



EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LOS VEHÍCULOS EN BOGOTÁ.
ESTRATEGIAS DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA SU MITIGACIÓN.

DIANA MELISA ALFONSO CORREDOR

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
SEPTIEMBRE DE 2018

2018



EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LOS VEHÍCULOS EN BOGOTÁ.
ESTRATEGIAS DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA SU MITIGACIÓN.

DIANA MELISA ALFONSO CORREDOR

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Gestión Ambiental

DIRECTOR:

ALBERTO RAMÍREZ GONZÁLEZ, PhD.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.

SEPTIEMBRE DE 2018

2018.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del Director

Bogotá D.C, septiembre de 2018

ARTÍCULO 23, RESOLUCIÓN #13 DE 1946.

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”

Agradecimientos

A Dios, por la oportunidad que me brinda día a día de progresar personal y profesionalmente para ser parte del cambio en la sociedad.

A mis padres y hermana, por apoyarme siempre en cada objetivo y meta que emprendo y por darme fuerzas para continuar, por entenderme en cada momento y por sentirse orgullosos de mí siempre.

A Moni, quien hasta el último momento de su vida, me enseñó a ser fuerte y luchar por cada meta y sueño que me proponga. Por su compañía incondicional hasta el final a pesar de su partida inesperada.

Al profesor Alberto Ramírez, director de la investigación, por su paciencia y sus valiosos e innumerables aportes realizados a lo largo del proceso.

A cada una de las personas que hicieron parte de este proceso y creyeron en mí.

Contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
1. Introducción.....	4
1.1. Problema.....	4
1.2. Justificación.....	10
1.3. Propósito del proyecto y preguntas de investigación	12
2. Objetivos.....	12
2.1. General	12
2.2. Específicos	13
3. Marco de Referencia.....	13
3.1. Marco conceptual	13
3.2. Marco Teórico	16
3.3. Marco Jurídico.....	21
3.3.1. Unión Europea	21
3.3.2. Estados Unidos – México	22
3.3.3. Colombia.....	23
3.4. Antecedentes	25
3.4.1. Antecedentes Internacionales.....	25
3.4.2. Antecedentes Nacionales	27

4. Área de Estudio	31
5. Materiales y métodos.....	35
5.1. Diagrama de flujo.....	37
5.2. Métodos de análisis de datos	38
6. Resultados y Discusión de Resultados	39
6.1. Capítulo 1: Dinámica de Vehículos matriculados en Bogotá	39
6.2. Capítulo 2: Normatividad Nacional e Internacional relacionada con la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles.	47
6.3. Capítulo 3: Caracterización de la problemática de calidad del aire por material particulado en Bogotá.....	64
6.4. Capítulo 4: Estrategias de Gestión Ambiental para la reducción de material particulado.	
75	
7. Conclusiones.....	81
8. Recomendaciones	85
9. Referencias	86

Índice de Tablas

Tabla 1: Venta de vehículos en Colombia	40
Tabla 2: Vehículos matriculados en Bogotá (Acumulados 2002-2016).....	41
Tabla 3: Venta de Vehículos en Bogotá.	44
Tabla 4: Valor límite para PM2.5 establecido por la UE.....	49
Tabla 5: Límites permisibles Unión Europea	50
Tabla 6: Límites de emisiones por contaminante en la Unión Europea expresadas en ppb.	50
Tabla 7: Estándares de compartimientos Nivel 3. Estados Unidos.	51
Tabla 8: Límites de contaminantes en Estados Unidos para Vida Intermedia	52
Tabla 9: Límites de contaminantes en Estados Unidos para Vida Útil Completa	52
Tabla 10: Límites máximos de emisión permisibles para vehículos con motores a gasolina, vehículos biocombustibles con motores a gasolina, gas natural vehicular o gasolina – GPL.	54
Tabla 11: Máximos niveles de emisión permisibles para motocicletas, motociclo o mototriciclo.	55
Tabla 12: Límites máximos de opacidad permisibles para vehículos accionados con diésel (ACPM) en aceleración libre.	56
Tabla 13: Límites máximos de opacidad permisibles para vehículos accionados con diésel (ACPM) para el sistema público de transporte	59
Tabla 14: Límites máximos de emisiones permisibles para motores ciclo Otto, accionados con Gas Natural o Gas Licuado de Petróleo, de vehículos pesados, evaluados mediante ciclo de la Unión Europea (ETC) en (g/kw- h).	60

