta la potencia requerida, la cantidad de combustible quemado aumenta, y la tasa de emisiones reguladas producidas generalmente aumentará (Clark et al., 2016)

En un estudio se demostró que al trascender de una pendiente del 0% al 6%, se aumentó en 20 kW/t la VSP con velocidades de operación que variaron de 0 a 120 km/h. En este mismo estudio se observó que el consumo de combustible se redujo aproximadamente un 19% cuando se tienen pendientes descendentes y un aumento en el consumo de alrededor del 23% para pendientes en ascenso. En este estudio se observó que las tasas de emisión de HC, NO_x, CO y CO₂ aumentaban con pendientes superiores al 5% (Zhang & Frey, 2006).

2.7.5 Estilo de conducción

Se han realizado estudios para diferentes estilos de conducción, encontrando que para un estilo de calmado se pueden tener reducciones del 5% de CO₂ y hasta de un 8% de CO. En otros casos donde el estilo de conducción es agresivo se aumentaron las emisiones de CO, HC un 100%, y un ligero aumento el CO₂ y los NO_x (Sentoff, Aultman-hall, & Holmén, 2015). Se han realizado simulaciones de un estilo de conducción denominado ecológico

en condiciones de congestión donde se ha logrado reducir el consumo de combustible y reducir en un 10 a 20% las emisiones de CO₂ (Boriboonsomsin & Barth, 2009).

2.8 Antecedentes de investigaciones similares

A continuación, se presentan algunos de los estudios realizados donde se relacionan características como la pendiente de una carretera, la velocidad y potencia del vehículo y el estilo de conducción con las emisiones de contaminantes provenientes de los vehículos.

2.8.1 Estudio en la Ciudad de Flint, Michigan, Estados Unidos:

En la ciudad de Flint, estado de Michigan, Estados Unidos se llevó a cabo un estudio para determinar la relación de las emisiones y velocidad y el ángulo de inclinación de la pendiente, relación dada por la potencia requerida para superar ciertas pendientes. Clark et al. (2016) desarrollaron la Ecuación (2.1) donde se relacionan la pendiente y la potencia requerida.

$$P = \frac{1}{2} \rho a C_d A V^3 + \mu M g V + M g V \sin \theta \quad (2.1)$$

Donde:

P = la potencia requerida para mantener una velocidad constante (W)

ρa = densidad del aire (kg/m³)

C_d = coeficiente de resistencia aerodinámica del vehículo

A = área frontal del vehículo (m²)

V = velocidad a la que circula el vehículo (m/s)

μ = coeficiente de resistencia rodadura de los neumáticos

M = masa del vehículo (kg)

g = aceleración debida a la gravedad (m/s²)

θ = ángulo de inclinación de la pendiente del camino (grado sexagesimal)

En la ecuación se puede deducir que la potencia es directamente proporcional a la velocidad y el ángulo de inclinación de la pendiente del camino.

Se realizaron pruebas con un camión remolque en una carretera con una pendiente del 7% para un contaminante específico, el NO₂, encontrando que las emisiones de este contaminante se comportan de manera lineal con la potencia requerida. Se llegó a la conclusión que la afectación de la pendiente de la carretera en las emisiones de NO₂ es de hasta el 250%.

2.8.2 Estudio en el estado de Vermont, Estados Unidos

En el estado de Vermont, Estados Unidos, se realizó un estudio para evaluar la incidencia del estilo de conducción y la pendiente de la vía en las emisiones. Este se realizó en dos fases, la primera realizada entre el verano del 2011 y el invierno del 2012, con 26 conductores voluntarios y toma de datos por dos semanas. La segunda fase con una duración de recolección de datos de 10 días y 86 conductores voluntarios; se les pidió a los voluntarios que condujeran como lo hacían normalmente. Las vías recorridas durante este estudio tienen pendientes que oscilan entre -12,9% y 13,2%.

En los resultados se encontró que el consumo de combustible se redujo aproximadamente 19% cuando se tienen pendientes en descenso y hay un aumento en el consumo de alrededor del 23% para las pendientes en ascenso. Cuando se compara una ruta de descenso con una en descenso (pendiente del camino <0%) hay un ahorro de casi dos veces del combustible por galón. Esto es consistente con que el consumo de combustible aumenta de 40 a 100% cuando la pendiente de carreteras aumentó 0% a 5% (Sentoff et al., 2015).

En relación con el consumo de combustible para vehículos de carga según el estudio realizado por Posada (2012) una pendiente cercana al 5% es la máxima adecuada para que estos vehículos tengan un incremento en consumo del combustible similar al comportamiento del incremento en la carga, pendientes mayores causan mayor consumo de combustible generando ineficiencias en el transporte. El paso de una pendiente de 0,6% a 2% genera un incremento en el consumo de combustible en relación 1,44 para vehículos de 52t, incremento en 1,38 para 19t, de 1,83 para peso de 28t, y en 1,40 para 12t.

2.8.3 Estudio realizado en el túnel de Caldecott, en el estado de California, Estados Unidos:

En el estado de California, Estados Unidos, se realizaron mediciones para CO, NO_x y HC para vehículos de poca potencia en función de su velocidad y carga del vehículo.

Este estudio se realizó en el túnel de Caldecott el cual cuenta con una pendiente de ascenso y descenso de aproximadamente 4%. Este se encuentra situado en la autopista 24 en el área de la Bahía de San Francisco y conecta las comunidades del interior del Condado de Contra Costa con Oakland, Berkeley y San Francisco. Los horarios de muestreos se realizaron de lunes a viernes durante los meses de julio y agosto del 2001. Las condiciones de conducción en descenso se evaluaron durante la mañana, entre las 5 a.m. y 11:00 a.m. y las condiciones de conducción en descenso durante la tarde y noche de 2:00 p.m. a 8:00 p.m.

Las mediciones de CO y CO₂ se realizaron con un espectrómetro de correlación de filtro de gas (Thermo Environmental Instruments models 48 and 41H), para las mediciones NO_x se utilizó el modelo de TEI 42 - analizadores de quimioluminiscencia. Estos analizadores fueron puestos en cámaras de temperatura controlada con el fin de que los cambios de temperatura en el ambiente no afectaran las mediciones; para medir las concentraciones de HC se utilizó cromatografía de gases con detector de ionización de llama.

El tráfico fue monitoreado mediante cámaras de video con relojes sincronizados puestos en ambos extremos del túnel que permitieron determinar la velocidad media para cuatro categorías diferentes de vehículos: automóviles, camiones ligeros, motocicletas y vehículos pesados. Los camiones ligeros incluyen camionetas, vehículos utilitarios, minivans y vehículos medianos; los vehículos pesados incluyen autobuses, camiones de 2 ejes y camiones con 3 o más ejes.

Esta investigación tenía la ventaja de que las emisiones medidas al estar en un túnel pudieron ser aisladas de otras fuentes contaminantes.

La concentración de cada uno de los contaminantes estudiados varió dependiendo del tipo de contaminantes, la dirección y volumen de tráfico. En términos generales las concentraciones del CO₂ para el tramo en descenso aumentaron de 100 a 150 ppm, 2 a 3 ppm de CO, y 90 a 130 ppb de NO_x. Para la conducción en ascenso, donde se consume

más combustible, las concentraciones se incrementaron en 200 a 600 ppm de CO₂, 10 a 15 ppm de CO, y 400 a 1100 ppb para NO_x.

Se encontró que las emisiones de CO están fuertemente relacionadas con la velocidad en la pendiente de ascenso, a medida que se aumentaba la velocidad en este tramo las emisiones crecían rápidamente, pero para el descenso estas eran independientes de la velocidad, a medida que esta aumentaba las emisiones no variaron significativamente. Para el NO_x las emisiones son dependientes en el ascenso, pero no en la misma magnitud que el CO y en descenso también aumentan con la velocidad.

En este estudio se concluyó que las emisiones de CO y NO_x son función de un único parámetro de la carga del motor: SP, donde SP es la suma de las fuerzas externas opuestas al movimiento del vehículo multiplicada por la velocidad del vehículo (ver Ecuación (2.2)).

$$SP = \left[\frac{C_D \cdot A_f}{m} \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot (V + V_w)^2 + g \cdot C_R + a(1 + \epsilon_1) + g \cdot \sin \theta \right] \cdot V \quad (2.2)$$

Donde:

C_D = coeficiente de resistencia aerodinámica.

m = peso del vehículo

A_f = área frontal del vehículo

ρ_a = densidad del aire

V = velocidad media de los vehículos

a = aceleración del vehículo estimado en un promedio de cada 5 min

V_w = la velocidad del viento de frente (negativo aquí porque el flujo de aire dentro del túnel es en la misma dirección que el tráfico)

g = aceleración debida a la gravedad

C_R = coeficiente de la resistencia de los neumáticos

ϵ_1 = equivalente de traslación masa de componentes de la transmisión de rotación

θ = tan-1 (pendiente) que es el ángulo de la calzada con la horizontal.

Las emisiones de CO aumentan con el parámetro SP para el tramo ascendente y no varían mucho en los tramos descendentes, de la misma forma para NO_x, aunque en el tramo

ascendente no aumenta en la misma proporción que el CO. Un caso particular son las emisiones de HC, que para el tramo es descenso sus emisiones son mayores en relación con las emisiones en ascenso, una explicación de esto puede ser el empobrecimiento de la relación de combustible / aire que se produce durante los eventos de reducción de SP y desaceleración.

Como conclusión se pudo identificar en este estudio que las emisiones de CO fueron en promedio entre 16 y 34 g/l (g de CO emitidos por litro de gasolina consumido) durante el descenso y en un rango de 27 a 75 g/l durante el ascenso. Las emisiones de NO_x (como NO₂) estuvieron entre 1,1 a 3,3 g/l para el tramo en descenso y entre 3,8 y 5,3 g/l para el ascenso. En contraste, con el CO y NO_x, las emisiones de HC por unidad de combustible consumido para la conducción en el tramo de descenso fueron 3 veces mayores que en el tramo de ascenso.

De este estudio también se concluyó que al encontrarse una pendiente positiva en una vía, el vehículo va a aumentar la potencia requerida por el motor para vencer está pendiente y mantener una velocidad constante, esto debido también a la fuerza de gravedad que se opone al movimiento, al aumentar la potencia del motor, resultará en un mayor consumo de combustible que a su vez aumentarán las emisiones de gases contaminantes; para las pendientes negativas la gravedad acelera el vehículo lo que reduce la demanda de potencia en el motor, y así mismo el consumo de combustible y por lo tanto las emisiones contaminantes disminuyen.

Este estudio también encontró que la conducción en ascenso, con respecto a la del descenso, dobla las tasas de emisión de CO y los factores de emisión de NO_x expresados por unidad de distancia recorrida y el aumento del factor de emisión de COV en un 50% (Kean & Kendall, 2003).

2.8.4 Estudio en el distrito de Headingley, Inglaterra

En el estudio realizado por Zhang & Frey (2006) se registró que para pendientes mayores al 5% para vehículos de carga liviana las emisiones de CO₂ aumentaron en un rango del 40 al 90% en relación a una vía de pendiente 0%, mientras que Boriboonsomsin & Barth, (2009) midió un aumento del 15-20% en el consumo de combustible para unos automóviles de turismo de gasolina entre una vía plana y otra montañosa.

Se realizó un estudio en el distrito de Headingley, Inglaterra con el fin de desarrollar y demostrar una metodología sencilla con el uso de LIDAR para calcular la pendiente de la vía y a su vez estimar las emisiones de CO₂ variando las pendientes con ayuda del sistema portable de monitoreo PEMS.

LIDAR es una técnica de mapeo que cuantifica la elevación del terreno mediante medición por láser desde un avión y PEMS es un sistema portátil de medición de emisiones que permite el cálculo del consumo de combustible segundo a segundo y las emisiones de escape en cualquier condición de conducción razonable (Zhang & Frey, 2006).

En esta ciudad se creó una ruta con una distancia de 4,6 kilómetros, limitada a un solo carril, con un límite de velocidad de 48 km/h y usando un automóvil de prueba cuyas especificaciones son: una caja de cambios manual de 5 velocidades y con un motor de inyección de 1,8 litros, 4 cilindros, 16 válvulas, con una potencia máxima de 92 kW a 6000 rpm. El vehículo estaba equipado con un catalizador de tres vías (TWC).

Los resultados de este estudio mostraron que para pendientes de 0% las emisiones de CO₂ fueron de 400 g/km, para pendientes entre el 4 y 6% las emisiones de CO₂ incrementaron en 1,4%, para pendientes entre el 6 y 10% el incremento fue 4% y para pendientes entre el 10% y 14% las emisiones aumentaron 7,65%.

2.8.5 Impactos de la pendiente de una vía en el consumo de combustible

Boriboonsomsin & Barth (2009) evaluaron el impacto que tiene la pendiente de una vía en el consumo de combustible de un vehículo liviano, esto se realizó mediante el uso de sistemas de Ecorouting, el cual es un sistema de navegación que provee las mejores rutas no solo en términos de distancia y tiempo de viaje, sino que considera también el consumo de combustible, dándole la opción a los usuarios de escoger rutas donde se minimiza el consumo de combustible y como consecuencia de esto se reducen las emisiones contaminante.

Este sistema de Ecorouting estima las emisiones mediante el modelo CMEM y también considera, al igual que los demás sistemas de navegación, variables de tráfico como el volumen de tráfico medido, la densidad y la velocidad promedio de las diferentes posibles rutas que puede escoger el usuario, el algoritmo interno de este sistema tiene en cuenta

todas estas variables y ofrece al usuario la mejor ruta en términos de minimización de consumo de combustible y emisiones.

Boriboonsomsin & Barth (2009) usaron este sistema, como se mencionó anteriormente, para evaluar el impacto de la pendiente en el consumo de combustible, para ello se realizó un experimento con una Nissan Altima 2007 (2,5 l de desplazamiento, capacidad del tanque de combustible de 20 galones), la cual recorrió tres rutas, una es ascenso, una es descenso y una plana con pendientes de 6%, -6% y 1% respectivamente, cada ruta se recorrió tres veces a una velocidad constante de 96 km/h.

Los resultados arrojaron curvas parabólicas de consumo de combustible vs. pendiente de la vía, también se encontró que hay un ahorro en el consumo del combustible entre 15% a 20% en una vía plana vs. una ruta montañosa.

2.8.6 Impacto de las glorietas en las emisiones

En los estados de Kansas y Nevada se realizó un estudio para 6 glorietas cuyo objetivo principal era conocer el impacto de estas en la reducción de las emisiones vehiculares. Para esto Mandavilli, Rys, & Rusell (2008) escogieron seis sitios (5 en Kansas y uno en Nevada) los cuales debían cumplir con la condición de que se había cambiado la intersección de parada controlada por una glorieta. Los datos de cada intersección como los volúmenes de tráfico y porcentajes de giros a la izquierda de las intersecciones sin glorieta se tenían de estudios anteriores realizados por una universidad de Kansas y los datos con las glorietas se obtuvieron mediante la grabación de los movimientos, al final se tenían los datos de los volúmenes de tráfico y los giros a la izquierda para las horas pico A.M y P.M para la condición sin glorieta y con glorieta.

El software utilizado para el análisis de datos fue SIDRA, Versión 2.0, este software tiene en cuenta la geometría de la carretera, los conteos de tráfico, los movimientos de giro y la velocidad de los vehículos. SIDRA utiliza un modelo elemental de cuatro modos para estimar el consumo de combustible, el costo de operación y las emisiones contaminantes para todo tipo de instalaciones de tráfico.

De este estudio se obtuvo que la implementación de glorietas reduce entre un 21% y 42% las emisiones de CO, entre un 16% y 59% las emisiones de CO₂, entre un 20% y 48% las emisiones de NO_x y entre 18% y 65% las emisiones de HC, concluyendo que las glorietas

se pueden utilizar como una alternativa viable para reducir las emisiones vehiculares y haciendo así intersecciones más favorables con el medio ambiente.

2.8.7 Incorporación de modelos de emisiones vehiculares en los procesos de diseño geométrico de autopistas

Ko (2015) realizó un estudio donde evaluó de manera teórica el consumo de combustible y las emisiones en curvas horizontales para proporcionar herramientas que permitan cuantificar los impactos ambientales de estas.

Para predecir las velocidades y las aceleraciones segundo a segundo para diferentes condiciones de curvatura horizontal fueron usados modelos de predicción de velocidad y para estimar las emisiones se usó el modelo MOVES, la alineación horizontal usada en el estudio se realizó con el radio mínimo recomendado para una velocidad de 70 km/h (168 m) y se realizaron 5 escenarios con una reducción de éste del 50%, 40%, 30%, 20% y 10%; todas la simulaciones se hicieron para un auto liviano.

Dentro de los resultados se obtuvo que las emisiones de CO₂ aumentan en un 34% cuando el radio de la curva se reduce en un 50% pero en los demás contaminantes se tuvo un incremento del 91%, 66%, 42% y 38% para NO_x, HC, CO, y PM_{2.5}, respectivamente. Estos incrementos se deben a que hay un aumento del consumo de combustible debido a que la reducción del 50% del radio de la curva provocó una reducción en la velocidad y esta a su vez provoco una desaceleración en la mitad de la curva y luego la aceleración al salir de la curva.

Para aplicación en el diseño geométrico se encontró que un vehículo liviano consume más combustible y produce más emisiones sobre curvas con radios más pequeños a los recomendados por la norma, por lo tanto, el diseño de curvas horizontales con las normas mínimas recomendadas puede ser beneficiosa para el medio ambiente y económicamente a lo largo de la vida de la carretera.

2.8.8 Un método para estimar las emisiones de efecto invernadero basado en el diseño geométrico de una carretera y su aplicación en Corea del Sur

Corea del Sur ocupa el décimo puesto de los países con las emisiones más altas de gases de efecto invernadero, de los cuales 16% se origina en el sector vial. Por esto Lee, Choi, Hu, & Yoon (2019) realizaron un estudio que tuvo como objeto desarrollar una metodología para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero que tuvieran en cuenta el diseño geométrico de carreteras, tanto la alineación vertical y horizontal.

Para el desarrollo de esta metodología se crearon modelos de predicción de la velocidad para las secciones de curva horizontal y tangente, y se incorporaron los modelos de estimación de emisiones usados por MOVES los cuales incluyen el efecto de la pendiente, luego esta metodología tendría en cuenta el alineamiento vertical y horizontal para la estimación de las emisiones, este modelo fue calibrado mediante un estudio que se había realizado anteriormente en The Korean Institute of Civil Engineering and Building Design Technology (KICT), donde se tenía un inventario de emisiones para Corea del Sur y se probó el modelo en tres escenarios distintos:

- Primer escenario: se tienen 3 curvas con entre tangencias de 200 metros y para tres pendientes 0%, 5% y -5%, en este escenario los cambios de velocidad son altos y por ende las tasas de aceleración y desaceleración.
- Segundo escenario: 3 curvas con entre tangencias de 600 metros y para tres pendientes 0%, 5% y -5%. Se tienen cambios de velocidad moderados y por ende de las tasas de aceleración y desaceleración.
- Tercer escenario: 3 curvas con entre tangencias de 1200 metros y para tres pendientes 0%, 5% y -5%. Se tienen cambios de velocidad bajos y por ende de las tasas de aceleración y desaceleración.

En cada uno de los escenarios se identificaron las zonas de aceleración y desaceleración, la simulación se realizó en los tres casos para auto liviano y se encontró que cuando en todo el tramo (incluyendo las zonas de aceleración y desaceleración) y para las pendientes del 0% un vehículo liviano en el escenario 1 emitió 1,2 veces más emisiones de CO₂ que en el escenario 2, y 2,3 veces más que las emisiones del escenario 3.

En las secciones de desaceleración, un vehículo liviano en el escenario 1 tuvo emisiones de CO₂ 1,1 veces más altas que el escenario 2 y 2,0 veces más altas que las del escenario 3; mientras en las secciones de desaceleración en el escenario 1 se emitió 1,2 veces más emisiones de CO₂ que en el escenario 2, y 2,3 veces más que en el 3.

En cuanto a la relación de la pendiente se encontró que en el escenario 1 con pendiente del -5% las emisiones de CO₂ son 2,9 veces menores que para escenario con la pendiente del 5% y que en general en este escenario (1) se producen las mayores emisiones, por ejemplo, en el escenario 3 las emisiones con un pendiente del 5% son 2,8 menores que para la misma pendiente en el escenario 1.

2.8.9 Impacto del diseño geométrico horizontal y de las características operacionales en carreteras de dos carriles sobre las emisiones vehiculares

En estudios realizados en la región de Valencia, España, Llopis, Pérez, Camacho, & García (2018) y Nobili, Bella, Llopis, Camacho, & García (2019) se evaluó el impacto de la alineación horizontal de las carreteras y su operación en las emisiones de CO₂, NO_x, HC y CO para vehículos livianos usando datos recolectados en campo, para esto se aplicó una metodología que consistía en la estimación de emisiones de manera microscópica mediante perfiles de velocidad reales que se obtuvieron de la recolección de velocidades reales segundo a segundo en carreteras rurales de dos caminos.

Estas velocidades se recolectaron en días laborables entre las 8:30 a.m. y las 2 p.m. y bajo condiciones de clima seco, la longitud de los tramos de carretera seleccionados varió de 5 a 20 km, con un volumen estimado de tráfico diario entre 850 y 7000 vehículos, los tramos seleccionados se dividieron en 48 segmentos homogéneos de acuerdo con su tasa de cambio de curvatura, la cual se obtuvo mediante la metodología alemana la cual define la curvatura como la relación entre la suma de los ángulos de deflexión absoluta por unidad de longitud, y se escogieron tramos donde la pendiente de la carretera fuera casi cero ya que la influencia de la alineación vertical ha sido mucho más estudiada.

Para la estimación de las emisiones se usó el modelo VT-Micro que predice las tasas de emisión para vehículos teniendo la velocidad del vehículo segundo a segundo y la aceleración como variables de entrada.

El análisis concluyó que las tasas de emisión de CO₂ y NO_x y el consumo de combustible aumentan con la tasa de cambio de curvatura altos, es decir entre mayor es la curvatura mayor es la producción de emisiones CO₂, esto se encontró debido a que cuando se tienen segmentos de carretera con curvatura alta se tienen velocidades más bajas, pero la gran cantidad de variaciones de velocidad (es decir, aceleraciones y desaceleraciones) inducen a emisiones más altas. Además, las emisiones se determinan en función del tiempo, por lo que el mayor tiempo necesario para cubrir estos segmentos viales también juega un papel importante.

También se observó que las velocidades medias bajas producen altas tasas de emisión de CO₂ y aumentan aún más en carreteras con altas dispersiones de velocidad. En base a estos datos, se calibraron varios modelos de regresión para diferentes tipos de vehículos para estimar las emisiones de CO₂ en un segmento de carretera específico. Estos resultados podrían usarse para incorporar principios de sostenibilidad al diseño geométrico de carreteras (Llopis et al., 2018 y Nobili et al., 2019).

Lo contrario ocurre con las emisiones de CO, donde a medida que aumenta la curvatura disminuyen sus emisiones, este fenómeno se explica porque las emisiones de este contaminante están estrechamente relacionadas con el número de revoluciones por minuto (RPM) del motor. Cuando la curvatura es baja, el motor funciona a un bajo RPM (< 1900) y las emisiones de CO son altos.

El consumo de combustible y las emisiones CO₂, NO_x y HC son mayores para velocidades medias inferiores, que también está relacionada con mayores aceleraciones y desaceleraciones promedio. Sin embargo, las tasas de emisión del CO aumenta a medida que aumenta la velocidad media, es decir, cuando las aceleraciones y desaceleraciones son más bajas y el motor está al ralentí (Nobili et al., 2019).

2.8.10 Efectos ambientales: Análisis paramétrico del submodelo del HDM-4

Se realiza un análisis en la carretera Amealco – Acámbaro (tramo Amealco – Coroneo), la cual cruza los estados de Querétaro, Michoacán, y Guanajuato, en la República Mexicana con el objetivo de estudiar el submodelo Efectos Ambientales, incluido en HDM-4 y evaluar la herramienta para el cálculo de emisiones generadas por la operación del transporte en

carreteras, según las características físicas de la infraestructura para tres casos de conservación (Mendoza & Torras, 2008).

Para esta carreta se definió una flota vehicular y las características para cada categoría, se definió la carretera como secundaria, con dos carriles estándar, a flujo libre y una zona climática subtropical – cálido / semiárido, con un pavimento en concreto asfáltico, IRI de 5, velocidad máxima permitida de 100 km/h. Los casos de conservación fueron:

- Caso 1: bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8
- Caso 2: bacheo, reconstrucción para IRI = 8, y sobrecarpeta para IRI=5
- Caso 3: bacheo, riego de sello para 20% del área dañada, reconstrucción para IRI = 8, y sobrecarpeta para IRI=5

En los resultados se obtiene que para los casos 2 y 3 se tienen las mismas emisiones y varían muy poco con el caso 1, en el estudio se concluye que:

Con el uso del módulo ambiental para estimar la cantidad de emisiones integrado en el HDM- 4 se tiene la posibilidad de estimar la cantidad de emisiones generadas en la red o segmento de la misma, por la operación del transporte carretero que circula sobre ella y que el modelo permite tener una idea aproximada de las implicaciones ambientales del deterioro de las condiciones de la red carretera, lo que genera un aumento en el consumo de combustible, costos para el usuario, y por ende, de las emisiones emitidas a la atmósfera. Esto se logra con requerimientos relativamente bajos de datos de entrada adicionales a los que se requieren para un análisis de proyecto dentro del mismo programa (Mendoza & Torras, 2008, p.11-12).

3. Metodología

Para este trabajo de investigación se realizan las siguientes actividades con el fin de lograr cada objetivo propuesto, se hace una revisión bibliográfica y del estado del arte para identificar las emisiones que producen los vehículos, los modelos usados para su estimación teniendo presente que este debe incluir entre sus factores a considerar la geometría de las carreteras; y tipos de clasificación de carreteras de acuerdo a su geometría, encontrado una clasificación de 7 tipos acorde con geometría vial. Paralelamente a esto se consultan proyectos de carreteras en los cuales se planifiquen modificaciones a futuro o que ya se estén construyendo y solicitar la información pertinente.

Una vez se tiene el modelo elegido se estiman las emisiones para los 7 tipos de geometría vial y en las carreteras a analizar se estiman las emisiones para las carreteras sin proyecto y con proyecto y se analiza la variación entre estas.

A continuación, se describen las actividades.

3.1 Revisión bibliográfica

Se realiza una consulta bibliográfica mediante el uso de las herramientas disponibles para esto de la Universidad Nacional de Colombia y otros recursos externos a la Universidad para identificar:

- Flota vehicular típica que circula por las carreteras colombianas
- Las principales emisiones contaminantes que producen la gasolina y el ACPM
- Los modelos que permiten la estimación de las emisiones vehiculares

La flota vehicular típica que circula por las carreteras colombianas es consultada en los documentos técnicos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), allí se encuentran las series

históricas y la composición del tránsito promedio diario identificando que el INVIAS divide los vehículos circulantes en 7 categorías vehiculares:

1. Autos livianos
2. Buses
3. camiones pequeños de dos ejes (C2P)
4. Camiones grandes de dos ejes (C2G)
5. Camiones de tres ejes y cuatro ejes (C3-C4)
6. Camiones de cinco ejes (C3-S2)
7. Camiones de seis o más ejes (C3-S3)

Luego de identificadas las categorías vehiculares para este trabajo se define que los livianos trabajan con gasolina y las demás categorías con ACPM y se consultan las principales emisiones contaminantes emitidas por estos, las cuales se describen en el numeral **2.5**. Teniendo las categorías vehiculares, las emisiones que estas producen y las características geométricas de las carreteras se consultan diferentes modelos que permiten estimar emisiones vehiculares, los cuales se describen en el numeral **2.6**, para esto se revisan estudios ya existentes donde se hayan aplicado estos modelos y sus documentos técnicos y se elabora una matriz (Esta matriz se puede apreciar en el **Anexo A**) donde se tiene la siguiente información para cada modelo:

- Región geográfica: escala a la que el modelo puede estimar emisiones (nacional, regional, municipal o proyecto específico)
- Tipo de vía: rural o urbana
- Escala temporal: emisiones anuales, mensuales, diarias o por hora
- Categorías vehiculares y cantidad de estas
- Tipo de combustible
- Emisiones estimadas
- Características medioambientales como temperatura, humedad, altitud, entre otras
- Características vehiculares: edad del vehículo, tipo de combustible, peso del vehículo, número de ruedas, entre otras.
- Unidades de los datos de salida

3.2 Elección del modelo de estimación de emisiones vehiculares

Con la matriz elaborada (ver **Anexo A**) se elige el modelo HDM-4 como el idóneo para la investigación, se escoge este modelo ya que permite estimar los principales contaminantes generados por los diferentes vehículos según su tipo de combustible y tiene en cuenta diferentes características geométricas viales para su estimación como se mencionó en el numeral **2.6.7**, donde se explica que las emisiones en este modelo son estimadas a partir del consumo de combustible del vehículo y la velocidad, y que estos dos factores dependen de otros incluyendo pendiente y curvatura de la carretera evaluada.

Este modelo también es seleccionado ya que se cuenta con la facilidad de acceso y de licencia para su uso, así como de una adecuada asesoría.

3.3 Datos requeridos por el modelo elegido

Tendiendo definido que el modelo a usar es HDM-4 se deben identificar los datos que este requiere para estimar las emisiones y la forma como se deben ingresar, para esto se consulta la guía básica para el uso de HDM-4 y el libro Evaluación de Proyectos de Inversión en Carreteras con el HDM-4 escritos por (Posada, 2003) y (Posada, 2006).