Tabla 15: Límites máximos de emisiones permisibles para motores ciclo diésel de vehículos pesados, evaluados mediante ciclos de la Unión Europea (ESC y ELR) en (g/bhp-h)	60
Tabla 16: Límites máximos de emisión permisibles para motores ciclo diésel de vehículos pesados, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos (Ciclo Transitorio de Servicio Pesado y ciclos complementarios) (g/bhp-h)	60
Tabla 17: Niveles máximos permisibles para material particulado PM _{2,5} , PM ₁₀ y PST (ppb).....	61
Tabla 18: Niveles máximos permisibles de PM para el año 2030	62
Tabla 19: Normatividad de Emisión de Partículas	63
Tabla 20: Normatividad de Calidad del Aire en ppb (Europa Vs Estados Unidos Vs Colombia Vs OMS).....	63
Tabla 21: Ubicación Geográfica de las Estaciones de la RMCAB.....	65
Tabla 22: Estaciones con mayor contaminación de PM10	66
Tabla 23: Estaciones con mayor contaminación de PM2.5	67

Índice de Gráficas

Gráfica 1: Venta de Vehículos de Transporte Público en Colombia	40
Gráfica 2: Venta Total de Vehículos en Colombia.....	41
Gráfica 3: Vehículos Públicos Matriculados en Bogotá (Acumulado 2002-2016)	42
Gráfica 4: Vehículos Totales Matriculados en Bogotá (Acumulado 2002-2016)	43
Gráfica 5: Población Vs. Acumulado de Vehículos Matriculados en Bogotá.....	44
Gráfica 6: Venta Total de Vehículos en Bogotá.	46
Gráfica 7: Comportamiento Horario de PM_{10}	69
Gráfica 8: Comportamiento Mensual de PM_{10}	71
Gráfica 9: Comportamiento Horario de $PM_{2,5}$	72
Gráfica 10: Comportamiento Mensual de $PM_{2.5}$	73

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Ubicación Geográfica de Bogotá.....	32
Ilustración 2: Comportamiento de los vientos en Bogotá.....	34
Ilustración 3: Mapa de Promedio de concentraciones por PM ₁₀ en cada estación	66
Ilustración 4: Mapa de Promedio de concentraciones por PM _{2.5} en cada estación	67

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Reacción Global en Combustión	17
Ecuación 2: Reacción de gasificación.....	17
Ecuación 3: Reacción Fase Gaseosa	17

Acrónimos

AQI: Air Quality Index (Índice de Calidad del Aire)	NMOG: Nonmethane Organic Gas (Gases Orgánicos no metálicos)
BM: Banco Mundial	NOM: Norma Oficial Mexicana
CAD: Centro de Diagnóstico automotor	NO_x: Óxido de Nitrógeno
CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales	ODS: Objetivo del Desarrollo Sostenible
CO: Monóxido de carbono	OMS: Organización Mundial de la Salud
CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social	OPS: Organización Panamericana de la Salud
DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística	PDDAB: Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá
DNP: Departamento Nacional de Planeación	PIB: Producto Interno Bruto
EGR: Exhaust Gas Recirculation (Recirculación de Gases de Escape)	PM: Particulate Matter (Material Particulado)
EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección del Medio Ambiente)	ppb: Partes por Billón
EPOC: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica	PREAD: Programa de Excelencia Ambiental Distrital
ERA: Enfermedad Respiratoria Aguda	PST: Partículas Suspendidas Totales
g/bhp-h: Grames per brake horsepower-hour (Gramos/caballos de fuerza al freno-hora)	PTD: Pérdida Total por Daños
g/kw-h: Grams per kilowatt-hour (Gramos por Kilowatio-hora)	RMCAB: Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
GEI: Gases de Efecto Invernadero	SCR: Reducción Catalítica Selectiva
GLP: Gas Licuado de Petróleo	SDA: Secretaría Distrital de Ambiente
GN: Gas Natural	SDM: Secretaría Distrital de Movilidad
GVWR: Gross Vehicle Weight Rate (Peso Bruto Nominal)	SO₂: Dióxido de azufre
HC: Hidrocarburos	THC: Total Hydrocarbons (Hidrocarburos Totales)
IBOCA: Índice Bogotano de Calidad del Aire	UE: Unión Europa
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	µm: Micrómetros
IRA: Infecciones Respiratorias Agudas	UNECE o ECE: United Nations Economic Commission for Europe (CEPE: Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa)
LPG: Liquefied Petroleum Gases (GPL: Gas Licuado de Petróleo)	
MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	
mg/mi: Miligramos por millas.	

Resumen

Esta investigación abarca uno de los principales problemas ambientales, que ha tenido que enfrentar la humanidad. La contaminación atmosférica vista en diferentes perspectivas de autores y en diferentes ciudades del mundo, y bajo la cual, en la actualidad surgen diversos problemas de la salud con grandes implicaciones ambientales. Para lograr entender de fondo la magnitud de dicha problemática, se realizó una revisión documental de la calidad del aire en diversas ciudades con el fin de establecer una línea base mundial. Seguido a esto, se contextualizó el estado actual que vive Colombia, específicamente Bogotá, que se determinó como el área de estudio para la investigación.

De esta manera, se realizó, a partir de la recolección de información secundaria reportada por diferentes entidades, el análisis del estado y de la dinámica actual de la flota vehicular de la ciudad con el fin de establecer una relación directa con el crecimiento poblacional en la última década. Obteniendo así que el mayor aportante frente a las emisiones de material particulado se encuentra relacionado con el transporte público de la ciudad, adicionalmente, se evidenció que la ciudad se encuentra en un punto de saturación con relación a las ventas de vehículos en los últimos años.

Seguido a esto, se comparó cualitativa y cuantitativamente, la normatividad nacional e internacional relacionada con la contaminación atmosférica generada por las fuentes móviles. Una vez obtenida dicha información, se caracterizó la problemática actual de la calidad del aire por material particulado en las estaciones con mayor contaminación en Bogotá, dando como resultado que estas se encuentran principalmente en la zona occidental de la ciudad. En tanto la meteorología presente en la zona influye directamente en la dispersión de contaminantes toda

vez que el flujo de viento predominante se desplaza de oriente a occidente, transportando los contaminantes que se generan en el oriente de la ciudad.

Finalmente, se analizaron las estrategias de Gestión Ambiental actuales implementadas en la ciudad y se plantearon nuevas estrategias para reducir los niveles de contaminación atmosférica por material particulado. Dentro de ella se encuentra el incentivo del carro compartido, la adecuación de la malla vial y la reconversión de tecnologías en los vehículos de transporte público y privado con el fin de garantizar una óptima reducción de las emisiones de material particulado para garantizar el mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá. Igualmente, con la adecuación de la malla vial se pretende mejorar la velocidad media de circulación de los vehículos que se traduce en la reducción de emisiones por material particulado.

Palabras Clave: contaminación atmosférica, calidad del aire, fuentes móviles, red de monitoreo de calidad del aire, material particulado, estrategias de gestión.

Abstract

This research covers one of the main environmental problems that the whole humanity has had to face. Air pollution seen from different perspectives of authors and in different cities of the world, and under which, currently, health problems with great environmental implications arise. To understand completely the magnitude of this problem, it was carry out a documentary review of the air quality in several cities, in order to establish a global baseline. Following this, it was contextualized the current state of Colombia, specifically Bogotá, which was determined as the area of study of the research.

In this way, was obtained from the collection of secondary information from different institutes, it was analyzed the status and current dynamics of the vehicle fleet, in the city, in order to establish a direct relationship with Population growth in the last decade. It was obtained that the largest contributor to the emissions of particulate matter is related to public transport in the city.

Following this, the national and international regulations for the atmospheric pollution generated by mobile sources were compared qualitatively and quantitatively. Once this information was acquired, it was characterized the current problem of air quality due to the particulate material in the most polluted stations in Bogotá. It was found that these are found mainly in the western part of the city. While meteorology present in the area directly influences the dispersion of pollutants that are discharged in the east of the city.

Finally, the current Environmental Management strategies implemented in the city were analyzed and new strategies were proposed to reduce the levels of air pollution by particulate matter. Within it is the incentive of the shared car, the adequacy of the road network and the reconversion of technologies in public and private transport vehicles in order to ensure an optimum reduction of particulate matter emissions to ensure the improvement of the air quality in Bogotá. Likewise, with the adaptation of the road network, the aim is to improve the average speed of vehicle circulation, which translates into the reduction of emissions by particulate material.