En estas guías se explica que el modelo posee tres herramientas de análisis (estrategia, programa y proyecto) los cuales toman los datos de 4 bases de datos que se deben alimentar para que los análisis se hagan correctamente, estas son:

1. Configuración: se definen los datos usados por defecto para los proyectos a analizar, los cuales son:

- Modelo de tráfico: define el uso de la carretera (interurbano, de cercanías, estacional)
- Tipo de velocidad/capacidad: define la capacidad de cada tramo de carretera en función del número y tipo de carriles por sentido.
- Zona climática: se definen las condiciones ambientales como el tipo de clima, la humedad, la temperatura, la duración de la estación seca, precipitación media mensual, entre otros.

2. Red de carreteras: se almacena la información correspondiente a las características físicas de la carretera, para esto es necesario dividir el proyecto a analizar en tramos homogéneos según características geométricas, ambientales, de tráfico entre otras. Para cada red creada (en el caso de esta investigación corresponderá a cada proyecto vial consultado) se deben crear los tramos en los que se ha dividido la carretera y para cada tramo llenar la información para 4 secciones, descritas a continuación:

Datos globales del tramo: datos particulares para cada tramo como nombre del tramo, ID, longitud, ancho de la calzada, ancho de berma, número de carriles, tipo de capa de rodadura, tipo de geometría (HDM-4 define por defecto 7 tipos de geometría), entre otros. En esta sección también se definen los datos ya preestablecidos en la configuración.

En la **Figura 3-1** se pueden apreciar los datos requeridos en esta sección.

Figura 3-1: Datos requeridos en la sección “Datos globales del tramo”

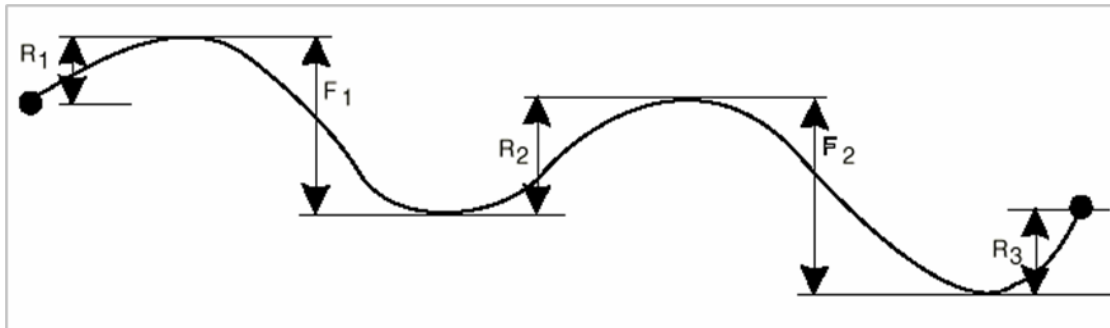
The image shows a software window titled "Datos globales del nuevo tramo" with a close button (X) in the top right corner. The form is organized into two main columns of input fields. The left column contains: "Nombre:" (text box), "ID tramo:" (text box), "Nombre ruta:" (text box), "ID ruta:" (text box), "Tipo vel/cap.:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), "Modelo de tráfico:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), "Zona climática:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), "Clase de:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), "Tráfico:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), and "Geometría:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected). The right column contains: "Longitud:" (text box with "1" and "km" label), "Ancho de calzada:" (text box with "7" and "m" label), "Ancho de arcén:" (text box with "1" and "m" label), "Dirección del tráfico:" (dropdown menu with "Ambos sentidos" selected), "Número de carriles:" (text box with "2"), and "Última renov. superfic.:" (text box with "2019" and "año" label). Below these columns is a section for pavement details: "Tipo capa rodadura:" (dropdown menu with "Bituminosa" selected), "Tipo de pavimento:" (dropdown menu with "Mezcla bituminosa sobre base granular" selected), "Calidad rodadura:" (dropdown menu with "<indefinid.>" selected), "Adec. estructural:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), "Estado capa de rodadura:" (dropdown menu with "<indefinid.>" selected), "Calidad construc.:" (dropdown menu with "<indefinido>" selected), and "Textura superficial:" (dropdown menu with "<indefinid.>" selected). At the bottom right of the window are two buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Fuente: Posada (2006)

Geometría: En esta sección se deben ingresar 6 valores que van a depender de las características geométricas de la vía, a continuación de definen cada uno de ellos:

- **Subidas + Bajadas [m/km]:** se define como la suma de las subidas y las bajadas totales en metros a lo largo de la alineación de la carretera (para el tramo evaluado) sobre la longitud total del tramo, en km. La **Figura 3-2** ilustra cómo se calcula este valor para un tramo determinado.

Figura 3-2: Subidas+bajadas



Fuente: World Bank (2007).

En la ecuación (3.1) se observa el cálculo de este parámetro, teniendo en cuenta la información de la **Figura 3-2**.

$$\text{Subidas} + \text{Bajadas} = (R_1 + R_2 + R_3 + F_1 + F_2 + F_3)/L \quad (3.1)$$

Donde:

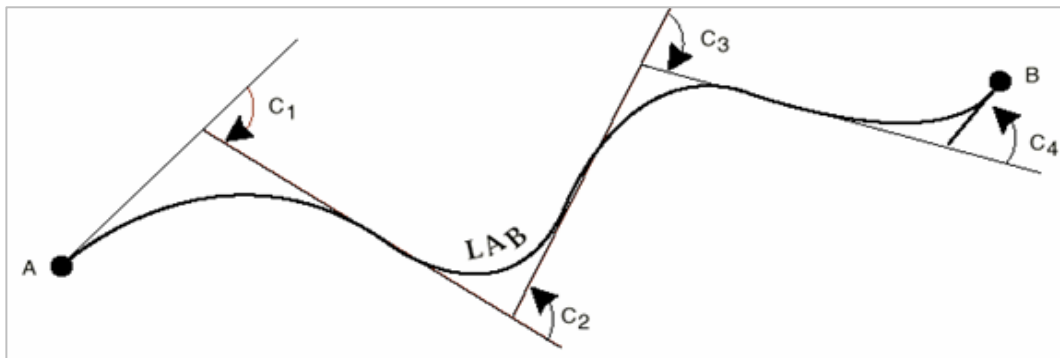
R : Subidas [m]

F : Bajadas [m]

L : Longitud del tramo [km]

- **Curvatura horizontal [grados/km]:** se define como la suma de las deflexiones del tramo de carretera entre la longitud de tal tramo. La **Figura 3-3** ilustra cómo se calcula este valor para un determinado tramo.

Figura 3-3: Curvatura horizontal



Fuente: World Bank (2007).

En la ecuación (3.2) se observa el cálculo de este parámetro, teniendo en cuenta la información de la **Figura 3-3**

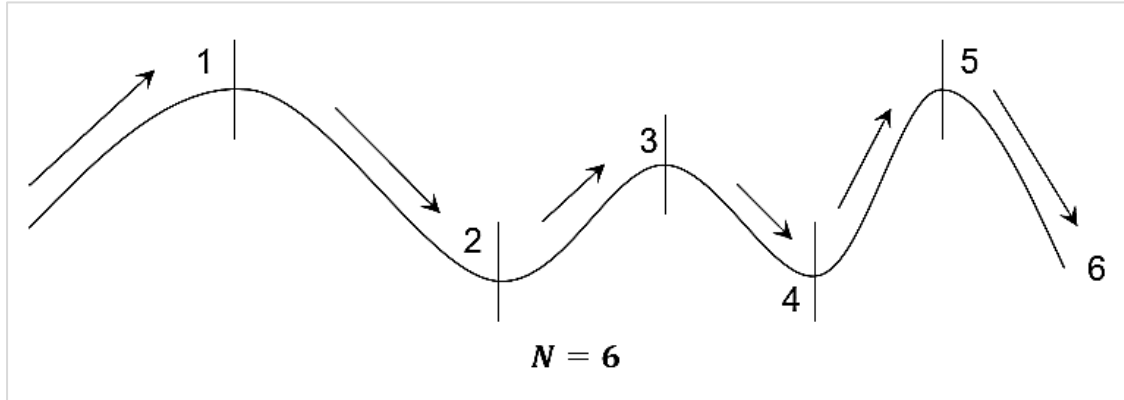
$$\text{Curvatura} = (C_1 + C_2 + C_3)/L \quad (3.2)$$

Donde:

C : deflexión de la curva [grados]

L : longitud del tramo [km]

- Velocidad límite [km/h]: es la velocidad máxima legal permitida que puede tener un vehículo en el tramo evaluado.
- Altitud [m]: altitud promedio sobre el nivel del mar del tramo
- N° de subidas + bajadas [n°/km]: el número de subidas más el número de bajadas de un tramo de carretera por km. La **Figura 3-4** ilustra como se calcula este valor para un tramo determinado tramo.

Figura 3-4: N° de subidas + bajadas

Fuente: Elaboración propia

En la ecuación (3.3) se observa el cálculo de este parámetro, teniendo en cuenta la información de la **Figura 3-4**.

$$N^{\circ} \text{ de subidas + bajadas} = N/L \quad (3.3)$$

Donde:

N : cantidad de veces que el vehículo sube y baja

L : longitud del tramo [km]

- Peralte [%]: peralte promedio del tramo

Firme: En esta sección se determina el tipo de material de la capa de rodadura del tramo evaluado, también se puede definir el número estructural a partir del diseño del pavimento del proyecto evaluado.

Estado del pavimento: en esta sección se ingresan algunos valores correspondientes a los daños que se encuentren en el pavimento como, IRI, área total fisurada, textura, rozamiento, entre otros. En la **Figura 3-5** se pueden apreciar los datos requeridos en esta sección

Figura 3-5: Datos requeridos en la sección “Estado del pavimento”

Tramo: Prueba

Definición | Geometría | Fime | Estado

Estado a final de año	2019
Regularidad (IRI - m/km)	3.00
Área total fisurada (%)	5.00
Área con desp. de áridos (%)	5.00
Número de baches (Nº/km)	0.00
Área con rotura de borde (m²/km)	5.00
Profundidad media de roderas	3.00
Textura (mm)	0.70
Rozamiento (SCRIM 50 km/h)	0.50
Drenaje	Excelente ▼

Nuevo año
Borrar año
Ordenar años

Detalles... Aceptar Cancelar

Añadir una columna para un nuevo año de datos de estado

Fuente: Posada (2006)

3. Parque automotor: en esta base de datos de almacenan las características de los vehículos que circulan por la red vial o red de carreteras definido, para este estudio se usarán los vehículos definidos por el INVIAS como se indica en el numeral 3.1. Para cada categoría vial creada se deben definir algunas características básicas como el número equivalente, número de ruedas y ejes, y el peso en marcha, entre otros.

4. Estándares de trabajo: en esta base de datos se definen las actividades o trabajos a los que serán sometidos los tramos de carreteras. Las opciones disponibles son:

- Estándares de conservación: estrategias de mantenimiento que se consideran para intervenir en los tramos.
- Estándares de mejora: actividades que se realizarán en los tramos para mejorar el estado de estos como por ejemplo ampliaciones de calzada, carriles de reconstrucción, rectificación y mejoras en la capa de rodadura.

Luego de definidos los datos en las bases de datos se debe definir el análisis que se desea realizar, que como se había mencionado al inicio de este numeral son tres. Para este

estudio el análisis relevante a hacer es el de **proyectos** ya que con él se realiza la evaluación de las carreteras y se analiza típicamente la conservación y rehabilitación de la carretera, ampliación de anchos, **mejoras geométricas** (lo que se evalúa en esta investigación), mejora de firmes y nuevas construcciones. Cuando se crea un proyecto nuevo este corresponderá a la carretera que se desea analizar y se le definirá la flota vehicular que se creó en la base de datos de categoría vehicular.

Una vez creado el proyecto se escogen los tramos y los vehículos a evaluar y se debe definir la composición vehicular para cada tramo, cuando se tienen estos datos definidos se asignan los trabajos definidos en la base de datos de estándares de trabajo, se ejecuta el análisis y se obtienen los resultados en forma de informes, dentro de estos se tiene el informe de efecto medioambiental donde se observan las emisiones anuales para cada tramo de la carretera en gramos*1000 vehiculos/km (es decir gr para 1000 vehículos en cada km de la carretera)

Con esto se puede concluir que la información necesaria para alimentar el modelo es la mostrada en la **Tabla 3-1**, donde se divide según las diferentes categorías del programa.

Tabla 3-1: Datos mínimos y básicos requeridos para alimentar HDM-4

Categoría	Datos requeridos por tramo
Zona climática	Zona climática
	Índice de humedad
	Duración estación seca
	Precipitación media mensual
	Clasificación de la temperatura
	Temperatura media
Flota vehicular (Para cada categoría vehicular)	Espacio equivalente en vehículo de pasajeros
	Número de ruedas
	Número de ejes
	Peso en Marcha
Geometría Vial	Longitud
	Ancho de calzada
	Ancho de la berma
	Sentido
	Abscisado
	Cotas PIs curvas verticales
	Deflexiones curvas horizontales
	Radio de las curvas horizontales
	Peralte
Pavimentos	Tipo de material capa de rodadura
	Estructura del Pavimento
	CBR de la subrasante
Tráfico	TPD
	Composición vehicular
Estado del Pavimento	IRI
	Área total fisurada
	Área con desprendimiento de áridos
	Número de baches
	Área con rotura de bordes
	Profundidad
	Textura
	Rozamiento
Drenaje	

Fuente: Elaboración propia

3.4 Proyectos viales que considerar

Se consulta en el portal web de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) los proyectos de las denominadas carreteras de cuarta generación que se están desarrollando o se planean desarrollar en el país, se consultan las empresas contratantes de estos proyectos y se solicita a cada empresa o concesión la siguiente información (basándose en la información requerida por el modelo mostrada en el numeral **3.3**):

- Topografía del terreno en la que se tiene el proyecto: se solicita esta información para reconstruir lo que sería el diseño geométrico de la vía existente y con este obtener los datos del alineamiento horizontal y el perfil vertical de la carretera existente.
- Diseño geométrico de la carretera proyectada: para obtener los datos del perfil longitudinal y vertical de las carreteras proyectadas
- Estudios de tránsito: obtener el TPD circulante tanto en la carretera existente como en la proyectada y su composición vehicular según los 7 tipos de categorías definidas en el numeral **3.1**.
- Estudios de pavimentos: para obtener los espesores de los pavimentos diseñados y existentes

Una vez los encargados de los proyectos viales responden la solicitud se encuentra que algunas de ellas proveen la información y otras contestan que esta solicitud se debe realizar con la ANI que es la entidad contratante, se pasa esta solicitud a la ANI y al final se tiene la información de 20 proyectos, 4 de ellos se descartan debido a que la información no está completa o no es adecuada, uno debido a que es la construcción de una nueva carretera luego no hay una vía existente para mejorar y 2 restantes porque no habían cambios en el trazado o no eran significativos respecto a la longitud de la vía.

Las 13 carreteras restantes son organizadas según 6 tipos de intervención que se identificaron en los proyectos, los cuales son:

1. Rehabilitación de la calzada existente y construcción de una nueva calzada, conformándose doble calzada.
2. Mejoramiento del trazado longitudinal y vertical de la calzada existente.

3. Mejoramiento de la calzada existente y construcción de una nueva calzada, conformándose doble calzada.
4. Pavimentación de la carretera manteniendo la geometría existente.
5. Rehabilitación de la calzada existente y construcción de la segunda calzada con el mismo trazado que la existente, conformándose doble calzada.
6. Construcción de doble calzada con nuevo trazado total.

Es necesario aclarar que cada proyecto tiene unas unidades funcionales, tramos o frentes de trabajo que difieren entre sí por el tipo de intervención que se planea hacer, luego para cada carretera también se identifica que hace en cada unidad funcional y se escogen aquellos donde se presentaran alguno de los 6 tipos de intervenciones anteriormente mencionados, y se descartan aquellos donde no se presentan estas intervenciones o los cambios en la geometría no eran significativos.

En la **Tabla 3-2** presentan los tipos de intervención a realizar en cada carretera y unidad funcional o tramo.

Tabla 3-2: Tipo de intervención por carretera y unidad funcional o tramo

ID Carretera	Unidad Funcional o Tramo	Tipo de Intervención
1	UF1 – UF3	2
2	UF2 – UF3 – UF4	2
3	Tramos 1 – 4	1
	Tramo 2 – 3	6
4	UF3	4
5	UF1 – UF 2.1	3
6	-	3
7	Tramos 3.2 – 5 – 6	2
8	Tramo 2	2
9	UF1	1
	UF2	1
10	Tramo 8 – 9	1
11	-	5
12	-	4
13	-	5

Fuente: Elaboración propia

3.5 Organización de los datos a ingresar en HDM-4

Este numeral se divide en dos actividades, la primera consiste en la organización de datos por tipo de geometría vial con el fin de cumplir uno de los objetivos específicos de este

trabajo y la segunda actividad que consiste en la organización de los datos de los proyectos viales que se van a analizar, esto es igual para el cumplimiento de los objetivos de la tesis.

3.5.1 Datos para la estimación de emisiones contaminantes según diferentes condiciones geométricas de carretera

Para estimar las emisiones para diferentes condiciones geométricas de una carretera se usan las 7 categorías viales que define HDM-4; que difieren entre sí por su curvatura y condiciones de subidas y bajadas, estas categorías y sus características que pueden observar en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3: Tipos de geometría definidas por HDM-4

ID	Geometría	Subidas + Bajadas [m/km]	N°. de subidas + bajadas [n°/km]	Curva horizontal [°/km]	Peralte [%]	Velocidad límite [km/h]
	Tipo de carretera					
1	Recta y muy plana	1	1	3	2	110
2	Ligeramente Sinuosa y ondulada	10	2	15	2.5	100
3	Sinuosa y muy poco ondulada	3	2	50	2.5	100
4	Sinuosa y ligeramente ondulada	15	2	75	3	80
5	Sinuosa y ondulada	25	3	150	5	70
6	Muy Sinuosa y ligeramente ondulada	20	3	300	5	60
7	Muy Sinuosa y ondulada	40	4	500	7	50

Fuente: World Bank (2007)

Para estimar las emisiones para cada tipo de geometría descritos en la anterior tabla se requieren los siguientes datos con los cuales se completan para las 4 bases de datos descritas en el numeral **3.3**. que requiere HDM-4 para su funcionamiento.

- Definición del parque vehicular: se crearon las 7 categorías vehiculares manejadas por el INVIAS y para cada vehículo se define el espacio equivalente en vehículos de pasajeros, número de ruedas y ejes y el peso en marcha, los demás parámetros se asumen por defecto los usados por el modelo, como se muestra en la **Tabla 3-4**.

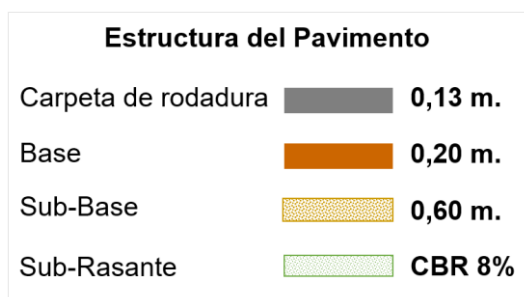
Tabla 3-4: Características parque vehicular usado en HDM-4

Tipo de Vehículo	N°. Equivalente	N°. de ruedas	N°. de ejes	Peso en marcha [t]
Autos Livianos	1	4	2	1,2
Buses	1,6	6	2	10
C2P	1,3	6	2	2
C2G	1,4	6	2	7,5
C3-C4	1,6	10	3	13
C5	1,8	18	5	28
C6	1,8	22	6	33

Fuente: elaboración propia

- Modelo de tráfico: se define el uso de la carretera como interurbano y se usan los valores que por defecto trae el modelo ya que son representativos de el comportamiento del tráfico de las carreteras analizadas.
- Tipo de velocidad/capacidad: define la capacidad para una carretera de dos carriles normales con funcionamiento bidireccional.
- Zona climática: se definen la zona climática subhúmeda Tropical
- Red de carreteras: se crea una red de carreteras con 7 tramos y cada tramo tendrá las características geométricas de los tipos de carreteras definidas por HDM-4, es decir los datos de la **Tabla 3-3**. Se define cada tramo con una longitud de 10 km, un ancho de berma de 1 m, ancho de la calzada 7.3 m, una altitud promedio de 1000 m, con una capa de rodadura bituminosa y un TPD de 5261 vehículos, el cual es un TPD típico de una vía interurbana consultada en el INVIAS. Para la estructura del pavimento se supone la estructura mostrada en la **Figura 3-6**, la cual es representativa de las vías analizadas en esta investigación.

Figura 3-6: Estructura pavimento para los 7 tipos de geometría



Fuente: Elaboración propia

Para el estado del pavimento se tomaron los valores que por defecto tiene HDM-4 cuando se considera que el pavimento está en buen estado, esto debido a que no se dispone de la información del estado real del pavimento en las carreteras analizadas, los cuales se presentan en la **Tabla 3-5**.

Tabla 3-5: Datos usados en la sección de Estado del pavimento

Estado al fin del año	2019
IRI (m/km)	3
Área Fisurada (%)	5
Área con Desprendimientos (%)	5
Número de Baches (#/km)	0
Área con Rotura de Bordos (m ² /km)	5
Ahuellamiento (mm)	3
Textura (mm)	0,7
Rozamiento	0,5

Fuente: Elaboración propia

- Estándares de trabajo: en esta sección se define un estándar de mejora con 4 actividades de mantenimiento las cuales se describen a continuación:
 1. Repavimentación con una capa asfáltica de 0,07m cuando el IRI sea igual o superior a 8.
 2. Bacheo cuando el número de baches sea igual o superior a 5
 3. Sello de fisuras cuando el área fisurada sea igual o superior al 10%
 4. Mantenimiento rutinario cada año

Estas actividades no son tenidas en cuenta para la estimación de emisiones, pero es necesario introducir algún tipo de trabajo que se le realizará al proyecto para así poder correr el modelo.

- Proyecto: para crear el proyecto en HDM-4 se usa la red creada y para la composición vehicular la del TPD consultado, el cual se puede ver en la **Tabla 3-6**.

Tabla 3-6: TPD usado para los 7 tipos de geometría

Tipo de Vehículo	TPD
Autos livianos	3051
Buses	474
C2P	989
C2G	191
C3 - C4	174
C5	150
C6	232
Total	5261

Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Nacional de Vías (2015).

3.5.2 Datos para la estimación de emisiones contaminantes para los diferentes proyectos viales

A continuación, se presentan los datos necesarios para completar las 4 bases de datos descritas en el numeral 3.3. y así estimar las emisiones de los proyectos viales seleccionados (tanto en las carreteras existentes como proyectadas).

Se presentan primero los datos que son comunes para todos los proyectos, luego se describe lo que se hace para obtener los datos geométricos para cada red de carreteras creado en HDM-4 (la cual corresponderá a un proyecto vial seleccionado) y finalmente una descripción de cada proyecto vial y los datos usados para la estimación de sus emisiones.

Datos comunes para todos los proyectos viales:

- Definición del parque vehicular: se usa el creado para el numeral 3.5.1 y que se describe en la Tabla 3-4.
- Modelo de tráfico: se define el uso de las carreteras como interurbano y se usan los valores que por defecto trae el modelo.
- Estado del pavimento: que se define en la Red de Carreteras y se usan los valores descritos en la **Tabla 3-5**.
- Estándares de trabajo: se usa el creado para el numeral 3.5.1.

Actividades para obtener los datos geométricos para cada red de carreteras:

Se organizan los datos geométricos de los proyectos viales escogidos en el numeral 3.4, dividiendo estos en tramos homogéneos. La tramificación se realizó acorde con las características geométricas definidos por HDM-4 (ver **Tabla 3-3**).

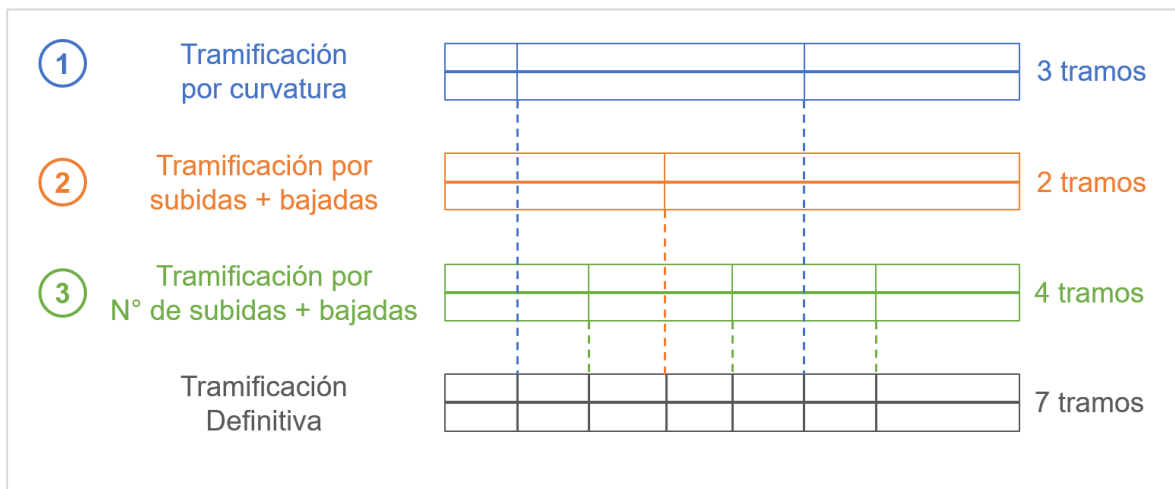
Para la carretera existente, como no se cuenta con el plano de los diseños originales se obtienen los datos geométricos con ayuda del software AutoCad Civil 3D 2018 procediendo a definir los alineamientos con base en los levantamientos topográficos de la vía existente, obteniendo lo que podemos llamar el diseño original de cada carretera.

Teniendo el diseño (tanto en planta como en perfil) se divide en tramos la carretera según los siguientes parámetros:

- Subidas + bajadas usando la Ecuación (4-1)
- Curvatura usando la Ecuación (4-2)
- N° de subidas + bajadas usando la Ecuación (4-3)

Para cada uno de estos parámetros se realiza una tramificación, teniendo al final tres tramificaciones para la carretera las cuales se superponen para tener una definitiva para la carretera. En la **Figura 3-7** se explica mediante un esquema lo que se hace, cada franja representa la carretera y el parámetro que se usa para dividirla en tramos.

Figura 3-7: Tramificación de las carreteras



Fuente: Elaboración propia

Una vez se tiene la tramificación final de la carretera se deben calcular nuevamente para cada tramo la curvatura, las subidas + bajadas en m/km y No/km como se describió anteriormente, y adicional a esto se encuentra para cada tramo los siguientes valores:

- Velocidad limite [km/h]: se utilizan las velocidades de diseño respecto al radio de curva más pequeño del tramo del Manual de Diseño Geométrico del INVIAS.
- Altitud [m]: se calcula el promedio ponderado de la altitud.
- Peralte [%]: se calcula el peralte promedio del tramo
- Longitud del tramo [km]

Este mismo proceso se realiza para las carreteras proyectas de las cuales se tiene el alineamiento horizontal y vertical según sus respectivos diseños. La información de los proyectos viales seleccionados y datos usados para la estimación de sus emisiones se pueden consultar en el **Anexo B**.

3.6 Estimación de las emisiones y análisis de la variación

Se ejecutan los proyectos creados en HDM-4, para los tipos 7 tipos de geometría y los proyectos viales a analizar (los cuales contienen los tramos para la carretera existente y proyectada), se extraen los informes de efectos medioambientales donde, como se mencionó anteriormente, se tienen las emisiones por tipo de vehículo para cada tramo de carretera en gr*1000 vehículos/km.

Para las 7 carreteras diferenciadas entre sí por los tipos de geometría se analizan como varían las emisiones de tipo a tipo, por cada categoría vehicular y para un vehículo y afectada con el TPD supuesto, los datos usados para estos tipos de geometría y las emisiones estimadas se encuentra en el **Anexo C**.

En los proyectos viales se realiza un análisis comparativo de las emisiones con los dos escenarios planteados (carretera existente y carretera proyectada). Primero se identifican las intervenciones que son similares entre sí y se agrupan en 3 grupos y luego identifican como varían las emisiones con respecto a los cambios geométricos realizados a la carretera y por tipo de intervención.

Finalmente se analizan los resultados y se obtienen las conclusiones

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación, primero se observan las emisiones en g o kg para los diferentes tipos de carreteras descritos en la **Tabla 3-3**

Después de estos resultados se presentan las variaciones de las emisiones, comparando la geometría actual versus la geometría proyectada de las carreteras estudiadas. Estas variaciones se presentan en porcentaje y diferenciadas por cada tipo de intervención detectada (numeral **3.4**), primero para un solo tipo de vehículo de cada categoría vehicular y después la variación para todos los vehículos que circulan en cada carretera de estudio según sus estudios de tránsito y transporte.

4.1 Emisiones por tipo de geometría vial

A continuación, se presentan las emisiones, en g o kg, de los vehículos livianos y los camiones tipo C5. Primero se presenta la variación de las emisiones para un solo tipo de vehículo y después la variación de las emisiones para el TPD propuesto en los 7 tipos de geometría.

Las características geométricas de cada tipo de geometría y el TPD usado para la estimación de estas emisiones se encuentra en el numeral **3.5.1**.

4.1.1 Emisiones de un vehículo y para los 7 tipos de geometría

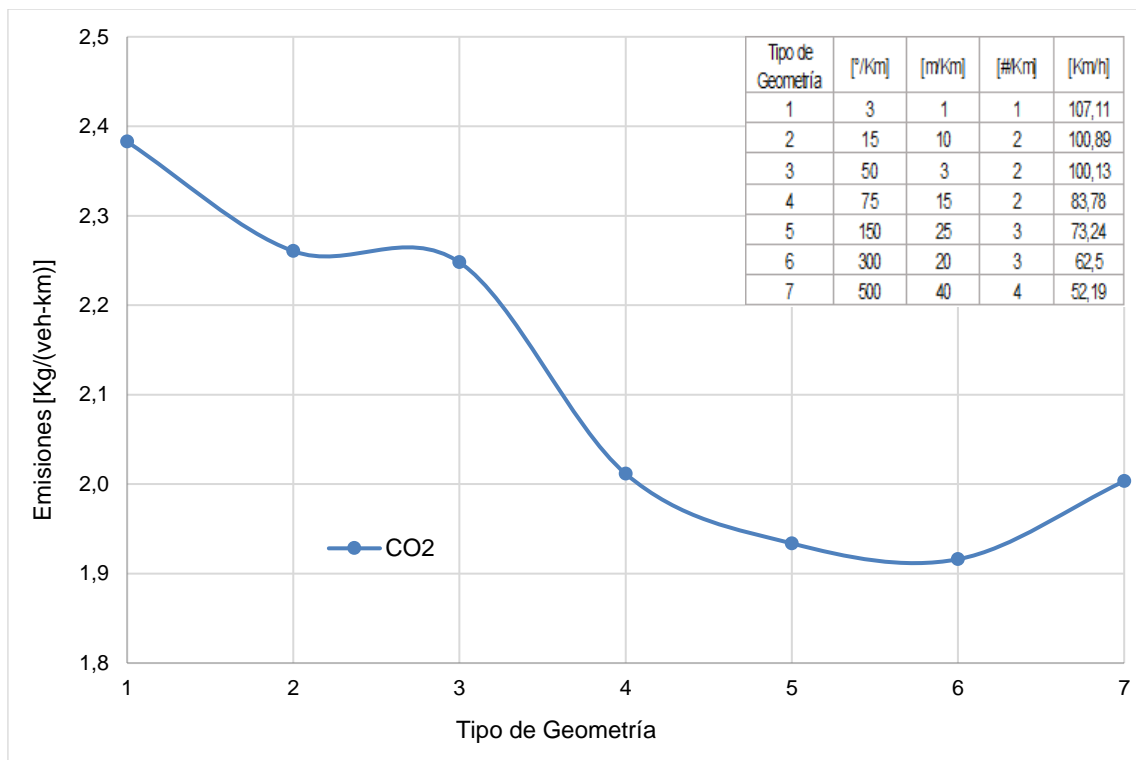
A continuación, se presentan las emisiones estimadas por tipo de geometría para los autos livianos y los camiones C5 (para las demás categorías vehiculares ver **Anexo D**) y para un solo tipo de vehículo.

▪ Autos Livianos

En las **Figura 4-1**, **Figura 4-2** y **Figura 4-3** se observan las emisiones por tipo de geometría vial para un auto liviano y se incluye en recuadro las características geométricas y velocidad estimada por el modelo para cada tipo de carretera analizada.

En la **Figura 4-1** se muestra el comportamiento del contaminante CO₂ por tipo de geometría para el vehículo liviano.

Figura 4-1: Emisiones de CO₂ en autos livianos.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-1** se puede apreciar que las emisiones de CO₂ en un auto liviano son mayores cuando se tiene carreteras planas, poco onduladas y con curvaturas pequeñas (hasta de 50 [°/km]) que son las características de los 3 primeros tipos de geometría y que entre estos tres grupos las emisiones disminuyen muy poco, las emisiones de CO₂ son aproximadamente 5% menos en la geometría tipo 2 y 3 que las de la geometría tipo 1. Se tiene también que para el tipo de geometría 4 y 7 las emisiones son muy similares y se

reducen en 16% comparada con el tipo de geometría 1 y 11% comparada con el tipo de geometría 2 y 3.

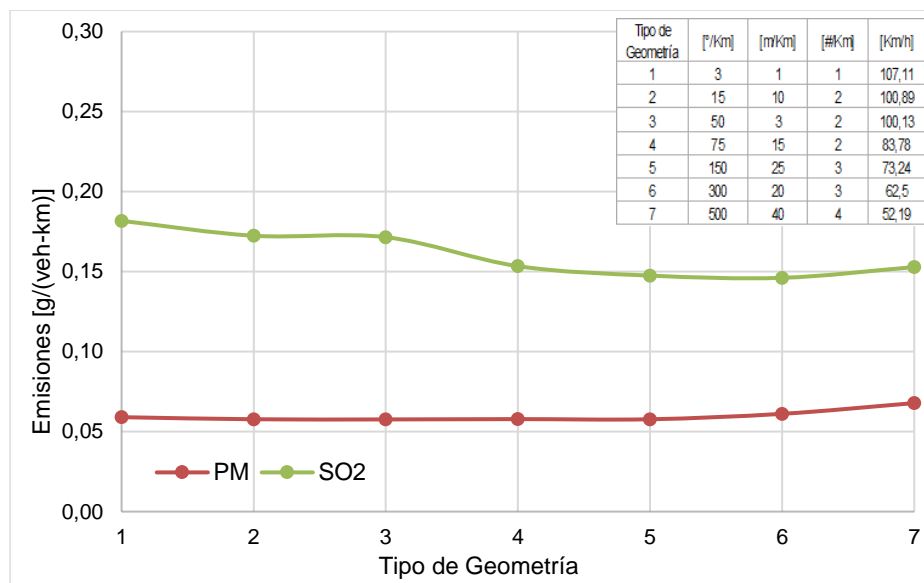
Las menores emisiones se presentan en el tipo de geometría 5 y 6, las cuales son aproximadamente iguales y disminuyen en un 20% con respecto al tipo de geometría 1, 15% comparada con el tipo de geometría 2 y 3, y 4% con respecto a la geometría 4 y 7.

De manera general se observa que las emisiones de CO₂ son mayores al tener carreteras muy planas y poco sinuosas y onduladas, que existe un punto medio donde las emisiones no son muy altas donde las carreteras son sinuosas y ligeramente onduladas o muy sinuosas y onduladas y que las menores emisiones se presentan en carreteras que son sinuosas, pero no con curvaturas que superan los 300 [°/km] y onduladas. Este comportamiento es acorde al comportamiento que tiene el consumo del combustible en relación con la velocidad, el cual es en U, donde a velocidades muy altas o bajas se encuentran los mayores consumos de combustible.

Un comportamiento similar a este se encontrará a lo largo de los resultados obtenidos.

En la **Figura 4-2** se muestra el comportamiento de los contaminantes PM (incluidos PM₁₀ y PM_{2.5}) y SO₂ por tipo de geometría para el vehículo liviano.

Figura 4-2: Emisiones de PM y SO₂ en autos Livianos.



Fuente: Elaboración propia

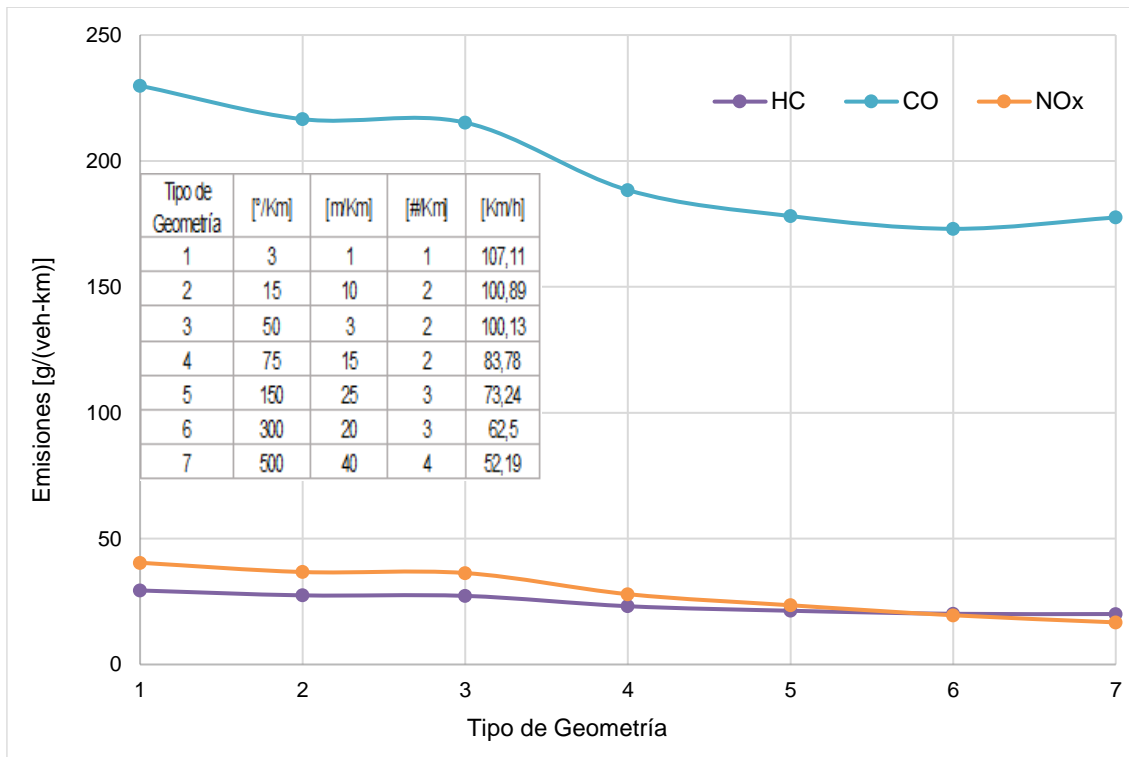
Las emisiones de PM son muy pequeñas y no presenta variaciones significativas, aumentan el 6% en el tipo de geometría 6 y el 15% en el tipo de geometría 7 con respecto a los demás tipos de geometría, que las emisiones de PM sean tan pequeñas se puede deber a que las emisiones PM por la gasolina son muy bajas.

Las emisiones de SO₂ también son muy pequeñas, pero se comportan de la misma forma del CO₂, teniendo emisiones mayores al tener o carreteras muy planas y rectas o muy sinuosas y onduladas y las emisiones son menores cuando las carreteras son ligeramente sinuosas y onduladas.

Al igual que en el CO₂ las emisiones de SO₂ son aproximadamente 5% menos en la geometría tipo 2 y 3 que las de la geometría tipo 1, para el tipo de geometría 4 y 7 las emisiones son muy similares y se reducen en 16% comparada con el tipo de geometría 1 y 11% comparada con el tipo de geometría 2 y 3.

En la **Figura 4-3** se muestra el comportamiento de los contaminantes HC, CO y NOx por tipo de geometría para el vehículo liviano.

Figura 4-3: Emisiones de HC, CO y NOx en autos livianos.



Fuente: elaboración propia

Las emisiones de HC y NOx en los autos livianos presentan el mismo comportamiento, las emisiones disminuyen a medida que los tipos de geometría se hacen más onduladas y sinuosas, es decir a menor curvatura y relación de subaidas+bajadas en m/km se tiene que las emisiones son mayores, y viceversa.

En la **Figura 4-3** también podemos apreciar que las emisiones de NOx e HC son muy similares en los tipos geometría 2 y 3 y para los HC también sus emisiones son muy similares en los tipos de geometría 7 y 6.

Las emisiones de CO presentan un comportamiento similar a las emisiones de CO₂ teniendo emisiones mayores al tener o carreteras muy planas y rectas o muy sinuosas y onduladas y las emisiones son menores cuando las carreteras son ligeramente sinuosas y onduladas

En la **Tabla 4-1** se presentan las variaciones en los contaminantes comparando las emisiones de un cada tipo de geometría con la geometría tipo 1.

Tabla 4-1: Variación de emisiones autos livianos

Comparación Tipo de Geometría	HC	CO	NOx	PM	SO ₂	CO ₂
2 - 1	-7%	-6%	-9%	-2%	-5%	-5%
3 - 1	-7%	-6%	-10%	-2%	-6%	-6%
4 - 1	-21%	-18%	-31%	-4%	-16%	-16%
5 - 1	-27%	-23%	-42%	-2%	-19%	-19%
6 - 1	-32%	-25%	-52%	4%	-20%	-20%
7 - 1	-32%	-23%	-59%	15%	-16%	-16%

Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 4-1** se puede observar que en el auto liviano todas las emisiones disminuyen con el aumento de curvatura y la relación subaidas+bajadas en m/km, a excepción del PM que aumenta donde la curvatura y la relación subaidas+bajadas en m/km es mayor (Geometría tipo 6 y 7). En las emisiones de HC y NOx la mayor disminución con respecto a la geometría 1 se presenta en la 7 y en los CO, CO₂ y SO₂ se presentan en el tipo de geometría 6.

Como una conclusión general para los autos livianos se puede decir que las emisiones de PM y SO₂ son muy pequeñas, las mayores emisiones son las CO₂ y los siguientes grupos de emisiones presentan el mismo comportamiento: los HC y NO_x y los CO, SO₂ y CO₂.

En relación con la geometría y la velocidad se encuentra que las emisiones de CO, SO₂ y CO₂ tienen un comportamiento en U en relación con la velocidad, teniendo mayores emisiones a velocidades altas (mayores a 100 km/h) y bajas (menores a 60 km/h) y que estos dos extremos se encuentran cuando la sinuosidad y la relación de subidas+bajadas en m/km son o altas o bajas.

El material particulado, a pesar de que como ya se mencionó son pequeñas en comparación con los demás contaminantes esto debido al tipo de combustible (gasolina) usado en los autos livianos, es inversamente proporcional a la velocidad (a medida que disminuye la velocidad aumentan las emisiones y es directamente proporcional al aumento de la sinuosidad y la relación de subidas+bajadas en m/km.

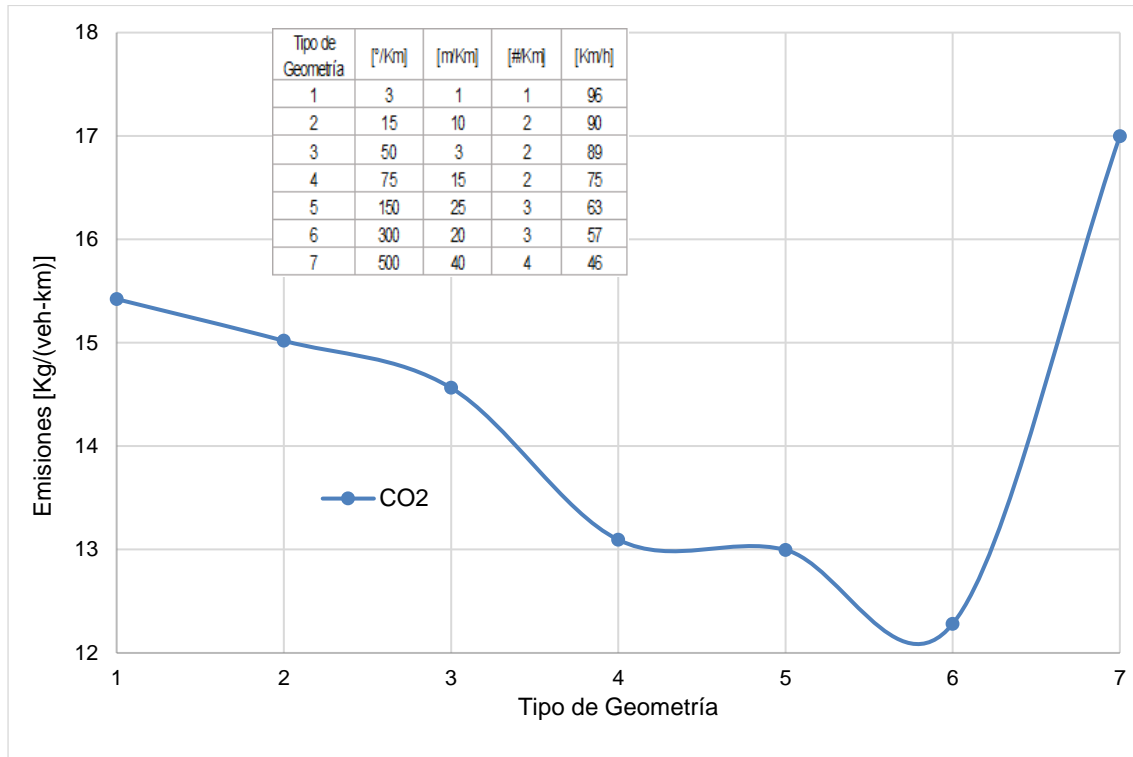
Finalmente, las emisiones de HC y NO_x tienen un comportamiento contrario al del PM, a medida que aumenta la velocidad y disminuye la sinuosidad y la relación de subidas+bajadas en m/km estas emisiones aumentan.

- **Camiones tipo C5**

En las **Figura 4-4**, **Figura 4-5** y **Figura 4-6** se observan las emisiones por tipo de geometría vial para un camión C5 y se incluye en recuadro las características geométricas y velocidad estimada para cada tipo de carretera analizada.

En la **Figura 4-4** se muestra el comportamiento de los contaminantes CO₂ por tipo de geometría para el camión C5.

Figura 4-4: Emisiones de CO₂ en camiones C5.



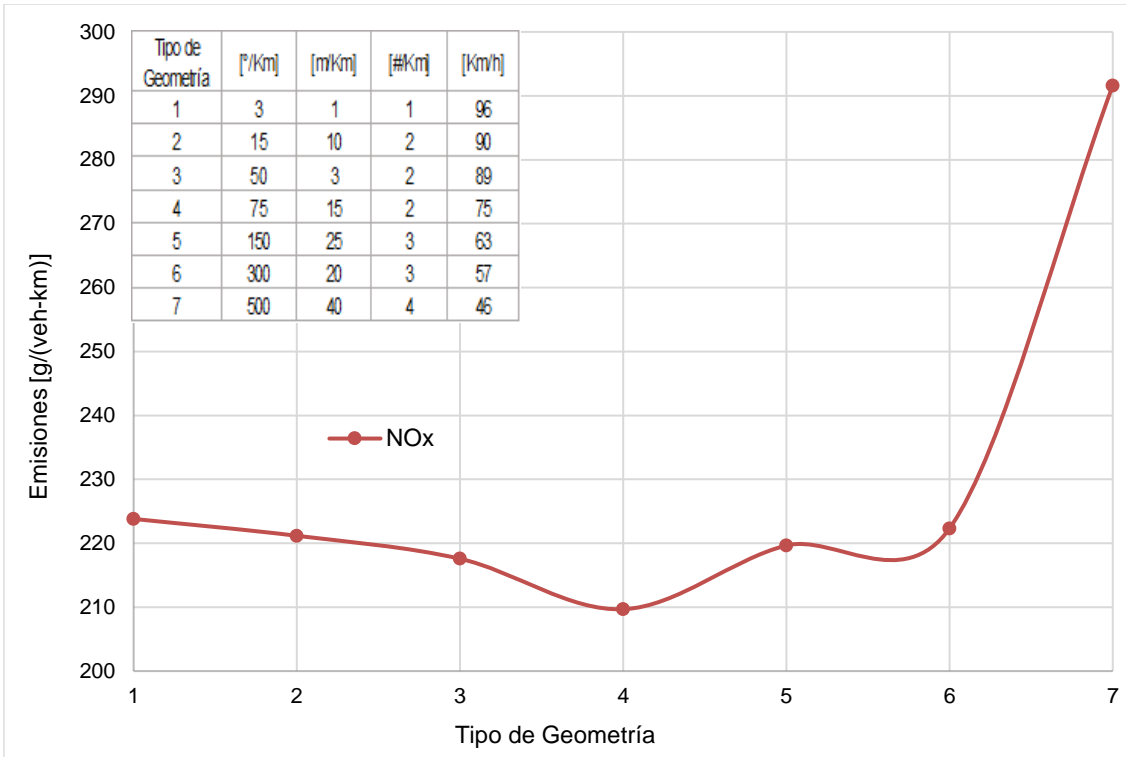
Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-4** se observa que entre los tipos de geometría 1 y 6 las emisiones de CO₂ en camiones tipo C5 disminuyen, las mayores emisiones se tienen en las carreteras que son poco sinuosas y poco onduladas o muy sinuosas y muy onduladas, si comparamos con la velocidad es donde se tienen velocidades altas (mayores de 80 km/h) o velocidades pequeñas (menores a 50 km/h). La máxima emisión se tiene en el tipo de geometría 7 y la mínima en el tipo de geometría 6.

Del comportamiento de las emisiones de CO₂ en camiones tipo C5 se puede decir que estas son inversamente proporcionales al aumento de la curvatura, relación de subidas+bajadas en m/km y #/km en los tipos de carretera estudiados a excepción del tipo de geometría 7 donde se presentan grandes emisiones, esto se relaciona también con el comportamiento de la velocidad, teniendo que a mayores y menores velocidades se tienen las mayores emisiones (esto acorde a la curva de consumo de combustible vs velocidad explicada anteriormente),

En la **Figura 4-5** se muestra el comportamiento del NOx por tipo de geometría para el camión C5.

Figura 4-5: Emisiones de NOx en camiones C5.



Fuente: elaboración propia

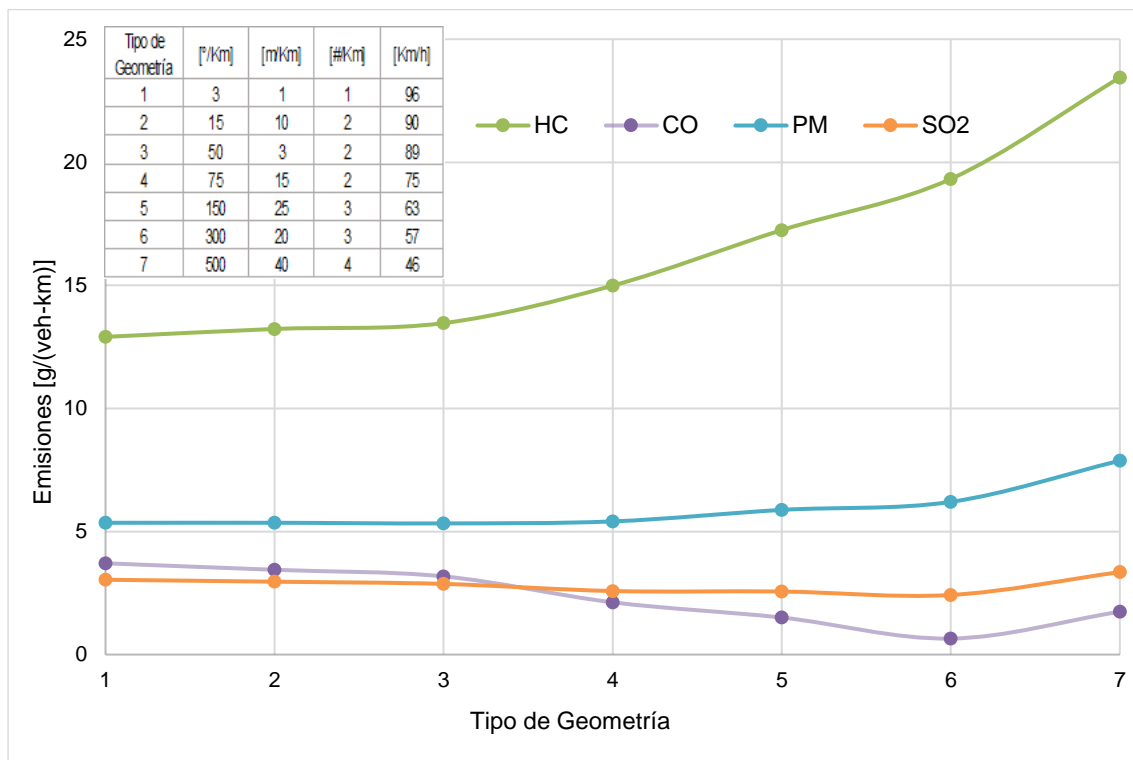
En la **Figura 4-5** se puede observar que las emisiones de NOx en camiones C5 disminuyen hasta llegar al tipo de geometría 4 y a partir de esta empiezan a aumentar presentándose las mayores emisiones en el tipo de geometría 7.

Se puede observar de forma general que hasta el tipo de geometría 4 las emisiones disminuyen a medida que aumenta la curvatura y la relación subidas+bajadas en m/km pero a partir de ahí aumentan con el aumento de la curvatura y esta relación, esto se puede también relacionar con la velocidad que se presenta para cada tipo de geometría para los camiones C5, cuando se disminuyen velocidades altas (mayores a 80 km/h) las emisiones disminuyen pero si éstas siguen disminuyendo (menores a aproximadamente 60 km/h) las emisiones aumentan.

Tanto en la curva de CO₂ como de NO_x se aprecia que hay un crecimiento de estas emisiones de mayor proporción entre el tipo de geometría 6 – 7 si se compara con el tipo, este comportamiento puede asociarse al hecho que entre la geometría 6 – 7 existe un aumento del 100% en la relación de subidas+bajadas en m/km al igual que un incremento del 60% en la sinuosidad (siendo este el de mayor incremento en comparación con las demás carreteras) haciendo suponer que para este tipo de vehículos al presentarse sinuosidades y la relación de subidas+bajadas en m/km tan altos hace que haya un crecimiento acelerado en estos dos tipos de emisiones.

En la **Figura 4-6**, se muestra el comportamiento de los contaminantes HC, CO, PM y SO₂ por tipo de geometría para el camión C5.

Figura 4-6: Emisiones de HC, CO, PM y SO₂ en camiones C5.



Fuente: elaboración propia

Las emisiones de HC y PM presentan el mismo comportamiento en los camiones C5 aumentando a medida que se aumenta curvatura y la relación subidas+bajadas en m/km y #/km y a medida que disminuye la velocidad. Las emisiones de SO₂ tienen el mismo

comportamiento de las emisiones de CO₂ donde, como se menciona antes, las mayores emisiones se tienen en las carreteras que son poco sinuosas y onduladas o muy sinuosas y onduladas y se presenta un pico en sus emisiones en el tipo de geometría 7. Las emisiones de CO, aunque tienen un comportamiento similar al de las emisiones de CO₂, en este caso en el tipo de geometría 7, aunque aumenta con respecto al tipo 6, el pico se presenta en el tipo de geometría 1.

En general en los camiones en camiones tipo C5 se puede concluir según los resultados presentados que las emisiones de CO₂, SO₂, CO y NO_x son inversamente proporcionales al aumento de la curvatura y relación de subidas+bajadas en m/km y #/km en los tipos de carretera estudiados y a su vez que estas emisiones están estrechamente relacionadas con la velocidad, teniendo picos de emisiones en los tipos de geometría donde se tiene altas o bajas velocidades. Por el contrario, las emisiones de HC y PM se comportan directamente proporcionales al aumento de la curvatura y la relación de subidas+bajadas en m/km y #/km.

En la **Tabla 4-2** se presentan las variaciones en los contaminantes comparando las emisiones de un cada tipo de geometría con la geometría tipo 1.

Tabla 4-2: Variación de emisiones en camiones C5

Comparación Tipo de Geometría	HC	CO	NO _x	PM	SO ₂	CO ₂
2 - 1	2%	-7%	-1%	0%	-3%	-3%
3 - 1	4%	-14%	-3%	-0,4%	-6%	-6%
4 - 1	16%	-43%	-6%	1%	-15%	-15%
5 - 1	34%	-59%	-2%	10%	-16%	-16%
6 - 1	50%	-82%	-1%	16%	-20%	-20%
7 - 1	82%	-53%	30%	47%	10%	10%

Fuente: Elaboración propia

De la **Tabla 4-2** se puede observar que en las emisiones de HC, NO_x, PM, CO₂ y SO₂ las emisiones aumentan en el tipo de geometría 7 con respecto al 1, presentándose los mayores incrementos en el CO y PM. El CO presenta un comportamiento diferente disminuyendo.

De la cantidad de emisiones producidas los camiones C5 se puede decir que las emisiones de CO y SO₂ son pequeñas, en comparación de las demás emisiones; las mayores emisiones son los CO₂ y los siguientes grupos de emisiones presentan el mismo comportamiento: los HC y PM y los SO₂ y CO₂.

4.1.2 Emisiones afectadas por el TPD y para los 7 tipos de geometría

Las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C5 cuando son afectadas con el TPD propuesto en la **Tabla 3-6** aumentan pero el comportamiento para cada tipo de vehículo y emisión es el mismo que el presentado en el numeral **4.1.1**, los resultados se pueden ver en el **Anexo D**.

4.2 Emisiones por tipo de vehículo y tipo de intervención

A continuación, se presentan las variaciones de las emisiones por tipo de vehículo y contaminante para cada intervención identificada.

Las intervenciones se agrupan en 3, uniando aquellas que tienen similitudes en su intervención, de la siguiente forma:

- Intervenciones 1 y 5
- Intervenciones 2 y 4
- Intervenciones 3 y 6

A lo largo de estos resultados se presentan algunas figuras con la variación de las emisiones respecto a cambios de las subidas+bajadas en m/km y otras con respecto al cambio de curvatura, esto con el fin de observar el comportamiento para los dos casos, pero siempre se describen los resultados en base a los tres cambios geométricos que fueron estudiados en este trabajo.

4.2.1 Intervenciones 1 y 5

Se realiza la unión de estos dos tipos de intervenciones ya que en cada uno de los proyectos viales se realiza la rehabilitación de la calzada existente, sin mejoras al trazado original, y se construye una nueva calzada; en la intervención 1 esta nueva calzada tiene

nuevas especificaciones geométricas y en la intervención 5 la nueva calzada tiene las mismas especificaciones geométricas de la existente, teniendo así al final proyectos de doble calzada sin cambios a la calzada existente.