Keywords: air pollution, air quality, mobile sources, red air quality monitoring, particulate material, management strategies.

1. Introducción

1.1. Problema

Con el paso de los años, el ser humano a través de sus prácticas cotidianas que están relacionadas en gran medida con el desarrollo industrial, ha llevado a un deterioro gradual del ambiente. Adicionalmente, y teniendo en cuenta el rápido crecimiento demográfico en el mundo, la necesidad de utilizar los recursos naturales se ha venido incrementando de manera acelerada; generando, en mediano y largo plazo, consecuencias que ponen en riesgo la supervivencia de la población mundial. Este incremento demográfico, y el uso desproporcionado de los recursos, han ocasionado problemas ambientales en torno a la satisfacción de las necesidades de la población humana.

Con la revolución industrial, las grandes ciudades se convirtieron en polos de atracción poblacional al ser la fuente de desarrollo. Esta situación ha requerido el uso intensivo de combustibles fósiles, y derivado en la construcción de centros urbanos densamente poblados que demandan constantemente no solamente de recursos alimenticios, por ejemplo, la ganadería extensiva que atiende estas necesidades ha sido un factor que incrementa el uso de recursos y la liberación de gases contaminantes especialmente en las zonas rurales.

Chow et al. (2004, citado por Franco, 2012), definen que el incremento de la contaminación atmosférica se encuentra relacionada con las economías de los países en desarrollo, y éstas se encuentran en constante cambio, hasta encontrar un punto de equilibrio. Podemos inferir que, dichos países mantienen gran parte de los recursos naturales, pero, sin embargo, tienen la necesidad de incursionar en diversos mercados, hasta el punto de comprometer el medio ambiente para su posterior transformación.

Producto de esto nos encontramos con un alto nivel de contaminación en torno a las diferentes actividades realizadas por el hombre. Una de las causas fundamentales de la contaminación atmosférica ha sido el acelerado crecimiento poblacional, en tanto este se ve relacionado con el aumento de: la industria, flota vehicular y emisiones per capital.

La movilidad sin duda es uno de los mayores desafíos que debe afrontar una ciudad que se encuentra en constante crecimiento. El incremento en los últimos 500 años del número de barcos, trenes, autos y aviones, representa la necesidad del ser humano en movilizarse. Sin embargo, este avance no contempló problemas de tipo cultural, planteamiento de nuevas políticas, normas o infraestructuras necesarias para mejorar las velocidades de desplazamientos y el monitoreo del impacto ambiental del incremento en la flota vehicular, entre otros (Cabrera-Arana et al., 2015).

Diversos autores se han referido al tema de la calidad del aire en las ciudades y es así que Mayer (1999) afirma que el grado de contaminación de los centros urbanos, se incrementa debido a la combinación entre el aumento de la población y el cambio del uso de la tierra para incrementar las áreas urbanas.

En este sentido, Rojas (2007) argumenta que dentro de los factores que determinan la calidad de vida de un centro urbano, se encuentra la calidad del aire a la que se ve enfrentada la población. De acuerdo con lo mencionado por Pérez (2017), se encuentra comprobado que la presencia de contaminantes en el aire incide de manera directa en la salud de las personas, de los animales y de las plantas afectando la calidad de vida de estos. Principalmente, los contaminantes que se encuentran asociados en mayor proporción con los efectos sobre la salud humana son: el material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10} y partículas suspendidas), el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre, el ozono troposférico y el monóxido de carbono.

Adicionalmente, Duarte (2010) menciona que en Bogotá se detectan niveles altos y persistentes de material particulado (PM) generados por fuentes móviles que afectan la salud de las personas y disminuyen la calidad de vida. Estos niveles de contaminación generan efectos cuantificados y no cuantificados en la calidad de vida, los cuales pueden ir desde afectaciones pulmonares hasta cáncer que puede conllevar a la muerte.

De acuerdo con Pachón & Sarmiento (2008), es importante conocer las características y composición química de los contaminantes presentes en el aire desde el punto de vista epidemiológico y técnico, para comprender con mayor claridad y determinar el potencial efecto que tengan dichos contaminantes sobre la salud humana que a su vez disminuyen la calidad de vida de las personas, en cuanto la salud se ve directamente afectada por la composición química de los contaminantes presentes en el aire.