Se identifican 6 carreteras con estos tipos de intervención (3 para la intervención 1 y 3 para la intervención 5).

Cada carretera tiene en su nueva calzada modificaciones con respecto a la actual que difieren entre sí, ya que en algunas carreteras puede disminuir la curvatura, pero aumentar las subidas+bajadas en m/km, luego las gráficas que se presentarán a continuación relacionan la variación de las emisiones con los cambios de curvatura, pero estos están asociadas a los demás cambios en la geometría. Los cambios de las características geométricas de la carretera (estos cambios son con respecto a la carretera en su condición inicial, o sea sin intervención) se presentan en porcentaje, un porcentaje positivo significa un aumento y por el contrario un porcentaje negativo una disminución, lo mismo aplica para las emisiones.

La **Tabla 4-3** presenta carretera y su unidad funcional o tramo a que intervención está asociada y sus respectivos cambios de curvatura, subidas+bajadas en m/km y subidas+bajadas en #/km

Tabla 4-3: Variaciones en la geometría vial para las Intervenciones 1 y 5.

Carretera	Intervención	[°/km]	[m/km]	[#/km]
10-Tramo 8	1	-29%	141%	-16%
10-Tramo 9	1	-70%	20%	39%
3-Tramo 4	1	-88%	-22%	-68%
3-Tramo 1	5	0%	0%	0%
11	5	0%	0%	0%
13	5	0%	0%	0%

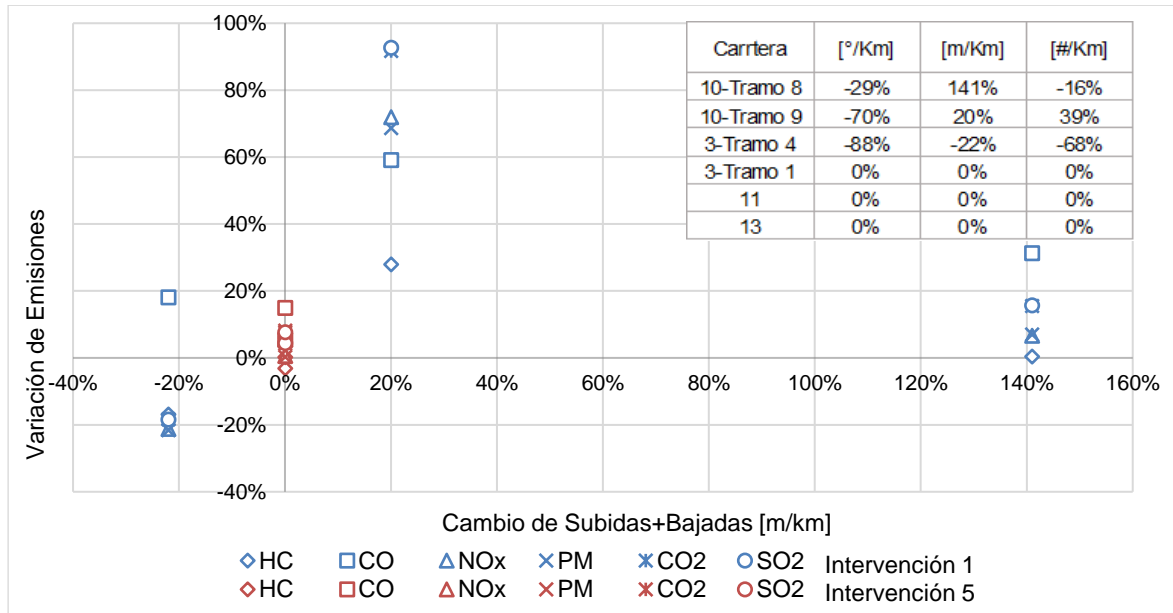
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la **Tabla 4-3** en las carreteras de la intervención 5 no se presentan cambios en la curvatura ya que la nueva calzada tiene las mismas especificaciones.

A continuación, se presenta la **Figura 4-7** en la que se observan las variaciones de las emisiones totales, es decir la suma por contaminante de lo que aporta cada tipo de

vehículo, según los cambios en las subidas+bajadas en m/km para cada carretera con las intervenciones antes mencionadas.

Figura 4-7: Variación de las emisiones en las intervenciones 1 y 5.



Fuente: elaboración propia

Como se observa en la **Figura 4-7** para cada intervención se tiene un color y para cada contaminante una forma asociada

De manera general se observa que en todas las carreteras las emisiones de CO aumentan, en menor proporción en aquellos que son de la intervención 5 donde se presenta un incremento del 5% y 15%; en esta intervención se tienen pequeños cambios en las emisiones, las cuales no superaron el 8% a excepción del CO.

Para la intervención 1 cuando se presenta un aumento del 141% en las subidas+bajadas en m/km (de ahora en adelante S+B [m/km]) y una disminución del 16% en las subidas+bajadas en #/km y 29% en la curvatura (de ahora en adelante S+B [#km]), las emisiones presentan las mayores variaciones, todas estas aumentan. Con un aumento de 20% y 39% en las S+B [m/km] y las S+B [#km] y una disminución del 70% de la curvatura todas emisiones incrementan, aunque en menor proporción que en la carretera 10-tramo 8; a excepción de los HC donde no se presenta variación. Y finalmente en la carretera 3-tramo 4, donde disminuyen en un 88%, 22% y 68% la curvatura, las S+B [m/km] y las S+B

[#/km] respectivamente todas las emisiones, a excepción del CO, disminuyen en una proporción similar; entre el 18% y 22%.

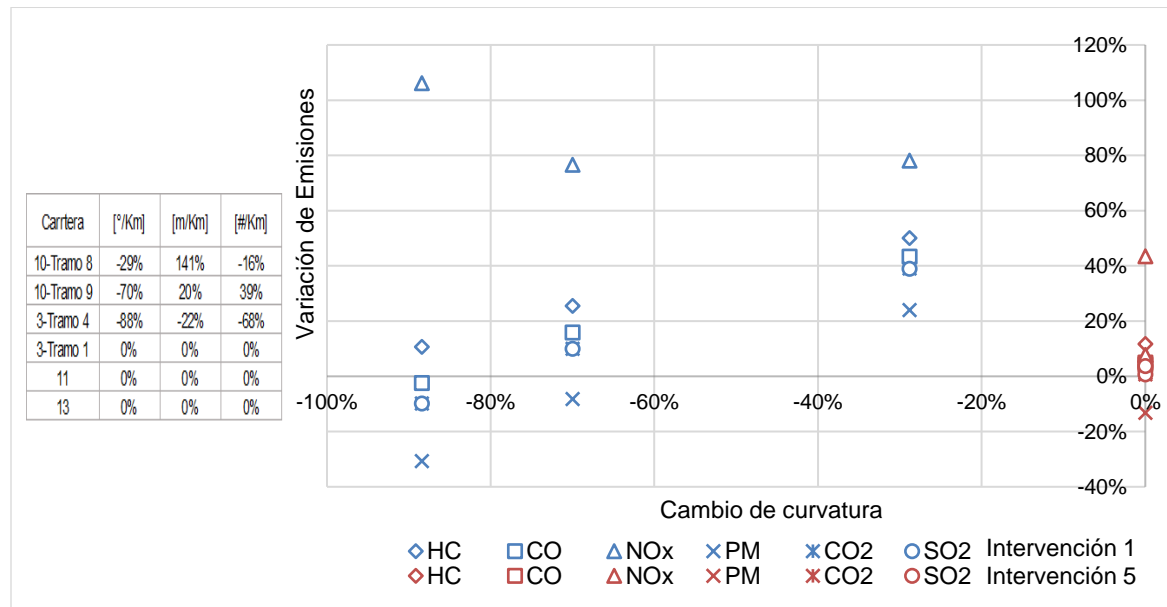
Se puede concluir de la **Figura 4-7** que en general sin importar el tipo de intervención las emisiones de CO aumentan para todos los carreteras, al construir una nueva calzada con las mismas especificaciones de la existente se tienen menores aumentos en las emisiones que al hacer una calzada con nuevas especificaciones a excepción de que estas mejoras disminuyan todos los parámetros geométricos que se estudian, en este caso se presentan menores emisiones.

En la **Figura 4-8** y **Figura 4-9** se presentan las variaciones de las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C3-C4 (para las demás categorías ver **Anexo D**) para cada carretera identificada con las intervenciones 1 y 5.

▪ **Autos Livianos**

En la **Figura 4-8** se observa la variación de las emisiones estimadas para un solo auto liviano cuando se presentan las intervenciones 1 y 5, junto a la figura se presenta una tabla donde se muestra cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que esta asociado.

Figura 4-8: Variación de las emisiones en autos livianos para las intervenciones 1 y 5.



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la **Figura 4-8** que para la intervención 5 los datos se superponen ocasionando que no se identifiquen con claridad las variaciones que se presentan en las 3 carreteras de dicha intervención, esto se debe a que la mayoría de las emisiones presentan variaciones entre el 0% y el 8% (donde está la superposición de los datos).

En todas las carreteras con las dos intervenciones graficadas las emisiones de HC y NOx aumentan; para la intervención 5 las emisiones en general aumentan levemente y en la intervención 1 cuando la curvatura disminuye, pero las subidas+bajadas aumentan las emisiones de manera general aumentan y cuando los tres parámetros disminuyen las emisiones se reducen a excepción del NOx y los HC, como se mencionó antes, los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-4**.

Tabla 4-4: Resultados para autos livianos en las intervenciones 1 y 5.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
10-Tramo 8	-29%	141%	-16%	Todas las emisiones aumentan, presentado una mayor variación las emisiones de NOx con el 78% seguidas de los HC con el 50%. Las emisiones de CO y PM incrementan 43% y 24% respectivamente y las emisiones CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 39%.
10-Tramo 9	-70%	20%	39%	Todas las emisiones aumentan a excepción del PM, el cual disminuye 8%. Las de mayor incremento son las emisiones de NOx con 77%; el CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 10% y las emisiones de HC y CO incrementan 26% y 16% respectivamente.
3-Tramo 4	-88%	-22%	-68%	La mayoría de las emisiones disminuyen, el CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 10%; el PM y el CO se reducen el 31% y 2% respectivamente. Las emisiones de NOx y HC aumentan en 106% y 11% respectivamente.
3-Tramo 1	0%	0%	0%	Se presenta un incremento en todas las emisiones, a excepción del PM que se reduce el 13%, el CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 1%. Los HC y el CO aumentan el 12% y 5% respectivamente y el NOx presenta el mayor incremento con 43%.
11	0%	0%	0%	Se presenta un aumento en todas las emisiones, aunque este no es tan elevado, el mayor incremento es del 8% en los NOx; el CO, CO ₂ y SO ₂ aumentan tan sólo el 1% y los HC el 5%
13	0%	0%	0%	No se presentan variaciones en ninguna emisión.

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir según la información en la **Tabla 4-4** y la **Figura 4-8** que las emisiones de NOx y HC de un auto liviano son las más sensibles al aumentar el número de carriles

ya que son los que mayores incrementos presentan en comparación con los demás contaminantes y en todos los casos se presentan aumentos, esto puede estar asociado al incremento de la velocidad cuando se construye una segunda calzada teniendo en cuenta que estos tipos de emisiones son directamente proporcionales a la velocidad.

Al conservar las características de la calzada existente las emisiones aumentan, debido al aumento de la velocidad que se presenta, pero levemente, entre un 1% y 12%, a excepción de la carretera 3-tramo4 donde se presenta un aumento significativo del NOx y una disminución del PM.

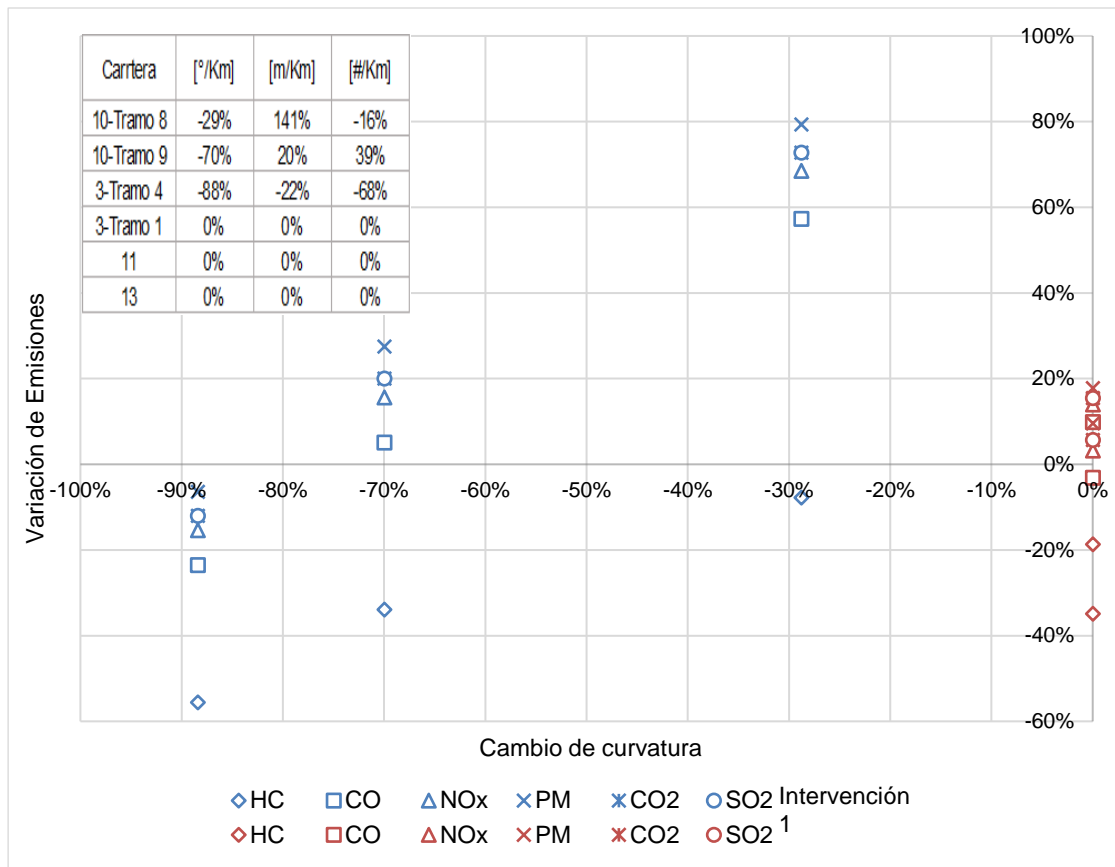
Cuando se hacen cambios en la calzada nueva (con respecto a la existente) y estos cambios a pesar de que disminuyen la curvatura y número de veces que el auto liviano sube y baja en la carretera, pero hay un aumento significativo de las S+B [# /km] (carretera 10-tramo 8) se presentan los mayores incrementos de las emisiones, esto se puede deber a que el incremento de este factor está asociado a la pendiente y como se encontró en la revisión bibliográfica aumentos en la pendiente requieren de una mayor potencia requerida por el motor y por ende mayor consumo del combustible y mayores emisiones; cuando estos cambios tienen una disminución importante de la curvatura (70%) pero las otras dos variables aumentan (carretera 10-tramo 9) las emisiones siguen incrementando, a excepción del PM.

Solo se presentan disminuciones en las emisiones (a excepción de los HC y el NOx que como se dijo anteriormente en todos los casos aumentan) cuando todas las características geométricas disminuyen (carretera 3-tramo 4).

- **Camiones tipo C3-C4**

En la **Figura 4-9** se presenta la variación de las emisiones estimadas para un sólo camión tipo C3-C4 cuando se presentan intervenciones tipo 1 y 5, junto a la figura se presenta una tabla donde se muestra cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que está asociada.

Figura 4-9: Variación de las emisiones en camiones C3-C4 para las intervenciones 1 y 5.



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en los autos livianos en la intervención 5 se presenta una superposición de los datos haciendo que no se identifiquen con claridad las variaciones que se tienen en las 3 carreteras con dicha intervención, como se puede observar en la **Figura 4-9**. Esto se debe a que todas las emisiones se sitúan en el eje Y, ya que no hay variaciones en la geometría, y la mayoría de las emisiones presentan variaciones entre el 0% y el 20% (donde está la superposición de los datos).

En la **Figura 4-9** también se aprecia, al igual que en los autos livianos, en la intervención 5 la mayoría de las emisiones aumentaron y para la intervención 1 sólo se presentan disminuciones en las emisiones cuando los tres parámetros geométricos disminuyeron; en todas las carreteras presentadas las emisiones de HC disminuyeron, los resultados obtenidos se presentan a detalle en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Resultados para camiones tipo C3-C4 en las intervenciones 1 y 5.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
10-Tramo 8	-29%	141%	-16%	En este caso se presentan los mayores incrementos en las emisiones y la menor disminución de los HC (8%). Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 73%, el CO y los NOx incrementan el 57% y 69% respectivamente y el aumento mayor lo tiene el PM con el 79%.
10-Tramo 9	-70%	20%	39%	Las emisiones de HC son las que mayor variación, presentan una reducción del 34% de sus emisiones. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento con un aumento del 20% y las emisiones de CO, NOx y PM se incrementan en 5%, 16% y 27% respectivamente.
3-Tramo 4	-88%	-22%	-68%	Todas las emisiones disminuyen. Las emisiones de mayor variación son los HC con el 56% y las de menos variación el PM con el 6%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una disminución del 12% y el CO y NOx el 23% y 15% respectivamente.
3-Tramo 1	0%	0%	0%	Las emisiones de HC presentan la mayor variación, con una reducción del 35%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 6%, el PM y NOx se incrementan 10% y 3% respectivamente y el CO disminuye 3%.
11	0%	0%	0%	Todas las emisiones aumentan, a excepción de los HC que disminuye 19%. Las emisiones de CO, NOx y PM aumentan 10%, 14% y 18% y el CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo incremento del 15%.
13	0%	0%	0%	No se presentan variaciones en ninguna emisión.

Fuente: Elaboración propia

De la **Tabla 4-5** y la **Figura 4-9** se puede concluir de forma general las emisiones de HC son las únicas que presentaron el mismo comportamiento disminuyendo en todas las carreteras, como se menciona anteriormente, así mismo en la mayoría de los casos es la que mayor variación presenta en todo el grupo de emisiones, a excepción de la carretera 10-tramo 8 donde la mayor variación la tiene el PM.

También se puede concluir que al construir una calzada nueva con las mismas especificaciones de la existente (intervención 5) las emisiones de los camiones tipo C3-C4 para un solo camión, al igual que en los autos livianos, aumentaron hasta en un 18%, a excepción de las emisiones de HC y en la carretera 10-tramo 8 también se presenta una disminución del CO.

Con la construcción de una nueva calzada con especificaciones diferentes las emisiones aumentan en gran proporción (hasta el 73%) cuando se tiene un aumento significativo en

las S+B [# /km] (141%) a pesar de que los demás parámetros disminuyen como en la carretera 10-tramo 8. Cuando la curvatura disminuye significativamente, pero los demás parámetros aumentan (carretera 10-tramo 9) las emisiones también se incrementan, pero en menor proporción que en la carretera 10-tramo 8. En el único caso donde todas las emisiones para un camión tipo C3-C4 disminuye sus emisiones al hacer una segunda calzada es en aquel en el que todos los parámetros disminuyeron (carretera 3-tramo 4).

4.2.2 Intervenciones 2 y 4

En estos tipos de intervención se realiza mejoramiento de la calzada existente, pero no se construye una nueva calzada. En la intervención 2 se realiza rectificación de curvas y mejoras en el perfil vertical y con este tipo de intervención se identifican 11 carreteras; y en la intervención 4 se realiza la pavimentación de la carretera y se encuentran 2 vías.

Como en las intervenciones anteriores cada carretera representa diferentes cambios, ya que en algunas carreteras puede disminuir la curvatura, pero aumentar las subidas+bajadas. Se muestra una gráfica con la variación de las emisiones para autos livianos y camiones tipo C5 (para los resultados de las demás categorías vehiculares ver **Anexo D**), que estarán asociadas a los cambios de curvatura, pero estos están asociadas a los demás cambios geométricos, como se mencionó anteriormente.

Los cambios de las características geométricas de la carretera (estos cambios son con respecto a la carretera en su condición inicial, o sea sin intervención) se presentan en porcentaje, un porcentaje positivo significa un aumento y por el contrario un porcentaje negativo una disminución, lo mismo aplica para las emisiones.

La **Tabla 4-6** presenta cada cambio de curvatura a qué demás cambios geométricos están asociados.

Tabla 4-6: Variaciones en la geometría vial para las Intervenciones 2 y 4.

Carretera	Intervención	[°/km]	[m/km]	[/km]
2-UF3	2	13%	6%	-1%
2-UF2	2	0,15%	8%	-3%
2-UF4	2	-1%	1%	-5%
7-Tramo 5	2	-7%	61%	65%
7-Tramo 3.2	2	-8%	1%	272%
7-Tramo 6	2	-10%	1%	122%
9-UF2	2	-17%	0%	-4%
8	2	-21%	-3%	-30%
9-UF1	2	-21%	-4%	-23%
1-UF1	2	-56%	-46%	-37%
1-UF3	2	-73%	14%	22%
4	4	0%	0%	0%
12	4	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la **Tabla 4-6** en las carreteras con la intervención 4 no se presentan cambios en los parámetros geométricos ya que la calzada existente no presenta cambios en su trazado, sólo se realiza pavimentación; las características geométricas se presentan en la **Tabla 4-7**.

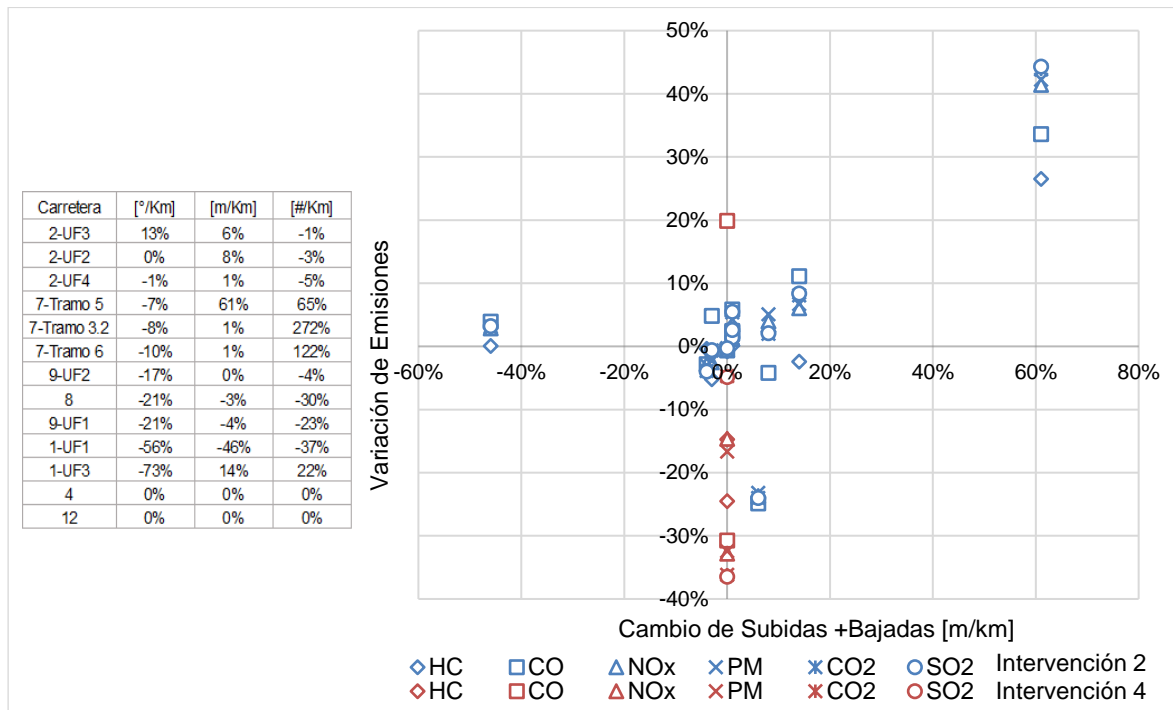
Tabla 4-7: Características geométricas carreteras con intervención 4.

Carretera	Curvatura	Subidas y Bajadas [m/km]	Número de Subidas y Bajadas [#/km]
4	21,06	4,51	2,09
12	28,41	5,13	3,06

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-10** se observan las variaciones de las emisiones, es decir la suma por contaminante de lo que aporta cada tipo de vehículo, según los cambios en las subidas+bajadas en m/km para cada carretera con el tipo de intervención 2 y 4.

Figura 4-10: Variación de las emisiones en la intervención 2 y 4.



Fuente: Elaboración propia

Para la carretera 2-UF3 todas las emisiones estimadas disminuyen entre un 23% y 25%, en la carretera 2-UF2, donde hay un aumento en las S+B [#km], las emisiones aumentan entre el 2% y 5% a excepción del CO que disminuye el 4% y un comportamiento similar se presenta en la carretera 2-UF4 donde las emisiones aumentan entre el 3% y 6% a excepción del HC donde no se presentó ningún cambio.

En la carretera 7-tramo 5 aumentan todas las emisiones, los HC y CO el 27% y 34% respectivamente y las demás entre el 41% y 44% y en la carretera 7-tramo 3.2 las todas emisiones aumentaron en 1% al igual que en la carretera 7-tramo 6 donde se tienen incrementos entre el 1% y 3%.

En las carreteras 8, 9-UF1 y 1-UF1 tampoco se presentan cambios significativos, en la carretera 8 las emisiones de HC, CO, NOx y PM disminuyen en un 1% y las emisiones de CO₂ y SO₂ no tienen variaciones y en la carretera 1-UF1 las emisiones de HC tampoco presentan cambios, el CO aumenta el 4% y las demás emisiones aumentan 3%.

En la carretera 1-UF3 las emisiones de HC son las únicas que disminuyen, pero no significativamente, solo el 2%, las emisiones de CO, NOx y PM aumentan un 11%, 6% y 7% respectivamente y las emisiones CO₂ y SO₂ se incrementan el 8%.

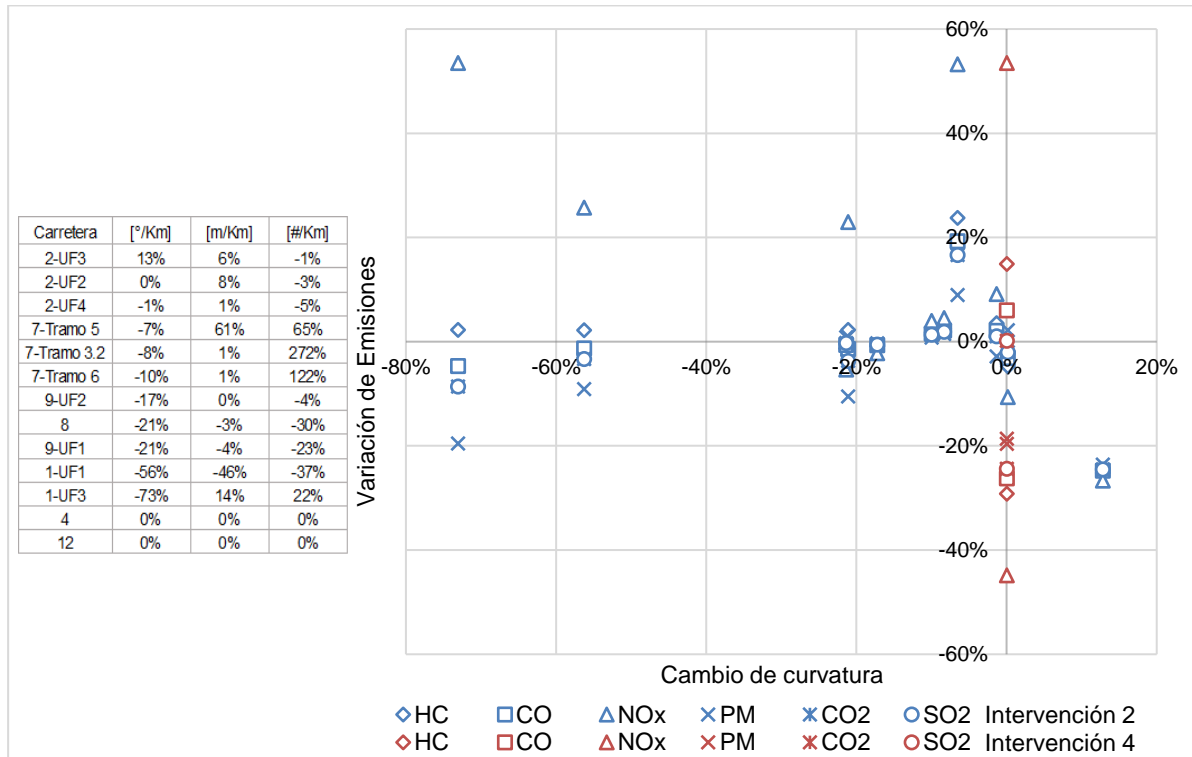
En las carreteras 4 y 12, donde se pavimenta la calzada existente, todas las emisiones disminuyen a excepción del CO en la carretera 4 donde presenta un incremento del 20%; en esta misma carretera las emisiones de HC y NOx y las emisiones de CO₂ y SO₂ tienen el mismo comportamiento con una disminución del 15% y 5% respectivamente y las emisiones de NOx y PM se reducen el 15% y 17% respectivamente. En la carretera 12 todas las emisiones presentan una disminución similar (entre el 31% y 36%) a excepción de los HC que se reduce el 24%.

En la **Figura 4-11** y la **Figura 4-12** se presentan las variaciones de las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C5 (para las demás categorías ver Anexo D) para cada carretera identificada con las intervenciones 2 y 4.

- **Autos Livianos**

En la **Figura 4-11** se presenta la variación de las emisiones estimadas para un solo auto liviano cuando se presentan las intervenciones 2 y 4, junto a la figura se presenta una tabla donde se muestra cada cambio de curvatura a qué demás cambios geométricos están asociados.

Figura 4-11: Variación de las emisiones en autos livianos para las intervenciones 2 y 4.



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la **Figura 4-11** que de manera general en la intervención 2 para aumentos en la curvatura y las subidas+bajadas las emisiones disminuyen (carretera 2-UF3 y 2UF2), este caso en particular se debe a que esta carretera en condiciones iniciales tenía velocidades muy altas donde los consumos de combustible y por ende las emisiones son altos y con las modificaciones realizadas la velocidad se disminuye llevándola a los rangos donde hay menos consumo de combustible. Cuando la curvatura disminuye, pero las subidas+bajadas aumentan las emisiones de manera general aumentan y cuando los tres parámetros disminuyeron las emisiones se reducen a excepción del NOx y los HC.

En la intervención 4 las emisiones en autos livianos presentan diferente comportamiento, en la carretera 4 aumentan y en la 12 disminuyen; a excepción de las emisiones de PM que en las dos carreteras disminuye, este comportamiento no tendencial en las carreteras que se pavimentan se debe a las características propias de cada carretera y a las velocidades que se obtienen luego de la pavimentación. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-8**.

Tabla 4-8: Resultados para autos livianos en las intervenciones 2 y 4.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
2-UF3	13%	6%	-1%	Las emisiones se comportaron entre si de manera similar, disminuyendo entre un 24% y 27%.
2-UF2	0,15%	8%	-3%	En general todas las emisiones disminuyen. Las emisiones de HC, CO y NOx presentan una disminución del 5%, 3% y 11%, las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento disminuyendo el 2% y las emisiones de PM se incrementa el 2%.
2-UF4	-1%	1%	-5%	Se presenta un aumento en la mayoría de las emisiones, a excepción del PM que disminuye el 3%, el CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento aumentando el 1% y las emisiones de HC, CO y NOx aumentan un 4%, 2% y 9% respectivamente.
7-Tramo 5	-7%	61%	65%	Todas las emisiones aumentan, presentado el mayor crecimiento los NOx con un 53%, el CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento aumentando el 17%, y las emisiones de HC, CO y PM incrementan el 24%, 19% y 9%.
7-Tramo 3.2	-8%	1%	272%	Las emisiones de HC, CO, CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento aumentando el 2% cada una, el PM y los NOx se incrementan el 1% y 5 % respectivamente.
7-Tramo 6	-10%	1%	122%	Las emisiones no presentan cambios significativos, las emisiones de PM, CO ₂ y SO ₂ aumentan el 1%, los HC y el CO aumentan 2% cada uno y los NOx tienen el mayor cambio con un aumento del 4%.
9-UF2	-17%	-0,5%	-4%	Las emisiones no presentan cambios significativos, todas disminuyen entre un 1% y 2% a excepción del PM que aumenta ligeramente, sólo un 0,33%.
8	-21%	-3%	-30%	La mayoría de las emisiones disminuyen a excepción de los HC y los NOx que aumentan el 2% y 23% respectivamente. Las emisiones de CO y PM se reducen el 1% y 10% respectivamente y las emisiones CO ₂ y SO ₂ presenta el mismo comportamiento disminuyendo el 4%.
9-UF1	-21%	-4%	-23%	Todas las emisiones disminuyen, a excepción del PM que aumenta ligeramente el 1%. Las emisiones de HC y CO disminuyen el 1% y el CO ₂ y SO ₂ un ligero 0,3%. La mayor disminución la presentan los NOx con un 5%.
1-UF1	-56%	-46%	-37%	Se presenta una disminución del 3% para las emisiones de CO ₂ y SO ₂ , el PM y el CO disminuyen un 9% y 1% respectivamente y los HC y NOx aumentan en un 2% y 26% respectivamente.
1-UF3	-73%	14%	22%	Las emisiones de NOx presentan el mayor cambio con un 53% de aumento, los HC también aumentan, pero sólo un 2%, las demás emisiones disminuyen en un 5%, 20% y 9% para CO, PM y CO ₂ y SO ₂ (las cuales presentan el mismo comportamiento).
4	0%	0%	0%	Las emisiones con mayor variación son los NOx con un incremento del 53%, las emisiones de HC y CO aumentan el 15% y 6% respectivamente, el CO disminuye 20% y las emisiones de CO ₂ y SO ₂ no presentan cambios.
12	0%	0%	0%	Todas las emisiones disminuyen. El CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 24%; las emisiones de HC, CO y PM disminuyen 29%, 26% y 19% respectivamente y las emisiones de NOx son las que más disminuyen con un 45%.

Fuente: elaboración propia

De forma general se puede concluir que las emisiones de NOx de los livianos son las más sensibles cuando se presentan mejoras en la carreteras sin aumentar el número de carriles, ya que como se observa en la **Figura 4-11** para cada una de las carreteras es la que mayor variación presenta a comparación de las demás emisiones, esto puede estar asociado a los aumentos de la velocidad, ya que este tipo de emisiones en los autos livianos es más sensible a las variaciones de las velocidades.

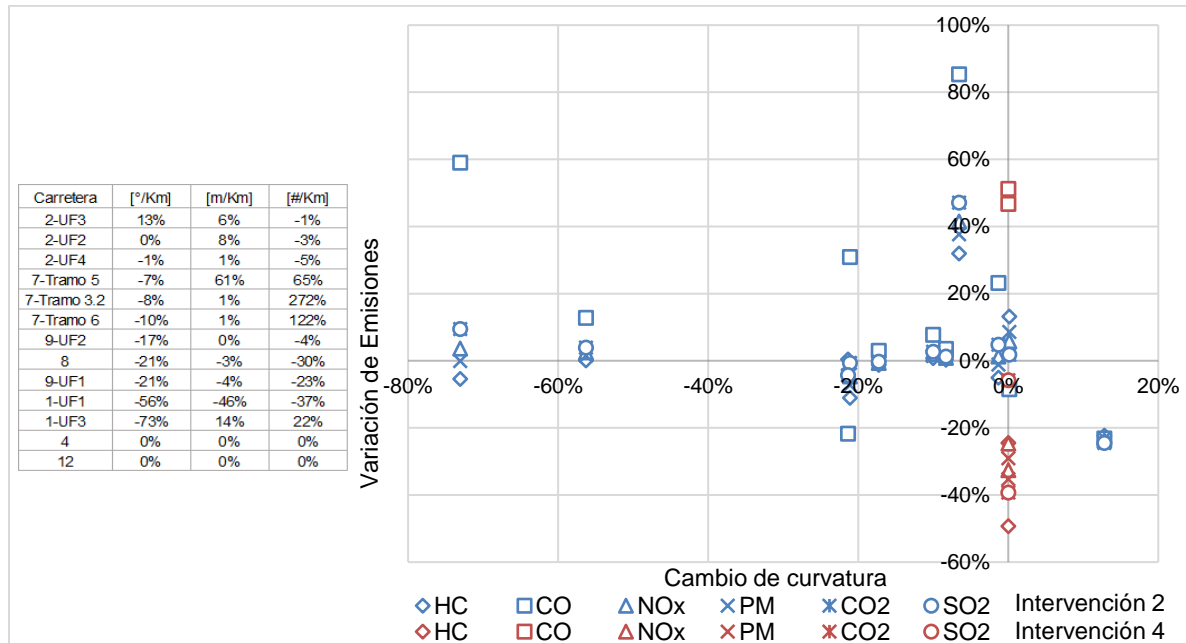
También se puede concluir que en los autos livianos cuando hay una disminución de la curvatura las emisiones de HC aumentan o disminuyen muy levemente (1%) y cuando la curvatura aumenta estas disminuyen. En la intervención 2 para los autos livianos se encuentran 6 formas en las que las emisiones varían, las cuales dependen de los cambios de la geometría de la carretera y las variaciones de las emisiones. A continuación, se presenta una conclusión general para cada cambio identificado:

- 1^a. Cuando la curvatura y las S+B [m/km] aumentan ligeramente y las S+B [#km] disminuye (Carreteras 2-UF3 y 2-UF2) las emisiones disminuyen, en mayor proporción en la carretera 2-UF3 donde se presenta un incremento menor de las S+B [#km].
- 2^a. Cuando disminuye levemente la curvatura y las S+B [#km] y hay un leve incremento del valor de las S+B [m/km] (1%) las emisiones no superan un aumento del 4%, a excepción de los NOx con el 9% (Carretera 2-UF4).
- 3^a. Cuando se presenta una disminución leve de la curvatura, un incremento del valor de las S+B [m/km] leve (1%) y un gran aumento del número de subidas y bajadas (más del 100%) las emisiones no aumentan más del 2%, a excepción de los NOx con el 5% (a esta forma de comportamiento corresponde las Carreteras 7-tramo 3.2 y 7-tramo 6).
- 4^a. Cuando se tiene una disminución leve de la curvatura, pero un aumento significativo en el valor de las S+B [m/km] (61%) las emisiones aumentan en gran proporción, en especial el NOx (Carretera 7-tramo 5).
- 5^a. Cuando todos los parámetros disminuyen en las carreteras 9-UF1 y 9-UF2 hay una reducción leve de todas las emisiones y las carreteras 8 y 1-UF1 las emisiones de HC y NOx aumentan y las demás disminuyen, el cambio más significativo por el que se puede presentar esta diferencia es la disminución de las S+B [#km], en la carretera 9-UF2 y 9-UF1 disminuyen menos del 25% y en la carretera 8 y 1-UF1 es superior al 25%.
- 6^a. Cuando solo disminuye la curvatura y los demás parámetros aumentan las emisiones HC y NOx aumentan y las demás disminuyen (Carretera 1-UF3).

▪ **Camiones tipo C5**

En la **Figura 4-12** se presenta la variación de las emisiones estimadas para un solo camión C5 cuando se presentan las intervenciones 2 y 4, junto a la figura se presenta una tabla donde se muestra cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que está asociada.

Figura 4-12: Variación de las emisiones en camiones C5 para las intervenciones 2 y 4.



Fuente: elaboración propia

En la **Figura 4-12** se puede apreciar que en la intervención 2 para los camiones C5 no se tiene un comportamiento general en la variación de las emisiones y todas las emisiones se comportan de manera diferente dependiendo de la carretera, aunque se observa que en todas el CO presenta el mayor cambio con respecto a las demás emisiones y también se observa que donde se presenta un incremento en la curvatura las emisiones aumentan en una proporción similar. En la intervención 4 si se puede observar que de manera general todas las emisiones disminuyen a excepción del CO que en las dos carreteras con esta intervención aumentó en una proporción parecida. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-9**.

Tabla 4-9: Resultados para camiones C5 en las intervenciones 2 y 4.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
2-UF3	13%	6%	-1%	Las emisiones se comportaron de manera similar entre si, disminuyendo entre un 22% y 24%.
2-UF2	0,15%	8%	-3%	La mayoría de las emisiones aumentan, solo se presenta una disminución del 8% en el CO. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 2% y los HC, NOx y PM se incrementan el 13%, 6% y 9% respectivamente.
2-UF4	-1%	1%	-5%	No se presentan grandes variaciones en esta carretera, el único contaminante que tiene un cambio significativo es el CO con un incremento del 23%. Las emisiones de HC y PM disminuyen el 5% y 1% respectivamente y los NOx aumentan el 1%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 5%
7-Tramo 5	-7%	61%	65%	En esta carretera se presentan las variaciones más grandes y todas las emisiones aumentan. El CO tiene el mayor incremento con el 85%, seguido de las emisiones de Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ que presentan el mismo comportamiento con un aumento del 47%. Las emisiones de NOx, PM y HC tiene un aumento en sus emisiones del 41%, 38% y 32% respectivamente.
7-Tramo 3.2	-8%	1%	272%	En esta carretera no se presentan cambios significativos. Los HC no tienen variaciones, el CO aumenta el 4% y los demás contaminantes aumentan el 1%.
7-Tramo 6	-10%	1%	122%	Todas las emisiones aumentan. Las emisiones de NOx y PM y las de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 2% y 3% respectivamente. El CO presenta el mayor incremento para esta carretera con el 8% y las emisiones de HC aumentan el 1%.
9-UF2	-17%	-0,5%	-4%	En esta carretera no se presentan cambios significativos. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ no tienen variaciones, el CO aumenta el 3% y los demás contaminantes disminuyen el 1%.
8	-21%	-3%	-30%	Todas las emisiones disminuyen, a excepción del CO que aumenta el 31%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 1% y las emisiones de HC, NOx y PM disminuyen el 11%, 5% y 7% respectivamente.
9-UF1	-21%	-4%	-23%	Las emisiones de HC no presenta cambios y las demás disminuyen. El CO tiene el mayor cambio con una reducción del 22% y las emisiones de NOx y PM el menor cambio con una disminución del 2% y 1%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 4%.
1-UF1	-56%	-46%	-37%	Las emisiones de HC no presenta cambios y las demás aumentan. El CO tiene el mayor cambio con un incremento del 13% y las emisiones de NOx y PM el menor cambio con un aumento del 3% y 2%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento creciendo el 4%.
1-UF3	-73%	14%	22%	Las emisiones de PM no presentan cambios y los HC disminuyen el 5%, las demás emisiones aumentan presentando el mayor incremento el CO con el 59% y el menor el NOx con el 4%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento incrementando el 10%.
4	0%	0%	0%	Todas las emisiones disminuyen a excepción del CO que incrementa sus emisiones el 51%. Las emisiones de HC son las que más se reducen con el 49% seguidas de las emisiones de PM y NOx con el 35% y 25% respectivamente. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento incrementando el 10%.
12	0%	0%	0%	Todas las emisiones disminuyen a excepción del CO que incrementa sus emisiones el 47%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ son las que más se reducen y presentan el mismo comportamiento con el 39%. Las emisiones de HC, NOx y PM disminuyen el 24%, 33% y 29% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

De forma general se puede concluir que las emisiones de CO₂ y SO₂ presentan las mismas variaciones y que las emisiones de CO de los camiones C5 son las más sensibles cuando se presentan mejoras en la carretera sin aumentar el número de carriles, ya que como se observa en la **Figura 4-12** para cada una de las carreteras es la que mayor variación presenta a comparación de las demás emisiones como se había mencionado anteriormente. También se puede concluir que hay 3 carreteras (7-tramo 3.2, 7-tramo 6 y 9-UF2) donde las emisiones no presentan mayores variaciones y por esto están muy cercanas al eje X.

En la intervención 2 para los camiones C5 se encuentran 6 formas en las que las emisiones varían, las cuales dependen de los cambios de la geometría de la carretera y las variaciones de las emisiones. A continuación, se presenta una conclusión general para cada cambio identificado:

1^a. Cuando la curvatura y las S+B [m/km] aumentan y las S+B [#km] disminuyen levemente (carretera 2-UF3) las emisiones disminuyen.

2^a. Cuando no se presentan cambios en la curvatura, las S+B [m/km] aumenta y las S+B [#km] disminuyen levemente (carretera 2-UF2) las emisiones en general aumentan, aunque no sobrepasan el 13%.

3^a. Cuando disminuye levemente la curvatura y las S+B [#km] y hay un incremento ligero en el valor de las S+B [m/km] (carretera 2-UF4) o hay una disminución grande en la curvatura y un aumento en las S+B [m/km] y las S+B [#km] (carretera 1-UF3), las emisiones de HC disminuyen, aumentan en gran proporción el CO y las demás emisiones aumentan, pero levemente (no superan el 10%).

4^a. Cuando se tiene una disminución leve de la curvatura, pero un aumento significativo en el valor de las S+B [m/km] (61%) las emisiones aumentan en gran proporción, en especial el CO (carretera 7-tramo 5).

5^a. Cuando se presenta una disminución leve de la curvatura, un incremento del valor de las S+B [m/km] leve (1%) y un gran aumento de las S+B [#km], más del 100% (carreteras 7-tramo 3.2 y 7 tramo 6) o se presenta la mayor reducción de los tres parámetros (carretera 1-UF1) todas las emisiones aumentan, pero muy levemente, en promedio sólo el 3%.

6^a. Cuando todos los parámetros disminuyen (pero no más de 25%) todas las emisiones disminuyen levemente, en promedio 3% o no presentan cambios y las emisiones de CO en general aumentan.

De la **Tabla 4-9** también se concluye que cuando se realiza una pavimentación los camiones C5 disminuyen sus emisiones a excepción del CO que en las dos carreteras aumento, contrario a lo ocurrido en los autos livianos, esto puede deberse a que en las dos carreteras las velocidades en este tipo de vehículos mejoran y se sitúan en el rango de velocidades donde el consumo de combustible es menor en comparación con las condiciones iniciales sin pavimentación.

4.2.3 Intervenciones 3 y 6

En estos tipos de intervención se realiza mejoramiento de la calzada existente y construcción de una nueva calzada. En la intervención 3 se realiza rectificación de curvas y mejoras en el perfil vertical y la construcción de una segunda calzada; con este tipo de intervención se identifican 2 carreteras y en la intervención 6 se realiza la construcción de una doble calzada en un nuevo trazado; con este tipo de intervención se encuentra 1 vía.

Como en las intervenciones anteriores cada carretera representa un caso particular, ya que en algunas carreteras puede disminuir la curvatura, pero aumentar las subidas+bajadas, luego se presenta una gráfica con la variación de las emisiones para autos livianos y camiones tipo C6 (para los resultados de las demás categorías vehiculares ver **Anexo D**), que estarán asociadas a los cambios de curvatura, pero estos están asociadas a los demás cambios geométricos, como se mencionó anteriormente.

Los cambios de las características geométricas de la carretera (estos cambios son con respecto a la carretera en su condición inicial, o sea sin intervención) se presentan en porcentaje, un porcentaje positivo significa un aumento y por el contrario un porcentaje negativo una disminución, lo mismo aplica para las emisiones. La **Tabla 4-10** presenta cada cambio de curvatura a que otros parámetros y su valor está asociada.

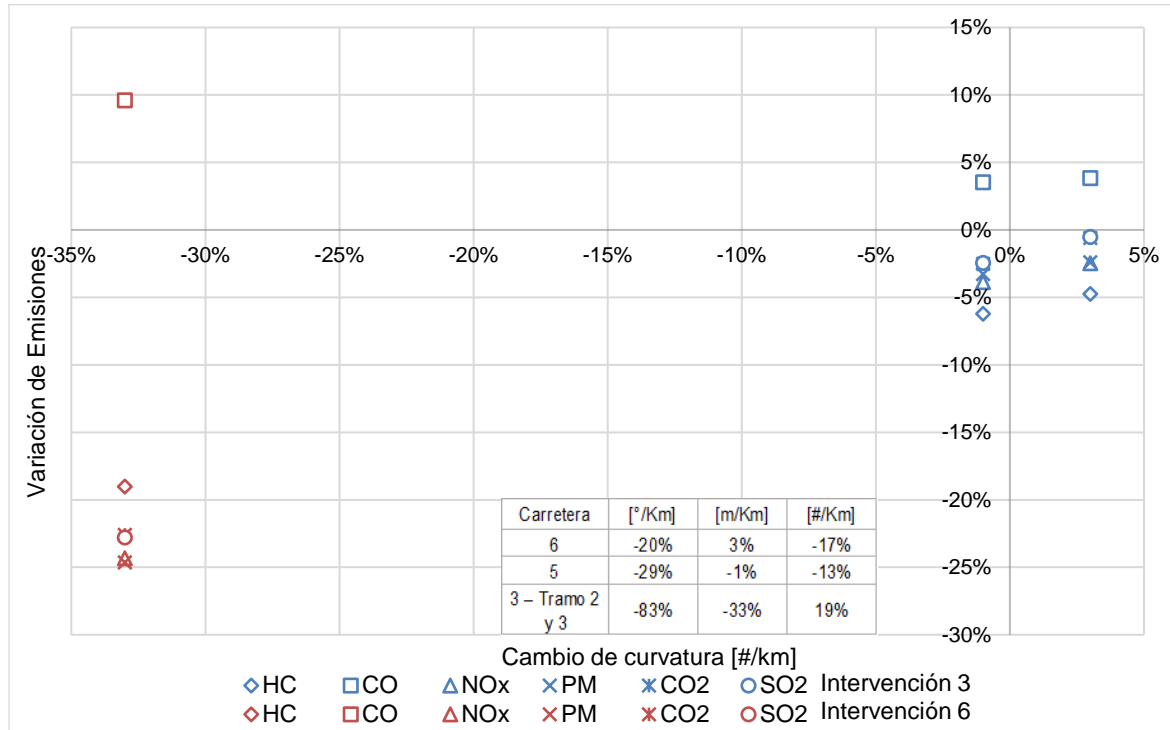
Tabla 4-10: Variaciones en la geometría vial para las Intervenciones 3 y 6.

Carretera	Intervención	[°/km]	[m/km]	[#/km]
6	3	-20%	3%	-17%
5	3	-29%	-1%	-13%
3 – Tramo 2 y 3	6	-83%	-33%	19%

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-13** se observan las variaciones de las emisiones, es decir la suma por contaminante de lo que aporta cada tipo de vehículo, según los de las subidas+bajadas en m/km para cada carretera con el tipo de intervención 3 y 6.

Figura 4-13: Variación de las emisiones en las intervenciones 3 y 6.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-13** se puede observar que todas las emisiones disminuyen a excepción del CO.

En la intervención 3 cuando aumenta el valor de las S+B [m/km] levemente (3%) y la curvatura y las S+B [# /km] el 20% y 17% respectivamente, las emisiones disminuyen entre el 1% y 5% en la carretera 3-tramo 2 y donde disminuyen los tres parámetros la variación no es muy diferente, las emisiones se reducen entre el 2% y 6%. Para las dos carreteras con la intervención 3 las emisiones de CO aumentan 4%. En la intervención 6, en donde la nueva carretera presenta una disminución en el valor de las S+B [m/km] del 33% y de la curvatura del 83% y un aumento del 19% las S+B [# /km], todas las emisiones disminuyen entre el 20% y 25%, a excepción del CO que aumenta el 10%. En las tres carreteras las emisiones de CO₂ y SO₂ tienen las mismas variaciones.

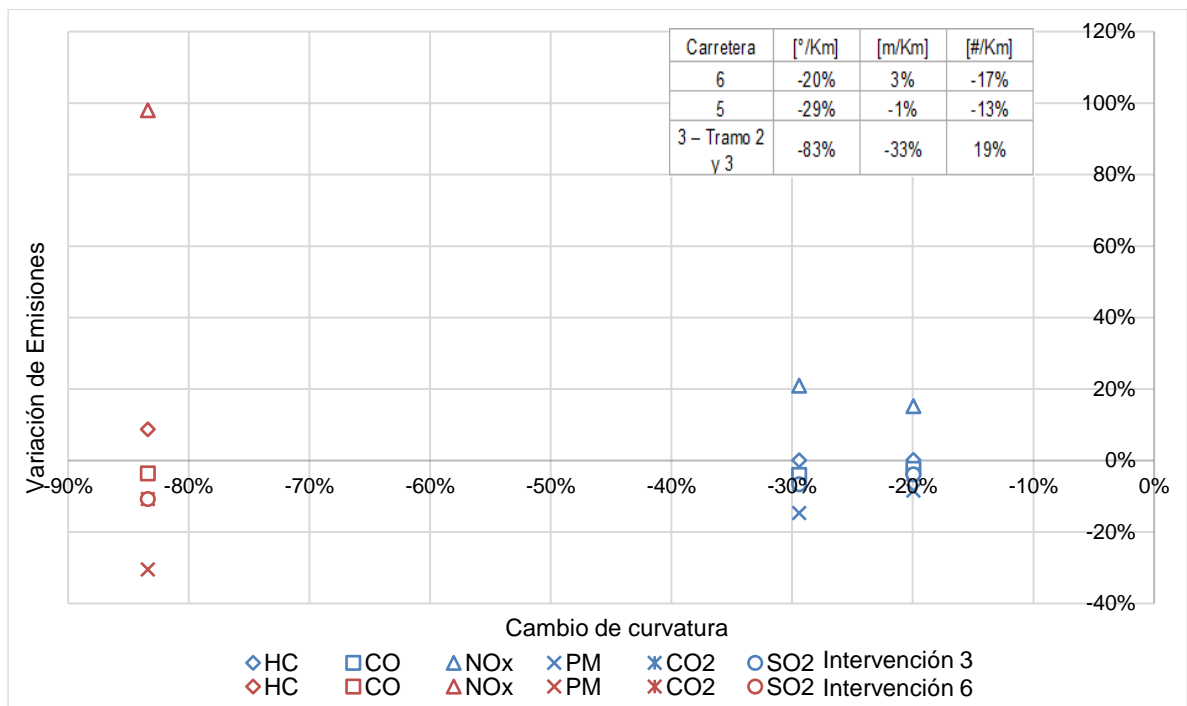
Se puede concluir de manera general que cuando se presenta una mejora en la geometría vial y la construcción de una segunda calzada las emisiones disminuyen y se presentan mayores reducciones cuando se disminuye significativamente la curvatura y las S+B [# /km].

En las siguientes figuras se presentan las variaciones de las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C6 (para las demás categorías ver **Anexo D**) para cada carretera identificada con la intervención 3 y 6.

▪ **Autos livianos**

En la **Figura 4-14** se presenta la variación de las emisiones estimadas para un solo auto liviano cuando se presentan las intervenciones 3 y 6, junto con la figura se presenta una tabla donde se muestra cada cambio de curvatura a qué demás cambios geométricos están asociados.

Figura 4-14: Variación de las emisiones en autos livianos para las intervenciones 3 y 6.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-14** se observa que en todas las carreteras las emisiones de NOx se incrementan y son las de mayor variación respecto a las demás emisiones. También se puede apreciar que en la intervención 3 las emisiones de HC para un auto liviano no presenta cambios y las demás disminuyen y en la intervención 6 las emisiones de HC y NOx aumentaron y las demás disminuyen. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-11**.

Tabla 4-11: Resultados para autos livianos en las intervenciones 3 y 6.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
6	-20%	3%	-17%	Las emisiones de HC no presentan cambios, los NOx aumentan el 15% y las demás emisiones disminuyen. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 4% y el PM y el CO disminuyen el 8% y 2% respectivamente.
5	-29%	-1%	-13%	Las emisiones de HC no presentan cambios, los NOx aumentan el 21% y las demás emisiones disminuyen. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 7% y el PM y el CO disminuyen el 15% y 4% respectivamente.
3 – Tramo 2 y 3	-83%	-33%	19%	Las emisiones de NOx y HC aumentan el 98% y 9% respectivamente. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 11% y el PM y el CO disminuyen el 31% y 4% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

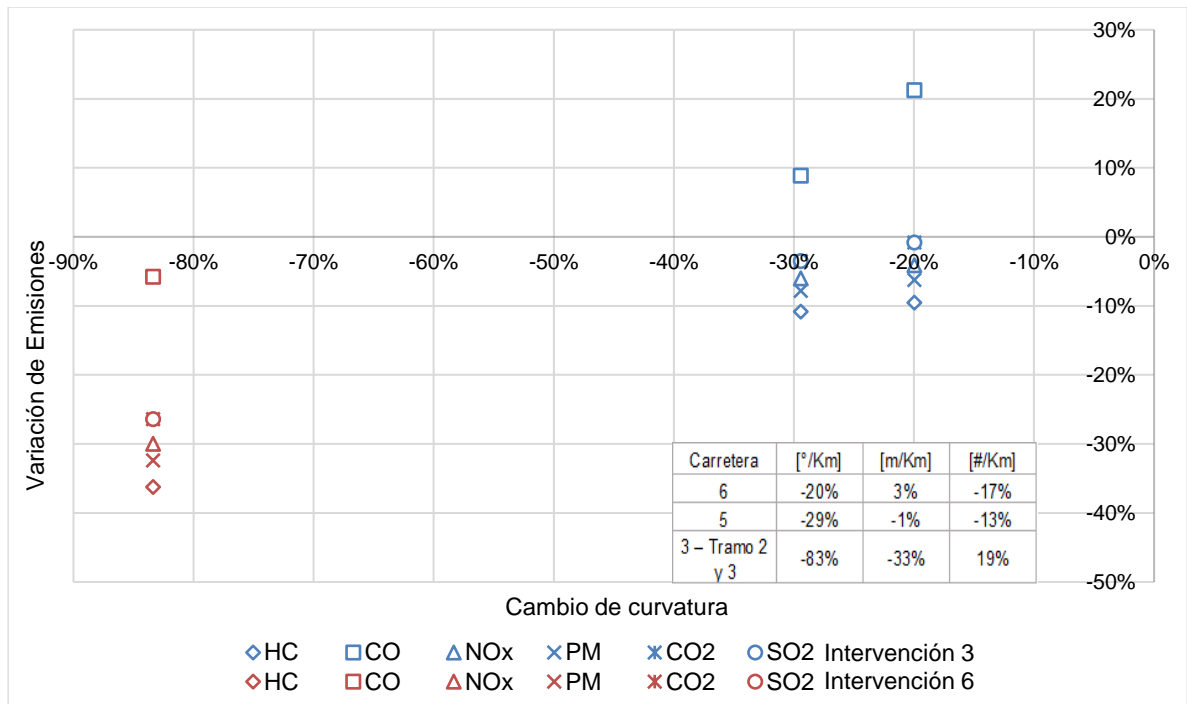
Se puede concluir según la información en la **Figura 4-14** y la **Tabla 4-11** que las emisiones de NOx y de un auto liviano son las más sensibles al mejorar la calzada existente y construir un nuevo carril ya que son los que mayores incrementos presentan en comparación con los demás contaminantes y en todas las carreteras se presentan aumentos.