Debido a esto, se han generado preocupaciones acerca de las soluciones que pueden implementarse en el mediano o corto plazo para lograr la reducción de las emisiones contaminantes que incrementan los gases efecto invernadero, con el fin de cumplir los objetivos climáticos propuestos para el 2025 en la cual se busca “la neutralidad de carbono”. Teniendo en cuenta esto, países como Alemania, España, Francia, India, Países Bajos, Noruega, entre otros, han propuesto la reducción significativa de las emisiones de CO₂ en el transporte, obteniendo así que para el 2030, todos los vehículos que circulen deben ser eléctricos. Asimismo, y basándose en que en promedio la vida útil de un automóvil es de cerca de 20 años, se lograría cumplir la meta de reducción entre el 80 y 95% de las emisiones para el año 2050 (Jiménez, 2016).

Se debe agregar que, los problemas que genera la contaminación atmosférica son diversos y van desde la afectación de la salud humana hasta la modificación del clima, los cuales se manifiestan en diferentes escalas tanto espaciales como temporales. Teniendo en cuenta lo

mencionado anteriormente, es posible considerar que el tema de la contaminación del aire es complejo e involucra muchos aspectos que se encuentran interrelacionados entre sí (Barreto, 2015). Además, es necesario tener en cuenta que se deben entender y considerar aspectos tanto sociales, económicos y normativos como de política pública para lograr articularlos, generando resultados contundentes frente a la disminución de la contaminación atmosférica.

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2014, citado por Taborda 2017), en 2012 unos siete millones de personas murieron en el planeta como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica. Teniendo en cuenta estas cifras, la alarma global motivó a que el tercer Objetivo del Desarrollo Sostenible (ODS) se enfocara principalmente en la salud y el bienestar humano. Preocupados por dichas cifras, la meta adoptada por todos los países del mundo, se basó en la reducción sustancial del número de muertes y enfermedades a nivel global para el año 2030 (Taborda, 2017).

Las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, ya sea por ozono, dióxido de nitrógeno y material particulado, conllevan a graves riesgos en la salud humana. Las altas exposiciones generan efectos tales como enfermedades crónicas, abarcando desde afecciones del sistema respiratorio hasta la muerte prematura. La exposición al material particulado “respirable” (menores a 10 micras) y “fino” (menores a 2,5 micras) generado principalmente por los procesos de combustión de materiales fósiles, se considera como la razón principal de morbilidad y mortalidad por contaminación del aire (Martínez et al., 2011).

Adicional a esto, la contaminación del aire puede ocasionar o agravar afecciones respiratorias crónicas como el asma, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y las enfermedades cardiovasculares (Martínez et al., 2011). Las muertes prematuras, alergias y la

reducción en la tasa de respiración máxima en niños, son efectos de la exposición a material particulado (Legarreta et al., 2015).

Partiendo de que existen diversas fuentes de contaminación que alteran la calidad del aire de un centro urbano, Rojas (2007) plantea que la contaminación debe ser analizada desde dos escalas que logren diferir en el impacto y en el tipo de contaminantes. Establece que en los “impactos a escala global” se consideran los gases de efecto invernadero y los gases destructores de ozono estratosférico que, generan cambios en los patrones climáticos y la destrucción de la capa de ozono. Ahora bien, la segunda escala que debe ser considerada se encuentra relacionada con los “impactos a escala local” los cuales son generados por los denominados “contaminantes criterios” tales como: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 µm (PM₁₀) (Teyler et al, 2013).

Además de éstos, se incluye al CO₂ (dióxido de carbono) por su aporte al efecto invernadero. Estos contaminantes criterios son los causantes de una mala calidad del aire en las ciudades, complementando así la idea presentada por Riojas-Rodríguez et al. (2014).

Por otro lado, una fuente responsable de la contaminación en los principales centros urbanos se relaciona directamente con la combustión que se presentan en los motores diésel, los cuales son utilizados en transporte, agricultura y generación de energía. Las emisiones generadas del proceso de combustión interno incrementan los problemas en la salud de la población y el efecto invernadero. Partiendo de lo mencionado, cada día las exigencias frente al desarrollo de los motores son mayores con el fin de conseguir mayor eficiencia y limpieza frente a las emisiones generadas (García et al, 2013).

De igual manera se han desarrollado diferentes tecnologías como ACERT™ (Tecnología Avanzada de Reducción de Emisiones de Combustión) exclusiva de Caterpillar, la de Recirculación de Gases de Escape (EGR, por sus siglas en inglés) y la de Reducción Catalítica Selectiva (SCR) que contribuyen a emitir una concentración menor de material particulado y óxidos de nitrógeno con un alto rendimiento de combustible.