También se puede concluir que de manera general para la intervención 3 las emisiones disminuyen al disminuir la curvatura y que al ser más grande la reducción en la curvatura mayor serán las reducciones en las emisiones; lo mismo sucede en la intervención 6 y posiblemente en esta se presentan variaciones mayores debido a la disminución significativa del valor de las S+B [m/km] (carretera 3-tramo 2 y 3) en comparación de las carreteras con la intervención 3 (carretera 5 y 6).

▪ **Camiones tipo C6**

En la **Figura 4-15** se presenta la variación de las emisiones estimadas para un solo camión C6 cuando se presentan las intervenciones 3 y 6, junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-15: Variación de las emisiones en camiones C6 para las intervenciones 3 y 6.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-15** se observa que para la intervención 6 todas las emisiones disminuyen y en la intervención 3 aumentan solo las emisiones de CO y las demás disminuyen. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-12**.

Tabla 4-12: Resultados para autos livianos en las intervenciones 3 y 6.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
6	-20%	3%	-17%	Las emisiones de CO aumentan el 21% y las demás emisiones disminuyen. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 1% y los HC, el PM y los NOx disminuyen el 10%, 6% y 4% respectivamente.
5	-29%	-1%	-13%	Las emisiones de CO aumentan el 9% y las demás emisiones disminuyen. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 4% y los HC, el PM y los NOx disminuyen el 11%, 8% y 6% respectivamente.
3 – Tramo 2 y 3	-83%	-33%	19%	Todas las emisiones disminuyen, pero el CO lo hace en menor proporción respecto a las demás, este se reduce el 8%. La mayor reducción la presentan las emisiones de HC con el 36%, las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 26% y las emisiones de PM y los NOx disminuyen el 32% y 30% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir según la información en la **Figura 4-15** y la **Tabla 4-12** que las emisiones de CO en la intervención 3 de un camión C6 son las más sensibles al mejorar la calzada existente presentándose aumentos en las emisiones, este comportamiento se explica con la relación que existe entre la curvatura y la cantidad de estas emisiones, en la revisión bibliográfica se encontró que el CO es inversamente proporcional a la curvatura, es decir a menor curvatura mayores son las emisiones y como se explica en el numeral **2.8.9** esto se debe a que la cantidad de CO emitida por un vehículo esta relacionada con la cantidad de RPM que tiene el vehículo, a mayor RPM menores emisiones.

Las demás emisiones tuvieron un comportamiento contrario, teniendo menores emisiones al reducir la curvatura y la relación de S+B [m/km], esto está asociado a que al reducir la curvatura se presentan menos variaciones en la velocidad y al tener una disminución de la relación las S+B [m/km] se requerirá menos potencia en estos vehículos y por ende menos emisiones.

4.3 Emisiones afectadas por el TPD circulante en las carreteras y por tipo de intervención

A continuación, se presentan las variaciones de las emisiones para todos los vehículos que circulan en cada carretera de estudio según sus estudios de tránsito y transporte y contaminante para cada intervención identificada.

Al igual que en las emisiones para un vehículo las intervenciones se agrupan en 3, uniendo aquellas que son similares entre sí, de la siguiente forma:

- Intervenciones 1 y 5
- Intervenciones 2 y 4
- Intervenciones 3 y 6

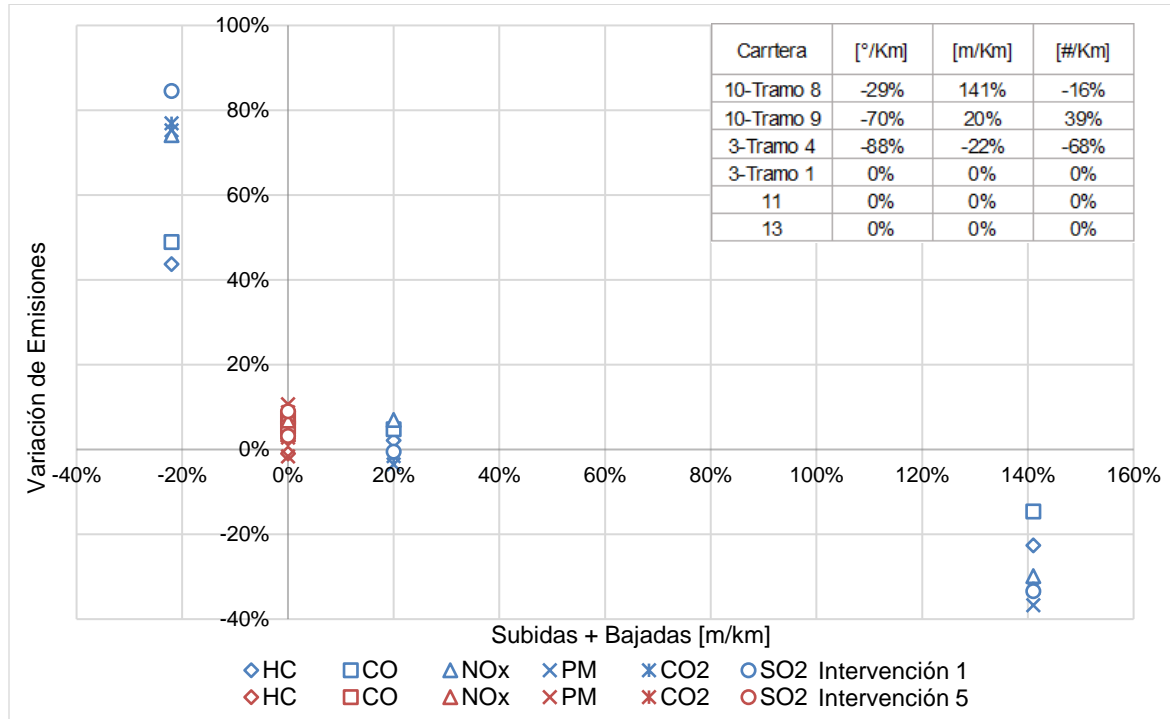
4.3.1 Intervenciones 1 y 5

Las gráficas que se presentaran a continuación relacionan la variación de las emisiones con los cambios de curvatura y a su vez estos están a otros cambios geométricos. Los cambios de las características geométricas (estos cambios son con respecto a la carretera en su condición inicial, o sea sin intervención) de la carretera se presentan en porcentaje, un porcentaje positivo significa un aumento y por el contrario un porcentaje negativo una disminución, lo mismo aplica para las emisiones. La **Tabla 4-3** presenta cada cambio de curvatura y los demás parámetros a los que está asociada para las carreteras con la intervención 1 y 5.

Se debe tener en cuenta que en la intervención no se presentan cambios en la geometría ya que la nueva calzada tiene las mismas especificaciones

A continuación, se presenta la **Figura 4-16** en la que se observan las variaciones de las emisiones totales (es decir la suma por contaminante de lo que aporta cada tipo de vehículo) según los cambios en las subidas+bajadas en m/km para cada carretera con las intervenciones antes mencionadas.

Figura 4-16: Variación de las emisiones en las intervenciones 1 y 5 considerando TPD.



Fuente: Elaboración propia

De manera general se observa en la **Figura 4-16** que para la intervención 5 no se presentan variaciones muy significativas y la mayoría de las emisiones disminuyen, para la intervención 1 en las 3 carreteras se presenta un comportamiento diferente en las emisiones.

Para la intervención 1 cuando se presenta un aumento del 141% en las S+B [m/km] y una disminución del 29% en la curvatura y 16% las S+B [#/km] las emisiones presentan las mayores variaciones, todas estas aumentan. Con un aumento de 20% y 39% en las S+B [m/km] y las S+B [#/km] respectivamente y una disminución del 70% de la curvatura se presenta una variación pequeña, las emisiones de HC, CO y NOx aumentan en el 2%, 5% y 7% respectivamente y las emisiones de PM, CO₂ y SO₂ disminuyen el 4%, 2% y 1% respectivamente. Y finalmente en la última carretera donde disminuyen en un 88%, 22% y 68% la curvatura, las S+B [m/km] y las S+B [#/km] respectivamente todas las emisiones disminuyen.

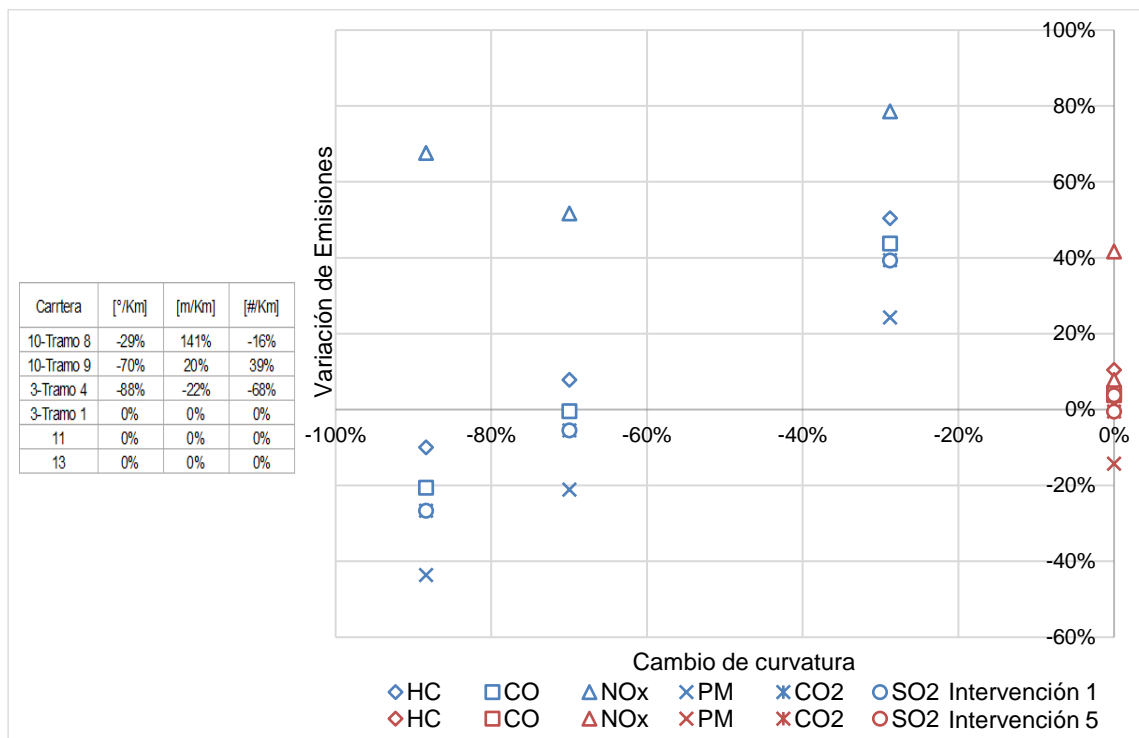
Se puede concluir de la **Figura 4-16** que al construir una nueva calzada con las mismas especificaciones de la existente se tienen menores aumentos en las emisiones que al hacer una calzada con nuevas especificaciones a excepción de que estas mejoras disminuyan todos los parámetros geométricos que se estudian, en este caso se presentan menores emisiones.

En las siguientes figuras se presentan las variaciones de las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C3-C4 (para las demás categorías ver **Anexo D**) para cada carretera identificada con la intervención 1 y 5 y afectadas por el TPD.

▪ **Autos Livianos**

En la **Figura 4-17** se observa la variación de las emisiones estimadas para los autos livianos afectados por el TPD cuando se presentan las intervenciones 1 y 5, junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-17: Variación de las emisiones en autos livianos afectados por el TPD para las intervenciones 1 y 5.



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la **Figura 4-17** que para la intervención 5 algunos de los datos se superponen ocasionando que no se identifiquen con claridad las variaciones que se presentan en las 3 carreteras con dicha intervención, esto se debe a que la mayoría de las emisiones presentan variaciones entre el 0% y el 10% (donde está la superposición de los datos).

En todas las carreteras con las dos intervenciones graficadas las emisiones de NOx aumentan; para la intervención 5 las emisiones en general aumentan levemente y en la intervención 1 cuando la curvatura disminuye, pero las las S+B [m/km] aumentan las emisiones de manera general aumentan y cuando los tres parámetros disminuyeron las emisiones se reducen a excepción del NOx, como se mencionó antes. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-13**.

Tabla 4-13: Resultados para autos livianos en las intervenciones 1 y 5.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
10-Tramo 8	-29%	141%	-16%	Todas las emisiones aumentan, presentado una mayor variación las emisiones de NOx con el 79% seguidas de los HC con el 50%. Las emisiones de CO y PM incrementan 44% y 24% respectivamente y las emisiones CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 39%.
10-Tramo 9	-70%	20%	39%	Las emisiones de NOx y HC aumentan el 52% y 8% respectivamente. Las emisiones de CO no presentan cambios y las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 5%.
3-Tramo 4	-88%	-22%	-68%	Todas las emisiones disminuyen a excepción de los NOx, el cual aumento el 68%. Las emisiones de HC, CO y PM aumentaron el 10%, 21% y 44% respectivamente y las emisiones CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un incremento del 27%.
3-Tramo 1	0%	0%	0%	Las emisiones CO ₂ y SO ₂ no presentaron cambios. Las emisiones de PM disminuyen el 14% y las demás aumentan el 4%, 10% y 42% para el CO, HC y NOx respectivamente.
11	0%	0%	0%	Todas las emisiones aumentaron. El CO, CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un incremento del 4%. Las emisiones de HC, PM y NOx aumentaron el 5%, 1% y 8% respectivamente
13	0%	0%	0%	No se presentan variaciones en ninguna emisión.

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir según la información en la **Figura 4-17** y la **Tabla 4-13** que las emisiones de NOx son las más sensibles al aumentar el número de carriles ya que son los que

mayores incrementos presentan en comparación con los demás contaminantes y en todas las carreteras se presentan aumentos, esto como se mencionó en el numeral **4.2.1.** se debe a que este contaminante en los autos livianos se incrementa al aumentar la velocidad.

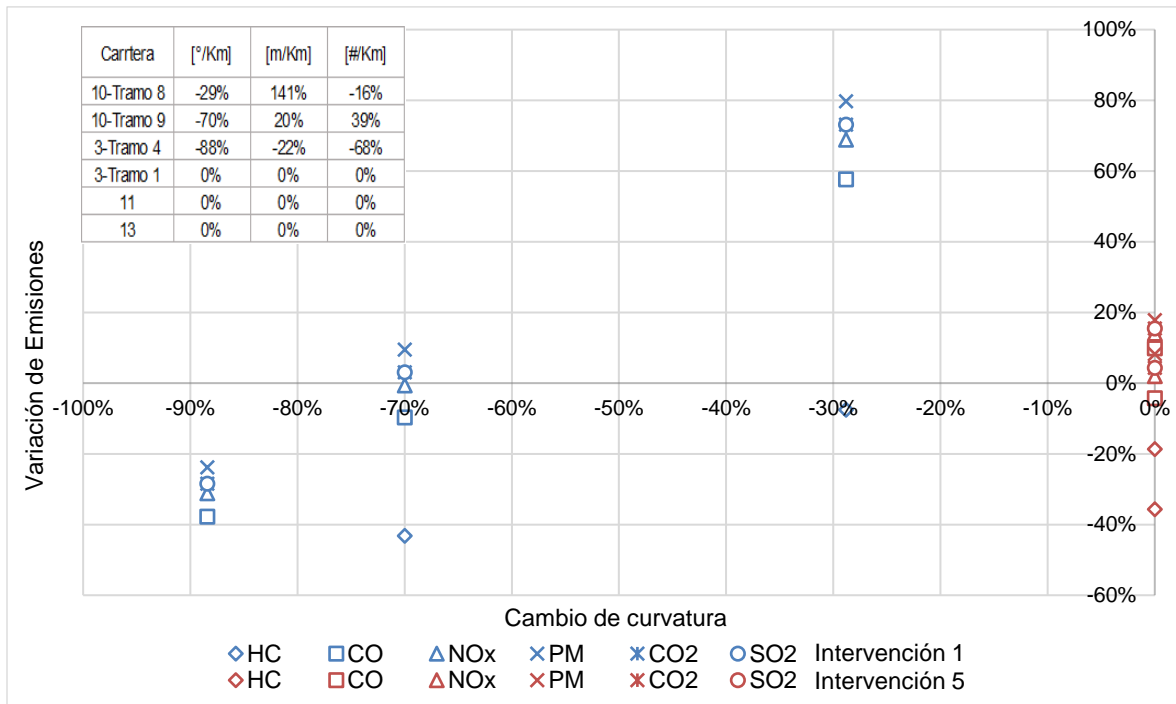
Al conservar las características de la calzada existente las emisiones aumentan, pero levemente, hasta el 10%. Cuando se hacen cambios en la calzada nueva (con respecto a la existente) y estos cambios a pesar de que disminuyen la curvatura y las S+B [# /km] en la carretera, pero hay un aumento significativo de las S+B [m/km] se presentan los mayores incrementos de las emisiones, este comportamiento se puede explicar a que un mayor valor de las S+B [m/km] implica que el motor requiera una mayor potencia y a mayor potencia requerida por el motor mayor será el consumo de combustible y mayores emisiones.

Solo se presentan disminuciones en las emisiones (a excepción de los NOx que como se dijo anteriormente en todas las carreteras aumentan) cuando todas las características geométricas disminuyen (carretera 3-tramo 4).

- **Camiones tipo C3-C4**

En la **Figura 4-18** se presenta la variación de las emisiones estimadas para los camiones tipo C3-C4 afectados por el TPD cuando se presentan las intervenciones 1 y 5, junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-18: Variación de las emisiones en camiones C3-C4 afectados por el TPD para las intervenciones 1 y 5.



Fuente: elaboración propia

Al igual que en los autos livianos en la intervención 5 se presenta una superposición de los datos haciendo que no se identifiquen con claridad las variaciones que se tienen en las 3 carreteras con dicha intervención, como se puede observar en la **Figura 4-18**. Esto se debe a que todas las emisiones se sitúan en el eje Y, ya que no hay variaciones en la geometría, y la mayoría de las emisiones presentan variaciones entre el 0% y el 20% (donde está la superposición de los datos).

En la **Figura 4-18** también se aprecia, al igual que en los autos livianos, en la intervención 5 la mayoría de las emisiones aumentaron y para la intervención 1 sólo se presentan disminuciones en todas las emisiones cuando los tres parámetros geométricos disminuyeron, los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-14**.

Tabla 4-14: Resultados para camiones tipo C3-C4 afectado por TPD en las intervenciones 1 y 5.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
10-Tramo 8	-29%	141%	-16%	En esta carretera se presentan los mayores incrementos en las emisiones y la menor disminución de los HC (8%). Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 73%, el CO y los NOx incrementan el 57% y 69% respectivamente y el aumento mayor lo tiene el PM con el 79%.
10-Tramo 9	-70%	20%	39%	Las emisiones de HC son las que mayor variación, presentan una reducción del 43% de sus emisiones. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento con un aumento del 3% y el PM se incrementa el 9%. Las emisiones de CO y NOx disminuyen el 10% y 1% respectivamente.
3-Tramo 4	-88%	-22%	-68%	Todas las emisiones disminuyen. Las emisiones de mayor variación son los HC con el 64% y las de menos variación el PM con el 24%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una disminución del 28% y el CO y NOx el 38% y 31% respectivamente.
3-Tramo 1	0%	0%	0%	Las emisiones de HC presentan la mayor variación, con una reducción del 36%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 4%, el PM y NOx se incrementan el 8% y 2% respectivamente y el CO disminuye 4%.
11	0%	0%	0%	Todas las emisiones aumentan, a excepción de los HC que disminuye 19%. Las emisiones de CO, NOx y PM aumentan 10%, 14% y 18% y el CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo incremento del 15%.
13	0%	0%	0%	No se presentan variaciones en ninguna emisión.

Fuente: Elaboración propia

De la **Figura 4-18** y la **Tabla 4-14** se puede concluir de forma general las emisiones de HC son las únicas que presentaron el mismo comportamiento disminuyendo en todas las carreteras, esto supone que este tipo de intervenciones para los camiones C3-C4 supone una optimización del proceso de combustión debido a que al tener un carril adicional las variaciones de la velocidad disminuyen, así mismo en la mayoría de las carreteras es la que mayor variación presenta en todo el grupo de emisiones, a excepción de la carretera 10-tramo 8 donde la mayor variación la tiene el PM.

También se puede concluir que al construir una calzada nueva con las mismas especificaciones de la existente (intervención 5) las emisiones de los camiones tipo C3-C4, al igual que en los autos livianos, aumentaron hasta en un 18%, a excepción de las emisiones de HC.

Con la construcción de una nueva calzada con especificaciones diferentes las emisiones aumentan en gran proporción (hasta el 80%) cuando se tiene un aumento significativo en las S+B [m/km] (141%) a pesar de que los demás parámetros disminuyen como en la carretera 10-tramo 8. Cuando la curvatura disminuye significativamente, pero los demás parámetros aumentan (carretera 10-tramo 9) también se presentan incrementos en las emisiones, pero en menor proporción que en la carretera 10-tramo 8 (hasta el 8%), esto se explica por la relación entre las S+B [m/km] y la potencia requerida por el motor.

En el único caso donde todas las emisiones para un camión tipo C3-C4 disminuye sus emisiones al hacer una segunda calzada es en aquel en el que todos los parámetros disminuyeron (carretera 3-tramo 4).

4.3.2 Intervenciones 2 y 4

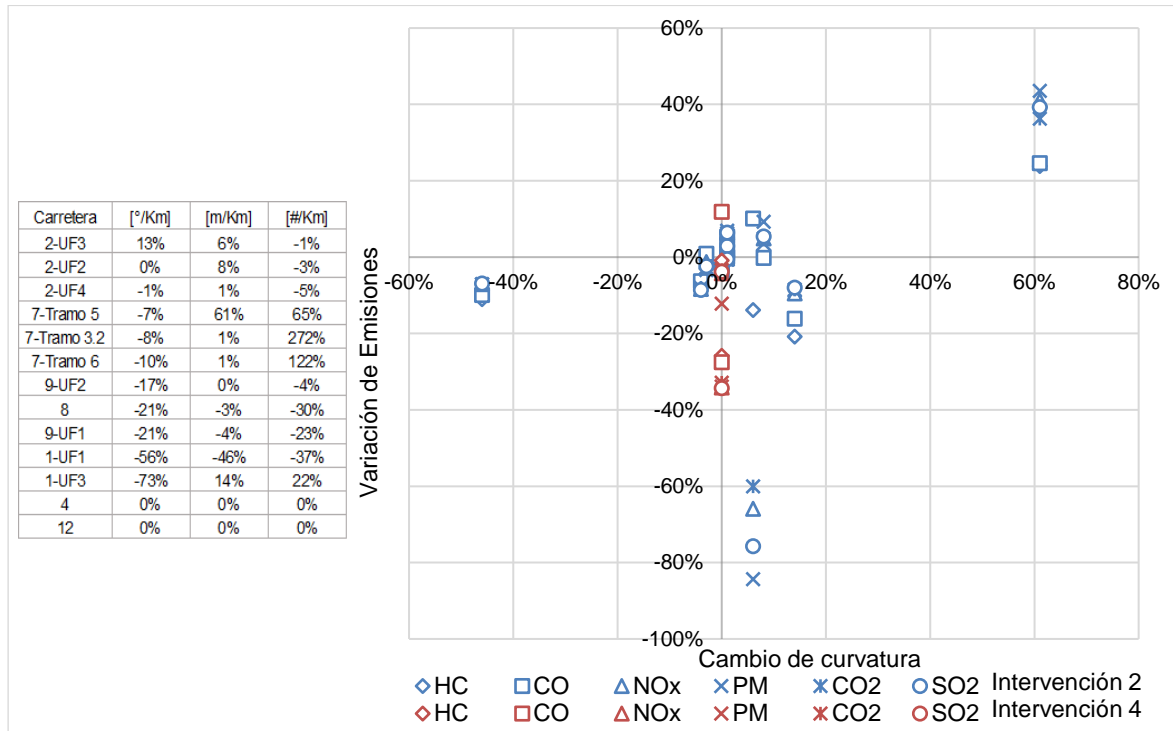
A continuación, se presentan las gráficas con la variación de las emisiones para autos livianos y camiones tipo C5 afectados por el TPD (para los resultados de las demás categorías vehiculares ver **Anexo D**), que estarán asociadas a los cambios de curvatura, pero estos están asociadas a los demás cambios geométricos.

Los cambios de las características geométricas (estos cambios son con respecto a la carretera en su condición inicial, o sea sin intervención) de la carretera se presentan en porcentaje, un porcentaje positivo significa un aumento y por el contrario un porcentaje negativo una disminución, lo mismo aplica para las emisiones. La **Tabla 4-6** presenta cada cambio de curvatura a que otros parámetros y su valor está asociada.

En las carreteras con la intervención 4 no se presentan cambios en las características geométricas ya que la calzada existente no presenta cambios en su trazado, sólo se realiza pavimentación; las características geométricas de estas dos carreteras se presentan en la **Tabla 4-7**.

En la **Figura 4-19** se observan las variaciones de las emisiones totales (es decir la suma por contaminante de lo que aporta cada tipo de vehículo) según los en las subidas+bajadas en m/km para cada carretera con el tipo de intervención 2 y 4.

Figura 4-19: Variación de las emisiones en las intervenciones 2 y 4.



Fuente: Elaboración propia

Para la carretera 2-UF3 todas las emisiones estimadas disminuyen, a excepción del CO que aumenta el 10%, en la carretera 2-UF2, donde aumenta ligeramente la curvatura las emisiones aumentan entre el 2% y 9% y un comportamiento similar se presenta en la carretera 2-UF4 donde las emisiones aumentan entre el 2% y 3% a excepción del HC donde no se presentó ningún cambio.

En la carretera 7-tramo 5 aumentan todas las emisiones, los HC y CO el 24% y 25% respectivamente y las demás entre el 39% y 44%, en la carretera 7-tramo 3.2 las emisiones de HC, CO y NOx no presentaron cambios y las demás disminuyeron el 1% y en la carretera 7-tramo 6 donde se tienen incrementos entre el 5% y 7%.

En la carretera 9-UF2 todas las emisiones disminuyen la misma proporción, 3%.

En la carretera 8 tampoco se presentan cambios significativos disminuyen entre un 1% y 3%; en la carretera 9-UF1 las emisiones de HC y CO disminuyen 8%, las de NOx y PM 8%

y las de CO₂ y SO₂ un 9%; y en la carretera 1-UF1 las emisiones de HC y CO aumentan y disminuyen el 10% y las demás emisiones el 7%.

En la carretera 1-UF3 las emisiones de HC son las que más variación presentan con una reducción del 21%, el CO, NO_x y PM disminuyen el 16%, 10% y 9% respectivamente y las emisiones CO₂ y SO₂ el 8%.

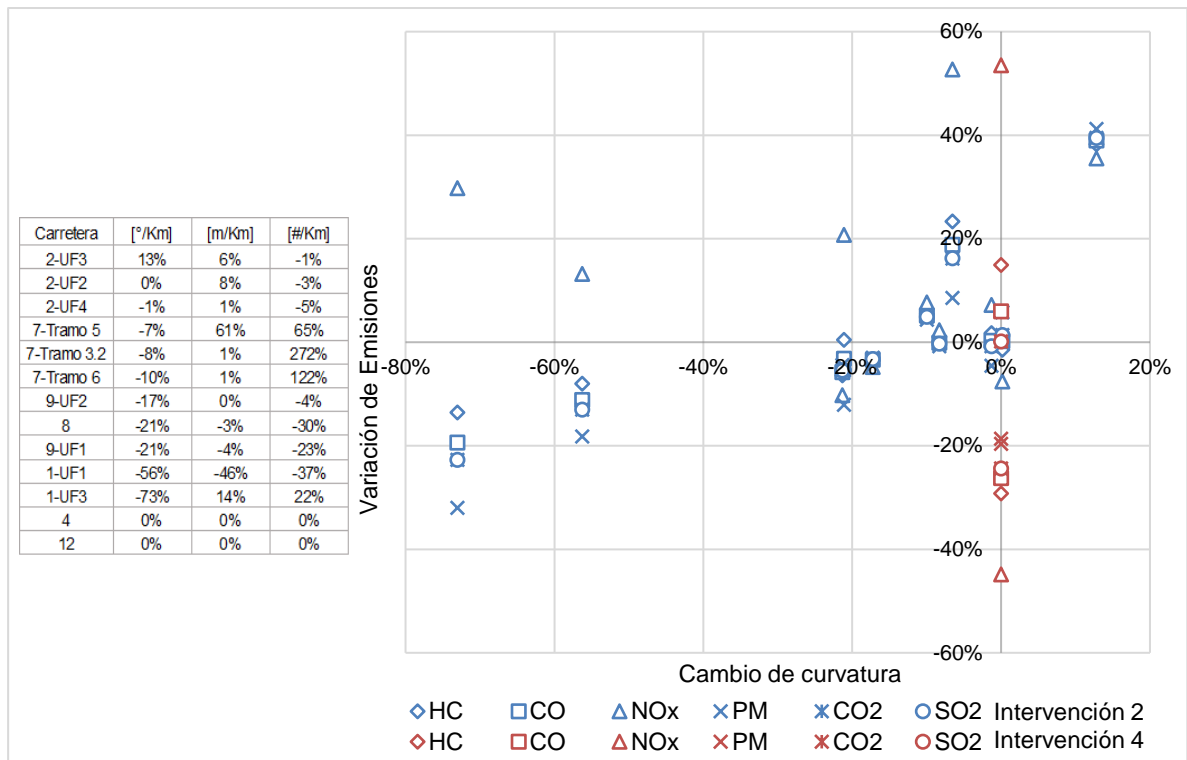
En las carreteras 4 y 12, donde se pavimenta la calzada existente, todas las emisiones disminuyen a excepción del CO en la carretera 4 donde presenta un incremento del 12%; las emisiones de HC y NO_x no presentan cambios significativos con una reducción del 1% y 4% respectivamente, las emisiones de PM disminuyen el 12% y las emisiones de CO₂ y SO₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 15% y 5% respectivamente. En la carretera 12 todas las emisiones presentan la misma disminución del 34% a excepción de los HC y los NO_x que se reducen el 14% y 10% respectivamente.

En las siguientes figuras se presentan las variaciones de las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C5 (para las demás categorías ver **Anexo D**) para cada carretera identificada con las intervenciones 2 y 4.

- **Autos Livianos**

En la **Figura 4-20** se presenta la variación de las emisiones estimadas para los autos livianos afectados por el TPD cuando se presentan las intervenciones 2 y 4, junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-20: Variación de las emisiones en autos livianos afectados por el TPD para las intervenciones 2 y 4.



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la **Figura 4-20** que de manera general en la intervención 2 para aumentos en la curvatura y las S+B [m/km] las emisiones aumentan (carreteras 2-UF3 y 2-UF2); cuando la curvatura disminuye, pero las S+B [m/km] aumentan las emisiones de manera general aumentan y cuando los tres parámetros disminuyeron las emisiones se reducen a excepción del NOx. En la intervención 4 las emisiones en autos livianos presentan diferente comportamiento, en la carretera 4 aumentan y en la carretera 12 disminuyen; a excepción de las emisiones de PM que en todas las carreteras disminuyen. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-15**.

Tabla 4-15: Resultados para autos livianos en las intervenciones 2 y 4.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
2-UF3	13%	6%	-1%	Las emisiones se comportaron de manera similar, aumentando entre un 36% y 41%.
2-UF2	0,15%	8%	-3%	Las emisiones de HC y NOx presentan una disminución del 1% y 8% respectivamente. Las emisiones de CO no presentan cambios. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento aumentando el 1% y las emisiones de PM se incrementa el 6%.
2-UF4	-1%	1%	-5%	Las emisiones de CO no presentan cambios. Las emisiones de HC y NOx presentan un incremento del 2% y 7% respectivamente. El PM que disminuye el 5%, el CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciéndose el 1%.
7-Tramo 5	-7%	61%	65%	Todas las emisiones aumentan, presentado el mayor crecimiento los NOx con un 53%, el CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento aumentando el 16%, y las emisiones de HC, CO y PM incrementan el 23%, 19% y 9%.
7-Tramo 3.2	-8%	1%	272%	Las emisiones de HC, CO, CO ₂ y SO ₂ no presentan cambios y el PM se incrementan el 2% y los NOx disminuyen el 1 % respectivamente.
7-Tramo 6	-10%	1%	122%	Todas las emisiones aumentan. Las emisiones de HC, CO, CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento aumentando el 5%. El PM y los NOx incrementan el 4% y 8% respectivamente.
9-UF2	-17%	-0,5%	-4%	Todas las emisiones disminuyen. Las emisiones de CO, PM, CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 3%. Lo HC y NOx se reducen el 4% y 5% respectivamente.
8	-21%	-3%	-30%	Las emisiones de HC no presentan variaciones. Las emisiones de NOx aumentan el 21%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 5% y el PM y CO el 12% y 3% respectivamente.
9-UF1	-21%	-4%	-23%	Todas las emisiones disminuyen. Las emisiones de HC y CO disminuyen el 6% y el CO ₂ y SO ₂ el 5%. La mayor disminución la presentan los NOx con un 10% y la menor el PM con el 4%.
1-UF1	-56%	-46%	-37%	Todas las emisiones disminuyen a excepción de los NOx que incrementan el 13%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 13% y los HC, el CO y PM disminuyen el 8%, 11% y 18% respectivamente.
1-UF3	-73%	14%	22%	Las emisiones de NOx presentan el mayor cambio con un 53% de aumento. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento disminuyendo el 23% y los HC, el CO y PM disminuyen el 14%, 19% y 32% respectivamente.
4	0%	0%	0%	Las emisiones con mayor variación son los NOx con un incremento del 53%, las emisiones de HC y CO aumentan el 15% y 6% respectivamente, el CO disminuye 20% y las emisiones de CO ₂ y SO ₂ no presentan cambios.
12	0%	0%	0%	Todas las emisiones disminuyen. El CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 24%; las emisiones de HC, CO y PM disminuyen 29%, 26% y 19% respectivamente y las emisiones de NOx son las que más disminuyen con un 45%.

Fuente: elaboración propia

De forma general se puede concluir que las emisiones de NO_x de los livianos son las más sensibles cuando se presentan mejoras en la carretea sin aumentar el número de carriles, ya que como se observa en la **Figura 4-20** para cada una de las carreteras es la que mayor variación presenta a comparación de las demás emisiones.

En la intervención 2 para los autos livianos se encuentran 5 formas en las que las emisiones varían, las cuales dependen de los cambios de la geometría de la carretera y las variaciones de estas. A continuación, se presenta una conclusión general para cada cambio identificado:

1^a. Cuando la curvatura no varía o disminuye levemente y las S+B [m/km] incrementan también poco (hasta el 10%) las emisiones en general aumentan, pero estas variaciones son pequeñas, de hasta el 8% o como en el CO que no presentan variaciones (carreteras 2-UF2, 2-UF4, 7-tramo 3.2 y 7-tramo).

2^a. Cuando se tienen disminuciones en la curvatura entre el 17% y 21% y aumentos en las S+B [m/km] de hasta el 5% las emisiones en general disminuyen, aunque en proporciones pequeñas, hasta el 12% (carreteras 9-UF2, 8 y 9-UF1).

3^a. Cuando disminuyen tanto la curvatura como las S+B [m/km] todas las emisiones disminuyen, a excepción de los NO_x que aumentan (carretera 1-UF1).

4^a. Cuando disminuye en gran proporción la curvatura y hay un incremento ligero en el valor de las S+B [m/km] las emisiones disminuyen, a excepción de los NO_x que aumentan (carretera 1-UF3).

5^a. cuando se tienen incrementos la curvatura y las S+B [m/km], o una leve disminución de la curvatura, pero un fuerte aumento en el valor de las S+B [m/km] las emisiones aumentan (carreteras 2-UF3 y 7-tramo 6).

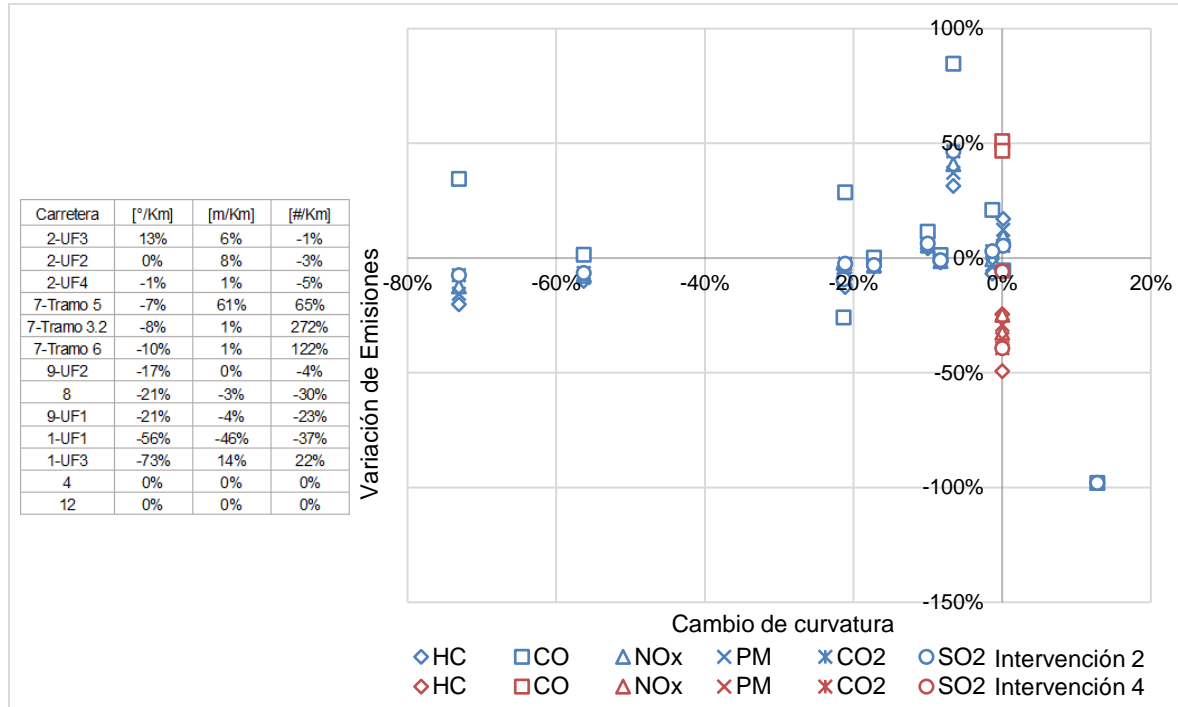
Para la intervención 4 las emisiones aumentaron en aquella carretera donde su curvatura y las S+B [m/km] era menor (carretera 4) con respecto a la carretera donde disminuyeron (carretera 12).

▪ **Camiones tipo C5**

En la junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-21 se presenta la variación de las emisiones estimadas para los camiones C5 afectados por el TPD cuando se presentan las intervenciones 2 y 4, junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-21: Variación de las emisiones en camiones C5 afectados por el TPD para las intervenciones 2 y 4.



Fuente: Elaboración propia

En la junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-21 se puede apreciar que en la intervención 2 para los camiones C5 no se tiene un comportamiento general en la variación de las emisiones y todas se comportan de manera diferente dependiendo de la carretera, aunque se observa que en todas el CO presenta el mayor cambio con respecto a las demás emisiones y en la mayoría de ellos aumenta. En la intervención 4 si se puede observar que de manera general todas las emisiones disminuyen a excepción del CO que aumenta en una proporción parecida. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-16**.

Tabla 4-16: Resultados para autos livianos en las intervenciones 2 y 4.

Carretera	[%/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
2-UF3	13%	6%	-1%	Las emisiones se comportaron de manera similar, disminuyendo entre el 98%.
2-UF2	0,15%	8%	-3%	La mayoría de las emisiones aumentan, solo se presenta una disminución del 5% en el CO. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 5% y los HC, NOx y PM se incrementan el 17%, 10% y 12% respectivamente.
2-UF4	-1%	1%	-5%	No se presentan grandes variaciones en esta carretera, el único contaminante que tiene un cambio significativo es el CO con un incremento del 21%. Las emisiones de HC y PM disminuyen el 7% y 3% respectivamente y los NOx no presentan cambios. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 3%
7-Tramo 5	-7%	61%	65%	En esta carretera se presentan las variaciones más grandes y todas las emisiones aumentan. El CO tiene el mayor incremento con el 85%, seguido de las emisiones de Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ que presentan el mismo comportamiento con un aumento del 47%. Las emisiones de NOx, PM e HC tiene un aumento en sus emisiones del 41%, 37% y 32% respectivamente.
7-Tramo 3.2	-8%	1%	272%	En esta carretera no se presentan cambios significativos. Las emisiones de NOx, PM, CO ₂ y SO ₂ disminuyen el 1% y los HC el 2% Las emisiones de CO aumentan el 1%.
7-Tramo 6	-10%	1%	122%	Todas las emisiones aumentan. Las emisiones de NOx, CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con un aumento del 6%. El CO presenta el mayor incremento para esta carretera con el 12% y las emisiones de HC y PM aumentan el 4% y 5% respectivamente.
9-UF2	-17%	-0,5%	-4%	En esta carretera no se presentan cambios significativos. Las emisiones de NOx, PM CO ₂ y SO ₂ disminuyen el 3%. El CO no presenta cambios y los HC disminuyen el 4%.
8	-21%	-3%	-30%	Todas las emisiones disminuyen, a excepción del CO que aumenta el 29%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 2% y las emisiones de HC, NOx y PM disminuyen el 13%, 6% y 9% respectivamente.
9-UF1	-21%	-4%	-23%	Todas las emisiones disminuyen. El CO tiene el mayor cambio con una reducción del 22% y las emisiones de HC y PM el menor cambio con una disminución del 5% y 6%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 9% y los NOx el 7%.
1-UF1	-56%	-46%	-37%	Las emisiones disminuyen a excepción del CO que aumenta el 2%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 6% y las emisiones de HC, NOx y PM disminuyen el 10%, 8% y 9% respectivamente.
1-UF3	-73%	14%	22%	Las emisiones disminuyen a excepción del CO que aumenta el 35%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento con una reducción del 7% y las emisiones de HC, NOx y PM disminuyen el 20%, 12% y 15% respectivamente.
4	0%	0%	0%	Todas las emisiones disminuyen a excepción del CO que incrementa sus emisiones el 51%. Las emisiones de HC son las que más se reducen con el 49% seguidas de las emisiones de PM y NOx con el 35% y 25% respectivamente. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ presentan el mismo comportamiento incrementando el 6%.
12	0%	0%	0%	Todas las emisiones disminuyen a excepción del CO que incrementa sus emisiones el 47%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ son las que más se reducen y presentan el mismo comportamiento con el 39%. Las emisiones de HC, NOx y PM disminuyen el 24%, 33% y 29% respectivamente.

Fuente: elaboración propia

De forma general se puede concluir que las emisiones de CO₂ y SO₂ presentan las mismas variaciones y que las emisiones de CO de los camiones C5 son las más sensibles cuando se presentan mejoras en la carretera sin aumentar el número de carriles, ya que como se observa en la figura para cada una de las carreteras es la que mayor variación presenta a comparación de las demás emisiones como se había mencionado anteriormente. De la junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-21 también se puede concluir que hay 3 carreteras (7-tramo 3.2, 7-tramo 6 y 9-UF2) donde las emisiones no presentan mayores variaciones y por esto están muy cercanas al eje X.

En la intervención 2 para los camiones C5 se encuentran 4 formas en las que las emisiones varían, las cuales dependen de los cambios de la geometría de la carretera y las variaciones de las emisiones. A continuación, se presenta una conclusión general para cada cambio identificado:

- 1^a. Cuando la curvatura y las S+B [m/km] aumentan y las S+B [# /km] disminuyen levemente (carretera 2-UF3) o los 3 parámetros disminuyen (carretera 9-UF1), las emisiones disminuyen.
- 2^a. Cuando no se presentan cambios significativos en la curvatura, las S+B [# /km] y las veces que el vehículo sube y baja aumentan (carreteras 2-UF2, 7-Tramo 5 y 7-Tramo6) las emisiones en general aumentan, en mayor proporción cuando las S+B [# /km] tiene grandes aumentos.
- 3^a. Cuando disminuyen las 3 pero en mayores proporciones que las comparadas en la 1^a las emisiones disminuyen a excepción de los CO (Carreteras 8, 1-UF1 y 1-UF3).
- 4^a. Cuando hay disminuciones en la curvatura y aumentos en las S+B [# /km], pero estos dos cambios son leves las emisiones disminuyen, pero no en grandes proporciones, hasta el 7% (Carreteras 2-UF4, 7-Tramo 3.2 y 9-UF2).

De la Tabla también se concluye que cuando se realiza una pavimentación los camiones C5 disminuyen sus emisiones a excepción del CO que en las dos carreteras aumentan.

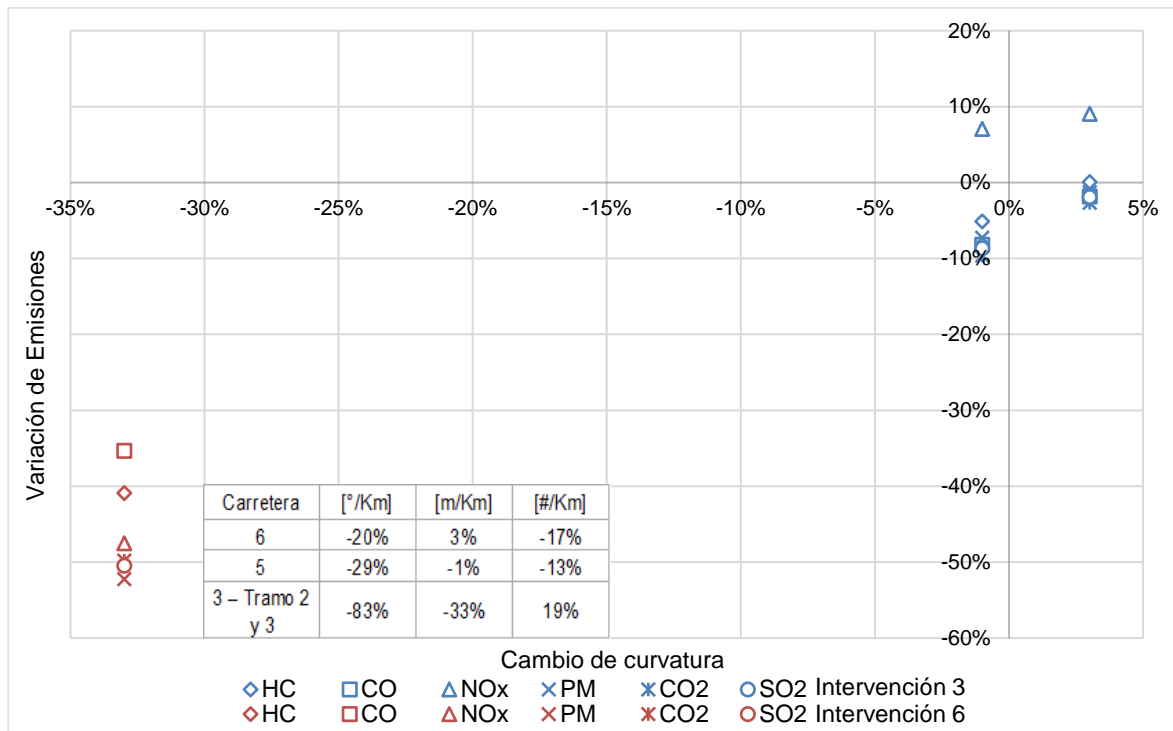
4.3.3 Intervenciones 3 y 6

Se presenta una gráfica con la variación de las emisiones para autos livianos y camiones tipo C6 (para los resultados de las demás categorías vehiculares ver **Anexo D**) afectados por el TPD, que estarán asociadas a los cambios de curvatura y estos a los demás cambios geométricos, como se mencionó anteriormente.

Los cambios de las características geométricas (estos cambios son con respecto a la carretera en su condición inicial, o sea sin intervención) de la carretera se presentan en porcentaje, un porcentaje positivo significa un aumento y por el contrario un porcentaje negativo una disminución, lo mismo aplica para las emisiones. La **Tabla 4-10** presenta cada cambio de curvatura a que otros parámetros y su valor está asociada.

En la **Figura 4-22** se observan las variaciones de las emisiones totales (es decir la suma por contaminante de lo que aporta cada tipo de vehículo) según las subidas más bajadas para cada carretera con el tipo de intervención 3 y 6.

Figura 4-22: Variación de las emisiones en las intervenciones 3 y 6.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-22** se puede observar que en general todas las emisiones disminuyen a excepción de los NOx en la intervención 3.

En la intervención 3 cuando aumenta el valor de las S+B [#km] levemente (3%) y la curvatura y el número de subidas y bajadas disminuye el 20% y 17% respectivamente y las emisiones disminuyen entre el 1% y 3% y en la carretera 5 donde disminuyen los tres parámetros la variación no es muy diferente, las emisiones se reducen entre el 7% y 10%. Para las dos carreteras de la intervención 3 las emisiones de NOx aumentan el 9% y 7%.

En la intervención 6, en donde la nueva carretera presenta una disminución en el valor de las S+B [#km] del 33% y de la curvatura del 83% y un aumento del 19% en el número de subidas y bajadas, todas las emisiones disminuyen entre el 41% y 52%.

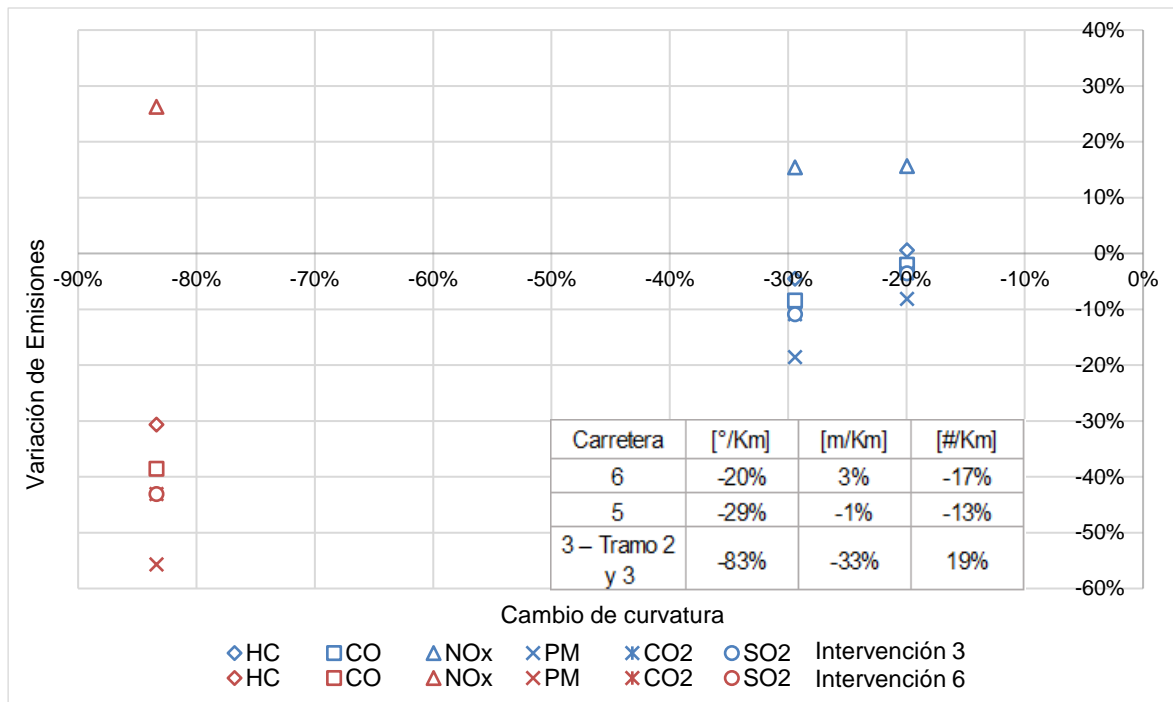
Se puede concluir de manera general que cuando se presenta una mejora en la geometría vial y la construcción de una segunda calzada las emisiones disminuyen y se presentan mayores reducciones cuando se disminuye significativamente la curvatura y las S+B [#km].

En las siguientes figuras se presentan las variaciones de las emisiones para los autos livianos y camiones tipo C6 afectados por el TPD (para las demás categorías ver **Anexo D**) para cada carretera identificada con la intervención 3 y 6.

- **Autos livianos**

En la **Figura 4-23** se presenta la variación de las emisiones estimadas para los autos livianos cuando se presentan las intervenciones 3 y 6 y para un solo vehículo, en la figura también se puede observar cada cambio de curvatura a qué demás tipos de cambio está asociada.

Figura 4-23: Variación de las emisiones en autos livianos afectados por el TPD para las intervenciones 3 y 6.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-23** se observa que en todas las carreteras las emisiones de NOx se incrementan y las demás disminuyen. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-17**

Tabla 4-17: Resultados para autos livianos en las intervenciones 3 y 6.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
6	-20%	3%	-17%	Las emisiones de HC que presentan un ligero incremento del 1% y los NOx con un aumento del 16%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 4% y el PM y CO disminuyen el 8% y 2% respectivamente.
5	-29%	-1%	-13%	Las emisiones de NOx aumentan el 15% y las demás emisiones disminuyen. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 11% y el PM, CO e HC disminuyen el 19%, 8% y 4% respectivamente.
3 – Tramo 2 y 3	-83%	-33%	19%	Las emisiones de NOx aumentan el 26%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 43% y el PM, CO e HC disminuyen el 56%, 39% y 31% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

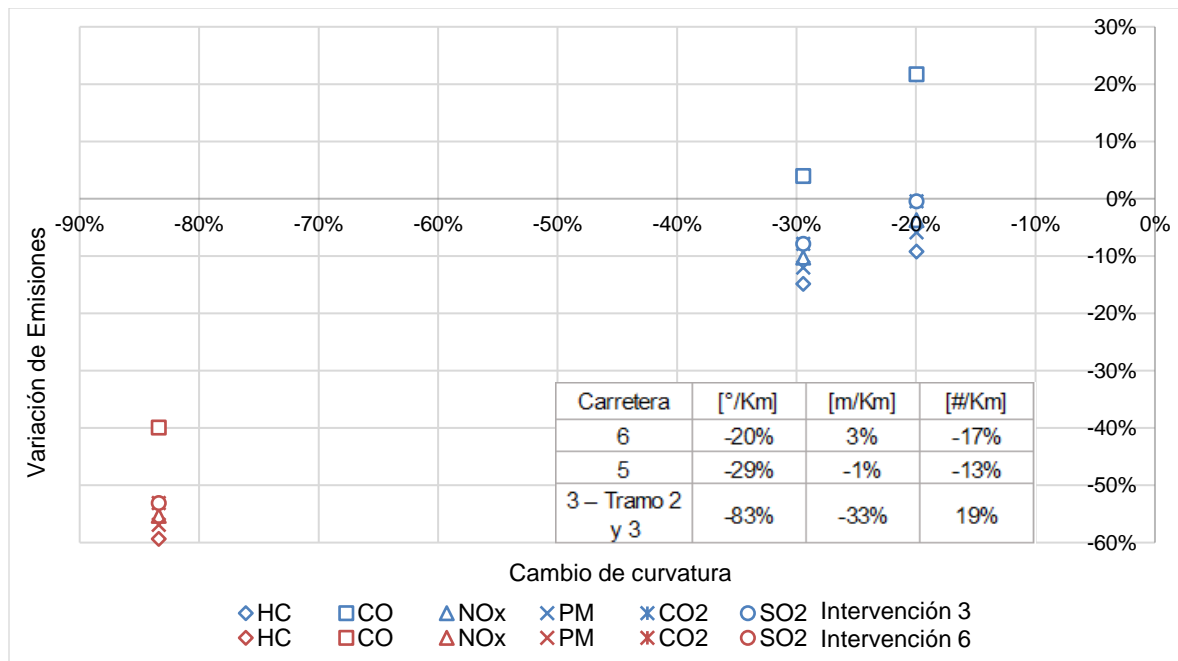
Se puede concluir según la información en la **Figura 4-23** y la **Tabla 4-17** que las emisiones de NOx en los autos livianos son las más sensibles al mejorar la calzada existente y construir un nuevo carril ya que son los que mayores incrementos presentan en comparación con los demás contaminantes y en todas las carreteras se presentan aumentos.

También se puede concluir que de manera general para la intervención 3 las emisiones disminuyen al disminuir la curvatura y que al mayor ser la reducción en la curvatura mayor serán las reducciones en las emisiones; lo mismo sucede en la intervención 6 y posiblemente en esta se presentan variaciones mayores debido a la disminución significativa del valor de la las S+B [# /km] (carretera 3 – tramo 2 y 3) en comparación de las carreteras de la intervención 3 (carretera 5 y 6).

▪ **Camiones tipo C6**

En la **Figura 4-24** se presenta la variación de las emisiones estimadas para camiones C6 afectados por el TPD cuando se presentan las intervenciones 3 y 6, junto a la figura se muestra una tabla con cada cambio de curvatura y los demás cambios geométricos a los que están asociados.

Figura 4-24: Variación de las emisiones en camiones C6 para las intervenciones 3 y 6.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4-24** se observa que para la intervención 6 todas las emisiones disminuyen y en la intervención 3 aumentan solo las emisiones de CO y las demás disminuyen. Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la **Tabla 4-18**.

Tabla 4-18: Resultados para camiones C6 afectados por el TPD en las intervenciones 3 y 6.

Carretera	[°/km]	[m/km]	[#/km]	Resultados
6	-20%	3%	-17%	Las emisiones de CO aumentan el 22%. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ no presentan ningún cambio y el PM y los NOx y HC disminuyen el 6%, 4% y 9% respectivamente.
5	-29%	-1%	-13%	Las emisiones de CO aumentan el 9% y las demás emisiones disminuyen. Las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 4% y los HC, el PM y los NOx disminuyen el 11%, 8% y 6% respectivamente.
3 – Tramo 2 y 3	-83%	-33%	19%	Todas las emisiones disminuyen, pero el CO lo hace en menor proporción respecto a las demás, este se reduce el 8%. La mayor reducción la presentan las emisiones de HC con el 36%, las emisiones de CO ₂ y SO ₂ tienen el mismo comportamiento reduciendo el 26% y las emisiones de PM y los NOx disminuyen el 32% y 30% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir según la información en la **Figura 4-24** y la **Tabla 4-18** que las emisiones de CO en la intervención 3 de los camiones C5 son las más sensibles al mejorar la calzada existente y construir un nuevo carril ya que son los que mayores incrementos presentan en comparación con los demás contaminantes y en todas las carreteras se presentan aumentos.

También se puede concluir que de manera general para la intervención 3 las emisiones disminuyen al disminuir la curvatura y que al mayor ser la reducción en la curvatura mayor serán las reducciones en las emisiones; lo mismo sucede en la carretera con la intervención 6, aunque en esta también disminuye el CO y posiblemente se presentan variaciones mayores debido a la disminución significativa del valor de las S+B [#/km] (carretera 3 – tramo 2 y 3) en comparación de las carreteras con la intervención 3 (carretera 5 y 6).

5. Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones que se obtienen por el desarrollo de este estudio y que responden a los objetivos planteados y la descripción de un trabajo futuro.

5.1 Conclusiones

- En esta investigación se plantea una metodología que identifica los beneficios en términos de calidad del aire cuando se realizan intervenciones en una carretera, esto mediante la cuantificación de la variación de las emisiones vehiculares que se pueden generar con la intervención, es decir estimando el aumento o disminución de las emisiones vehiculares cuando se interviene una carretera y con esto incluir, en la toma de decisiones sobre el tipo de intervenciones más adecuadas, las afectaciones ambientales en cuanto al aumento o disminución de las emisiones.
- El modelo HDM-4 utilizado en esta investigación resulta ser una herramienta muy eficaz a la hora de estimar la variación de la cantidad de emisiones al variar parámetros geométricos de una carretera como la curvatura y la relación de subidas+bajadas en m/km
- La variación emisiones de CO₂ y SO₂ cuando se tienen diferentes tipos de geometría presentó siempre el mismo comportamiento, ya sea disminuyendo o incrementando en la misma proporción; al igual que en las intervenciones que al encontrar las variaciones entre la carretera existente y proyectada estas dos emisiones variaban de igual forma.
- Tanto en la variación de las emisiones por tipo de geometría como cuando se presentan intervenciones se presenta el mismo comportamiento cuando se estiman los contaminantes para un vehículo o afectados por el TPD.

En cuanto a los tipos de geometría vial se concluye:

- Las emisiones producidas por los autos livianos presentan el mismo comportamiento, son mayores en carreteras planas y rectas y se tienen las menores emisiones donde la carretera es ondulada y sinuosa pero su curvatura no supere los 300 [°/Km], entre una y otra hay una disminución de aproximadamente 20%. Este comportamiento esta relación con la velocidad ya que para velocidades muy altas (por encima de 80 Km/h) las cuales se tienen en las carreteras planas y rectas estas emisiones son mayores en comparación con velocidades que oscilan entre los 60 Km/h y 80 Km/h.
- Las emisiones del PM son muy pequeñas (no superan un gramo de emisión por cada kilómetro recorrido) y no varía mucho en los 7 tipos de carretera.
- En los Buses y camiones tipo C2G y C3-C4 sus emisiones presentan el mismo comportamiento. Las emisiones de CO₂, SO₂, NO_x y PM no varían mucho entre los diferentes tipos de carretera, pero para carreteras con curvaturas entre 150°/Km y 300°/Km y las S+B [m/km] entre 20 m/Km y 40 m/Km las emisiones disminuyen, pero si la curvatura y las S+B [m/km] aumentan mucho se presentan las mayores emisiones. Las emisiones de HC y CO aumentan a medida que se aumenta la curvatura y las S+B [m/km]; y con respecto a la velocidad, para velocidades menores las emisiones aumentan.
- Todas las emisiones en los camiones tipo C2P disminuyen a medida que la curvatura y las S+B [m/km] aumentan para los 7 tipos de geometría estudiados, en relación con la velocidad se identifica que a medida que disminuye la velocidad, pasando de 94 km/h en las carreteras tipo 1 (recta y muy plana) a 50 km/h en la carretera tipo 7 (muy Sinuosa y ondulada), las emisiones aumentan aunque según lo revisado en la literatura cuando la velocidad ya sea muy baja las emisiones empezaran a aumentar.

A continuación, se presentan las conclusiones para cada tipo de intervención identificada.

Rehabilitación de la calzada existente y doblamiento de la calzada.

- Al construir una segunda calzada manteniendo las características geométricas de la calzada existente las emisiones de los vehículos tienden a aumentar, aunque estos incrementos no son mayores al 12%. Esto puede explicarse debido a que para las dos carreteras con este tipo de intervención la velocidad en la existente era de 84 km/h y aumentaron a 90 km/h con el doblamiento de la calzada y para este rango de velocidades las emisiones tienden a aumentar.

Rehabilitación de la calzada existente y construcción de una segunda calzada con especificaciones diferentes a la calzada existente.

- Si la segunda calzada tiene un trazado diferente a la existente, este debe garantizar que los cambios geométricos de la nueva disminuyan la curvatura y las S+B [m/km] con respecto a la existente de lo contrario las emisiones en general aumentarán (con incrementos hasta del tripe de las emisiones como en el caso del CO en camiones tipo C5 y C6) en mayor proporción si las S+B [m/km] presenta un aumento considerable.
- Las emisiones de NOx producidas por los autos livianos son las más sensibles, tanto para un solo vehículo como cuando es afectado por el TPD, presentando mayores emisiones al disminuir la curvatura.
- Para los buses, camiones C2G y camiones C3-C4 se reducen considerablemente sus emisiones de HC, lo que supone que el proceso de combustión para este tipo de vehículos es más eficiente cuando se tiene una doble calzada.
- Para los camiones C5 y C6 en todas las carreteras con este tipo de intervención las emisiones de CO aumentan, aunque estos incrementos son menores si se tiene un mayor cambio en la curvatura, es decir a menor curvatura y menor las S+B [m/km] menor aumento en las emisiones de CO se tienen, en estos camiones el comportamiento también difiere un poco de los demás ya que al disminuir la curvatura y tener un aumento del 20% en el valor de las S+B [m/km] las emisiones disminuyeron, lo que supone que las emisiones en estos camiones cuando se construye una nueva calzada con nuevas especificaciones son más sensibles a los cambios de la curvatura.

- Este comportamiento puede deberse a lo encontrado en las emisiones por tipo de geometría, en los autos livianos se evidenció que las emisiones de NO_x son mayores donde la relación de subidas+bajadas en m/km y la curvatura son pequeñas; en los buses, camiones C2G y camiones C3-C4 las emisiones de HC son menores a mayores velocidades y con el doblamiento de la calzada las velocidades aumentan y finalmente en el CO en camiones C5 y C6 se tiene que en carreteras que tienen curvaturas y las S+B [m/km] pequeñas (carretera tipo 1- muy rectas y plana) y las velocidades son mayores (95 km/h) las emisiones de CO son menores en comparación con carreteras con alta curvatura y las S+B [m/km] (carretera tipo 7 - muy sinuosa y ondulada) y la velocidad es menor (46 km/h).

Mejoramiento de la calzada existente y construcción de una segunda calzada:

- Cuando se hace mejora a la calzada existente mediante la disminución de su curvatura y las S+B [m/km], y se construye una nueva calzada las emisiones en general tienden a disminuir.
- Las emisiones de NO_x producidas por los autos livianos son las más sensibles al construir una segunda calzada, tanto para un solo vehículo como para cuando es afectado por el TPD, pero estos incrementos son menores cuando se hace un mejoramiento a la calzada existente en relación con cuando sólo se rehabilita, es decir las emisiones de NO_x en autos livianos incrementan al construir una nueva calzada y disminuir la curvatura.
- En los buses, camiones C2G y camiones C3-C4 las emisiones disminuyen cuando se hace el mejoramiento de la calzada existente y se realiza la construcción de la segunda, aunque para el PM se presenta un ligero aumento (no más del 2%) cuando el mejoramiento en la calzada existente implica un aumento (aunque también muy pequeño del 3%) en las S+B [m/km].
- En los camiones C2P todas las emisiones aumentan hasta en un 20% para este tipo de intervención, pero estos incrementos son menores que los que se presentan cuando sólo se la hace rehabilitación en la calzada existente.

- El comportamiento de los NOx de los autos livianos puede deberse a que en las carreteras donde se plantea la rehabilitación la disminución de la curvatura es mayor a las carreteras donde se plantean mejoramientos y construcción de doble calzada y como se encuentra en las emisiones por tipo de geometría a menor curvatura mayores son las emisiones de NOx en autos livianos y el aumento general de estas emisiones al tener una doble calzada puede deberse al incremento en las velocidades ya que en este contaminante a mayor velocidad, mayores son sus emisiones.

En los demás tipos de vehículos y emisiones mencionadas la razón de este comportamiento puede deberse a que cuando se realiza un mejoramiento a la calzada existente y la construcción de una segunda calzada las velocidades se optimizan llegando a la velocidad donde el consumo de combustible es bajo y por ende las emisiones.

Construcción de una doble calzada en un nuevo trazado

- En esta situación se presentaron los mejores beneficios, en todos los vehículos las emisiones disminuyeron a excepción de las emisiones de los camiones C2P y los NOx en los livianos, esto se puede presentar porque en esta intervención tanto la curvatura como las S+B [m/km] disminuyeron considerablemente como en el caso donde sólo se rehabilita la calzada existente pero la nueva calzada también disminuye estas variables geométricas.

Mejoramiento de la calzada existente:

Para este tipo de intervención, que corresponde a la rectificación de curvas y mejoras en el perfil vertical, no se presenta un patrón único en la forma en la que varían las emisiones, pero se puede concluir de manera general que:

- En los livianos, las emisiones de NOx son las más sensibles cuando se presentan mejoras en la carretera sin aumentar el número de carriles, estas aumentan cuando la curvatura disminuye, y disminuyen cuando la curvatura aumenta, este mismo comportamiento lo presentan las emisiones de HC. Las demás emisiones presentan un comportamiento similar entre sí, se tiene que cuando hay disminuciones en la curvatura pero aumentos en las S+B [m/km] las emisiones tienden a aumentar y sólo

se presentan reducciones en las emisiones cuando las S+B [m/km] y la curvatura disminuyen, pero estas disminuciones deben ser mayores al 30% ya que se observa que para curvaturas que disminuyen hasta en un 21% y no hay variaciones significativas en las S+B [m/km], las emisiones no presentaron cambios significativos (no se presentan aumentos o disminuciones superiores al 5%). Luego para los livianos se puede concluir que sus emisiones son más sensibles a los cambios de las S+B [m/km].

- Para los buses y camiones las emisiones en general presentan el mismo comportamiento, incrementando cuando se tienen aumentos en las S+B [m/km] y pequeñas disminuciones en la curvatura, no se presentan variaciones significativas cuando hay pequeñas disminuciones en la curvatura y las S+B [m/km] no varían. Cuando las S+B [m/km] y la curvatura disminuyen, pero no en grandes proporciones, las emisiones disminuyen; pero cuando se tienen un aumento de las S+B [m/km] por encima del 10% o disminuye mucho (más del 40%) y la curvatura disminuye por encima del 50% sólo se presentan disminuciones en las emisiones de HC y CO, el resto de las emisiones aumenta. En los buses, cuando esta categoría fue afectada con el TPD y estimadas sus emisiones todas ellas disminuyeron, pero fue en la única intervención que se presentó esto y sólo para este tipo de vehículo, en las demás como se dijo en una conclusión anterior el comportamiento de las variaciones de las emisiones fue en general el mismo tanto para un solo vehículo como para cuando se han afectado por el TPD.
- El comportamiento de las emisiones de NOx y HC en los livianos puede presentarse debido a que estas son mayores cuando la curvatura y las S+B [m/km] son pequeñas y disminuyen a medida que estas aumentan, esto también está relacionado con la velocidad, a mayores velocidades se presentan mayores emisiones de estos contaminantes en vehículos livianos; caso contrario ocurre para los buses y camiones para los que según los resultados obtenidos por tipo de geometría sus emisiones tienden a aumentar con el incremento en las S+B [m/km] y la curvatura o con la disminución de las velocidades.

Pavimentación de la calzada existente

- En general cuando se pavimenta una carretera las emisiones disminuyen para los camiones y buses, pero en los autos livianos y camiones C2P la variación está asociada a la geometría, en aquella en la que la curvatura y las S+B [m/km] son menores las emisiones aumentaron, esto se debe a las velocidades. En la carretera que tiene mejores especificaciones y se pavimentó las velocidades aumentaron, pasando de una velocidad promedio de 50 Km/h a 100 Km/h, y para velocidades muy altas el consumo de combustible es mayor y por ende las emisiones aumentan; pero para el caso de la carretera que tiene una curvatura y las S+B [m/km] mayores (30% y 13% respectivamente) con la pavimentación la velocidad pasa de ser muy baja, en promedio 38 Km/h, donde también se presentan altos consumos de combustible a una velocidad donde el consumo de combustible es óptimo (60 Km/h).

De las intervenciones estudiadas en las carreteras se tienen cinco grandes conclusiones:

- Para que exista una disminución de las emisiones cuando se plantea el mejoramiento del trazado de una carretera este debe depender de las condiciones existentes, ya que si se tiene una carretera muy recta y plana las altas velocidades generan grandes emisiones y para que estas disminuyan la intervención debe considerar el aumento de la curvatura y la las S+B [m/km] y si por el contrario la carretera es muy sinuosa y ondulada se debe, disminuir tanto curvatura como las S+B [m/km].
- Al construir una segunda calzada esta debe ir acompañada del mejoramiento de la carretera existente, según lo descrito anteriormente, y controlando las velocidades, porque como se ha mencionado las altas velocidades de manera general aumentan las emisiones.
- La pavimentación de una carretera por sí misma no disminuye las emisiones de una carretera, esta va a depender de que tanto aumente la velocidad de los vehículos, luego también se debe intervenir el trazado de la carretera.
- Cada proyecto tiene sus propias condiciones y características y no es válido decir que siempre determinada intervención es buena o mala porque como se indica anteriormente depende las condiciones existentes en las carreteras, pero para

identificar que tan buena o no es determinada intervención en términos de disminuir la cantidad de emisiones la metodología propuesta en esta tesis es adecuada.

- El tipo de geometría que hace que se tengan menor cantidad de contaminantes, teniendo cuenta tanto el tipo de contaminante como tipo de vehículo es la 4, donde la carretera es sinuosa y ligeramente ondulada es decir para curvaturas entre $75^\circ/\text{Km}$ y $150^\circ/\text{Km}$ y subidas+bajadas entre 10 m/km y 15 m/km .

5.2 Recomendaciones

- Es necesario seguir contribuyendo con investigaciones donde se estudien temas como la influencia del tipo de combustible en las emisiones provenientes de los vehículos, el uso de nuevos combustibles y tecnologías, estilos de conducción denominados verdes, entre otros y así encontrar formas para mitigar la contaminación ya que las afectaciones al medio ambiente y a la salud humana cada vez son mayores.
- Con base en este trabajo y otros donde se estudia el comportamiento de las emisiones en relación con la pendiente y curvatura de la carretera, con el radio de curva y con la velocidad se pueden elaborar unas pautas que incluyan las emisiones en el diseño geométricos de carreteras.

A. Anexo: Matriz de modelos de estimación de emisiones

En este anexo se presenta un archivo de Excel con la matriz elaborada para los modelos de estimación de emisiones consultadas.

B. Anexo: Información carreteras seleccionadas

En este anexo se presenta un archivo de Word con la información de los proyectos viales seleccionados y datos usados para la estimación de sus emisiones. Anexo: Estimación de emisiones por tipo de geometría vial.

C. Anexo: Estimación de emisiones por tipo de geometría vial

Se presenta un archivo de Excel con los datos usados para los 7 tipos de geometría estudiados y sus emisiones estimadas.

D. Anexo: Resultados.

Se presenta un archivo de Word con los resultados que no son presentando en este documento.

Bibliografía

- Acevedo, J., Boracejo, J., & Velásquez, M. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. 35.
- Amable, I., Méndez, J., Bello, B. M., Benítez, B., Escobar, L. M., & Zamora, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*, 39(5), 1160–1170.
- Antamba, J., Reyes, G., & Granja, M. (2016). Estudio comparativo de gases contaminantes en un vehículo M1 , utilizando gasolina de la Comunidad Andina (Comparative study of emission of pollutant gases in vehicle M1 , using fuel of the Andean Community). *Enfoque UTE*, 10.
- Aránguez, E., Ordóñez, J., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española Salud Pública*, 73, 123–132.
- Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM 10. *Luna Azul*, (34), 195–213.
- Barrios, O. (2007). *Contaminación del ambiente por material particulado generado en las obras civiles*. Universidad de Sucre.
- Barth, M., Younglove, T., & Scora, G. (2005). Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. *Environmental Research*, (January).
- Becerra, M., & Mance, H. (2009). *Cambio climático: lo que está en juego* (Juan André). Bogota, D.C.
- Benavides, H., & León, G. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, 1–102. Retrieved from www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf
- Bennett, C., & Greenwood, I. (2001). *HDM – 4 - Volumen Seven: Modeling road user and enviromental effects in HDM-4*. París, Francia.
- Bernaola, A. (2013). La emisión de aerosoles de partículas y gases en motores de diésel.

- Seguridad y Salud En El Trabajo*, 73, 14–26. Retrieved from <https://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/ANALISIS+DE+GASES.pdf>
- Blumberg, K. O., Walsh, M. P., & Pera, C. (2003). *Gasolina y diésel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*.
- Boldo, E. (2019). *La contaminación del aire* (E. Boldo, Instituto de Salud Carlos III, & Los Libros de la Catarata, Eds.). Madrid: Catarata.
- Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2009). Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems. *Transportation Research Record*, (2139), 21–30. <https://doi.org/10.3141/2139-03>
- Borrás, E. (2013). *Caracterizació De Material Particulado atmosférico generado en reactores fotoquímicos y procedente de muestras ambientales*. Universitat Politècnica de València.
- Borrego, C., Amorim, J. ., Tchepel, O., Dias, D., Rafael, S., Sá, E., ... Coelho, M. (2016). Urban scale air quality modelling using detailed traffic emissions estimates. *Atmospheric Environment* (1967), 131, 341–351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.017>
- British Broadcasting Corporation. (2018, December). Cambio climático: los 6 gráficos que muestran el estado actual del calentamiento global. *BBC News Mundo*. Retrieved from <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46426822>
- Brodrick, C. J., Dwyer, H. A., Farshchi, M., Harris, D. B., & King, F. G. (2002). Effects of engine speed and accessory load on idling emissions from heavy-duty diesel truck engines. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 52(9), 1026–1031. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470838>
- Caballero, A. (2011). *Análisis de emisiones de vehículos livianos según ciclos de conducción específicos para la región metropolitana* (Universidad de Chile). Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-caballero_mm/pdfAmont/cf-caballero_mm.pdf
- California Air Resources Board. (2018). *EMFAC 2017 Volume I – User’s Guide* (p. 81). p. 81.
- Chamberlin, R., Swanson, B., Talbot, E., Dumont, J., & Pesci, S. (2011). Analysis of Moves and CMEM for evaluating the emissions impacts of an intersection control

- change. *Transportation Research Board*, 50. Washington, D.C.
- Chester, A., & Harrison, R. (1987). *Vehicle operating cost: evidence from Developing Countries*.
- Church, J., & White, N. (2006). A 20th century acceleration in global sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 33.
- Clark, N., Kern, M., Atkinson, C., & Nine, R. (2016). Factors Affecting Heavy-Duty Diesel Vehicle Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2247(March). <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470755>
- Corporación para el Desarrollo de la Biotecnología y Producción Limpia. (2004). *Determinacion de la contaminacion ambiental debida al porcentaje de evaporacion en las gasolinas colombianas*. Bogota, D.C.
- Crouse, W., & Anglin, D. (1992). *Mecánica de la Motocicleta* (Marcombo). Barcelona.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). *Emisiones de Gases Contaminantes en Colombia para el año 2013*. Bogotá D.C.
- Environmental Protection Agency. (2015). *MOVES2014a User Guide* (p. 266). p. 266.
- Escobar, J., Bordonos, J., Norambuena, L., & Reinoso, A. (2011). *Guía Metodológica Inventario de Emisiones Atmosféricas Metodología SINCA 2011* (pp. 1–377). pp. 1–377. Retrieved from http://www.sinia.cl/1292/articles-52667_GuiaMInventarioEmisionesAtmosfericas2011.pdf
- Farnsworth, S. (2001). *El Paso Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) case study* (Vol. 7). EL Paso.
- Fernández, J., Lucas, H., & Ballesteros, M. (2012). Biocarburantes. *Haya Comunicación*, 20.
- Fundación para la Salud Geoambiental. (2013). Un ser vivo un entorno sano de: El dióxido de azufre SO₂. Retrieved from Fundación para la Salud Geoambiental
- Gaitán, M., & Cárdenas, P. A. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- García, C., Barrera, X., Gómez, R., & Suárez, R. (2015). *El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21* (2nd ed.; WWF-Colombia, Ed.). Santiago de Cali.
- Gozzer, S. (2019, December 4). Cuatro efectos del cambio climático que ya se pueden

- ver en América Latina. *BBC News Mundo*. Retrieved from <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-50634600>
- Greenwood, I., Dunn, R., & Raine, R. (2007). Estimating the Effects of Traffic Congestion on Fuel Consumption and Vehicle Emissions Based on Acceleration Noise. *Journal of Transportation Engineering*, 133(2).
- Henao, E., Romero, C., & Quintero, H. (2019). Sistematización de los cálculos de prediseño de los motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 47–58. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019005>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2012). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares*. México.
- Instituto Nacional de Vías. (2015). Volumen de Tráfico Vehicular en forma de TDPs 2015. Retrieved from <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/5462-volumen-de-traffic-vehicular-en-forma-de-tdps-2015>
- International Sustainable Systems Research Center. (2008). *Manual del Usuario del Modelo IVE* (p. 55). p. 55.
- IPCC. (2014). *Resumen responsables de políticas*. En: *CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Mitigación del cambio climático*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Kean, A. J., & Kendall, G. R. (2003). *Effects of Vehicle Speed and Engine Load on Motor Vehicle Emissions*. 3739–3746.
- Ko, M. (2015). Incorporating Vehicle Emissions Models into the Geometric Highway Design Process. *Transportation Research Record*, 2503(1), 1–9. <https://doi.org/10.3141/2503-01>
- Lara, C., Mendoza, J. F., López, M. G., Téllez, R., Martínez, W., & Alonso, E. M. (2009). *Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana*. (322), 1–126. Retrieved from <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt322.pdf>
- Lee, J., Choi, J. S., Hu, H., & Yoon, T. (2019). A method for the estimation of greenhouse gas emissions based on road geometric design and its application to South Korea. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(1), 65–80. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1437487>

- Llopis, D., Pérez, A., Camacho, F., & García, A. (2018). Impact of horizontal geometric design of two-lane rural roads on vehicle CO₂ emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59(January), 46–57.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.020>
- Mandavilli, S., Rys, M., & Rusell, E. (2008). Impact of Modern Roundabouts on Vehicular Emissions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(1), 135–142.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.11.003>
- Martí, A. (1996). *Inyección Electrónica de Motores Diesel*. (MARCOMBO S). Barcelona.
- Martín, F., & Sala, V. (2004). *Estudio comparativo entre los combustibles tradicionales y las nuevas tecnologías energéticas para la propulsión de vehículos destinados al transporte*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- McGrath, M. (2019, September 23). Cambio climático: el preocupante informe científico que alerta de cifras récord en el calentamiento global y de desastres naturales más catastróficos. *BBC News Mundo*. Retrieved from
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-49791588>
- Mendoza, J., & Torras, S. (2008). Efectos ambientales: Análisis paramétrico del submodelo del HDM-4. *Instituto Mexicano Del Transporte*, 110, 1–15.
- Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). Carbon Dioxide Capture and Storage. In *Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 2)*.
<https://doi.org/10.1002/anie.201000431>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Protocolo de Kioto. Retrieved from <https://www.minambiente.gov.co/index.php/convencion-marco-de-naciones-unidas-para-el-cambio-climatico-cmnucc/protocolo-de-kioto>
- Ministerio de Ecología Desarrollo Sostenible y Energía. (2012). *Évaluation environnementale des projets de gestion dynamique de trafic*. Francia.
- Ministerio de Educación de la República de Cuba. (2010). Caracterización de Crudos. *Manual El Petróleo y Derivados*, 1–65. Retrieved from
<http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2428.pdf>
- Ministerio de Transporte. (2018). *Transporte en cifras estadísticas*. Bogotá D.C.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Convenio de Ginebra de 1979 sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia. Retrieved from <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/Convenio->

Ginebra.aspx

- National Aeronautics and Space Administration. (2016). Global Climate Change – Vital Signs of Planet. Retrieved March 7, 2020, from <http://climate.nasa.gov/evidence/>.
- Nigiel, C., Kern, J., Atkinson, C., & Nine, R. (2002). Factors affecting heavy-duty diesel vehicle emissions. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 52(1), 84–94. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470755>
- Nobili, F., Bella, F., Llopis, D., Camacho, F., & García, A. (2019). Environmental effects of road geometric and operational features. *Transportation Research Procedia*, 37(September 2018), 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.207>
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2000). *COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport*. Copenhagen.
- Núñez, C., & Pérez, I. (2005). El modelo HDM-4 : descripción y posibilidades de aplicación dentro de un sistema de gestión de carreteras. *Ingeopres*, 135, 16–25.
- Oms. (2005). *Guías de calidad del aire de la OM S relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. 25. Retrieved from http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/
- Ordóñez, A. (2018). Métodos para determinar factores de emisiones de fuentes móviles en el cantón Cuenca. In R. Fierro & A. Ordóñez (Eds.), *La Ingeniería Automotriz clave para el desarrollo sostenible de Ecuador* (Universida). Cuenca-Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Manual del Sector de la Energía: Quema de Combustibles*.
- Orozco, P. (2014). *Motor de combustion interna*. 2, 25.
- Osses, A., & Henríquez, A. (2017). *Modelo de emisiones vehiculares, MODEM* (p. 14). p. 14. Santiago de Chile.
- Parreño Ibañez, S. (2012). *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo diésel*. (INNOVA). Málaga.
- Péres, M., Ruiz, G., Nesmachnow, S., & Olivera, A. (2016). *Optimización evolutiva del tráfico urbano y las emisiones vehiculares*. 8, 44–52.
- Pérez, D. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales. *INNOVA Research Journal*, 2(23), 23–34.

- <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n3.2018.635>
- Posada, J. (2003). *HDM-4: Guía básica para su uso*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Posada, J. (2006). *Evaluación de Proyectos de Inversión en Carreteras con el HDM-4* (Universidad Nacional de Colombia, Ed.). Medellín.
- Posada, J. (2012). *Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pradena, M., & Posada, J. (2007). Análisis de Inversiones en Carreteras Utilizando Software HDM-4. *Revista de La Construcción*, 6, 35–47.
- Rojas, N. Y. (2004). Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel. *Revista de Ingeniería. Universidad de Los Andes*, 20, 58–68. <https://doi.org/10.16924%2Friu.v0i20.421>
- Ruiz, C., & Córdoba, C. (2006). *Caracterización del material particulado en las principales vías del transporte público colectivo y masivo del centro de Bogotá*. Bogota, D.C.
- Santamarta, F. (2014). Transporte y medio ambiente. Retrieved March 5, 2020, from <http://www.ecoportat.net/content/view/full/21489>.
- Sbarato, V., Basan, R., Manzo, P., Ortega, J. E., Campos, M., & Salort, M. R. (1997). *Análisis y Caracterización del Material Particulado*. Córdoba, Argentina. 1–27.
- Semana. (2017, January 20). Cinco efectos visibles del cambio climático en Colombia. *Semana*. Retrieved from <https://www.semana.com/nacion/articulo/efectos-del-cambio-climatico-en-colombia/512637>
- Semarnat. (2009). *Cambio climático Ciencia , evidencia y acciones*. México.
- SEMARNAT. (2006). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares*. 25–34.
- Sentoff, K. M., Aultman-hall, L., & Holmén, B. A. (2015). *Implications of driving style and road grade for accurate vehicle activity data and emissions estimates*. 35, 175–188.
- Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental Ensayo/Essay. *Rev. Salud Pública*, 8(1), 108–117. <https://doi.org/10.1590/S0124-00642006000100010>
- U.S. Department of Transportation. (2016). *Transportation Air Quality, Selected Facts and Figures*. New Jersey.
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación Atmosférica Efectos En La Salud Respiratoria En El Niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111–118.

<https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>

- Unión Europea. (2011). *Comprender los gases de efecto invernadero*. 1–3. Retrieved from http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_es.pdf
- United Nations Climate Change. (2020). ¿Qué es el Acuerdo de París? Retrieved from <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- Universidad Pontificia Católica de Chile. (2010). *Actualización metodológica modern – MODEC para El Gran Santiago*. Santiago de Chile.
- Valencia, D., Muñoz, M., Ramírez, A., Alejandro, L., Jaramillo, B., & Hoyos, C. (2015). *Modelo para la estimación de emisiones vehiculares como herramienta para la gestión ambiental institucional*. 10(1), 1–22.
- World Bank. (2007). *HDM-4 Road Use Costs Model Documentation Version 1.20*. (p. 17). p. 17. Washington, D.C: World Bank Technical Documentation.
- Xunta de Galicia. (2012). Análisis de Gases. Retrieved from <https://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/ANALISIS+DE+GASES.pdf>
- Yao, Z., Wei, H., Perugu, H., Liu, H., & Li, Z. (2014). Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(2), 81–96.
[https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30092-1](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30092-1)
- Zhang, K., & Frey, H. C. (2006). Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), 777–788.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464500>