Bogotá, al ser una de las principales ciudades de América Latina, no es ajena a la contaminación atmosférica. El crecimiento exponencial que ha vivido la capital colombiana durante los últimos 50 años, ha generado una demanda también exponencial de los recursos naturales (Franco, 2012). Sumado a esto, las estrategias que presentan actualmente el Estado y específicamente la Administración Distrital frente a la movilidad en la ciudad, y el uso de mecanismos limpios para descontaminar el aire, no son suficientes para mejorarlo y cambiar la perspectiva que tiene la población actual sobre éste.

Para el caso particular de Bogotá, desde 1997 la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) ha hecho seguimiento constante a las concentraciones de los contaminantes, proporcionando información en tiempo real sobre las condiciones ambientales en las diferentes zonas de la capital. Dicha información ha permitido establecer en qué zonas se concentra la mayor cantidad de partículas contaminantes para plantear acciones eficientes de mejoramiento de la calidad del aire.

De acuerdo con Rojas (2007), existen espacios específicos en donde se crea un ambiente diferente al propio de la zona conocidos como “microambientes”. Estos se presentan en espacios donde confluyen en mayor proporción población y diferentes fuentes de emisión que circulan por la zona. Las personas que se encuentran presentes se ven expuestas a altas concentraciones de material particulado cada vez que un vehículo pasa o arranca en el carril aledaño. Esta situación

genera que existan diferencias entre las concentraciones de contaminantes medidas por la RMCAB y las medidas en los microambientes de una zona determinada.

Ortiz & Rojas (2013) mencionan que de llevar la concentración de material particulado al cumplimiento normativo nacional entre 2010 y 2020, se reducirían aproximadamente 13.000 casos de mortalidad, 28.000 hospitalizaciones por causas respiratorias en niños menores de 5 años y 5.500 atenciones en cuidado intensivos relacionados con las altas concentraciones de partículas, lo que le representaría a Bogotá beneficios monetarios alrededor de los 16 billones de pesos en dicho periodo de tiempo.

1.2. Justificación

El aumento en el material particulado que ocasiona la baja calidad en el aire de una ciudad como Bogotá, la cual alberga a 8.080.734 de personas (DANE, 2017), es una problemática ambiental que actualmente pone en riesgo no sólo la salud de las personas, sino la sostenibilidad de los sistemas de salud y aseguramiento.

La pérdida de la calidad del aire por la contaminación atmosférica genera problemas de salud pública, teniendo en cuenta que se presentan enfermedades respiratorias cada vez más evolucionadas y difíciles de tratar. El Departamento Nacional de Planeación (DNP, citado por Betancur, 2017) actualizó y estimó que los costos en salud asociados a la degradación ambiental en el país para el año 2015 ascienden a \$20,7 billones de pesos, lo que equivale aproximadamente al 2,6% del PIB para ese año en donde el DNP reporta que el mayor impacto se relaciona con la contaminación del aire urbano, aportando el 75% de los gastos. Dentro de estos costos asociados por degradación ambiental se contempla que 1,6 billones de pesos son destinados a enfrentar problemas generados en la salud humana por la mala calidad del aire.

Estos costos se ven representados en la atención en síntomas respiratorios, bronquitis crónica y enfermedades de las vías respiratorias inferiores en niños, entre otras (Betancur, 2017).

De igual manera, y de acuerdo al reporte presentado por el DNP, la mayoría de muertes y enfermedades asociadas a la degradación ambiental son de tipo respiratorio, cáncer, cardiovasculares e infecciones intestinales.

Hay que mencionar, además que de acuerdo al reciente reporte del IDEAM (2016), las zonas del país en las que se presentan mayor cantidad de material particulado, se enfocan en el suroccidente de Bogotá y en el área metropolitana del valle de Aburrá, en Antioquia. Otro rasgo importante a resaltar se enfoca principalmente en que para el año 2015, las muertes relacionadas con la polución del aire urbano se incrementaron en 10.527 y las relacionadas con la contaminación intra-mural aumentaron en 2.286 muertes con respecto a años anteriores. (Departamento Nacional de Planeación, 2017). Sin embargo, las cifras mencionadas anteriormente fueron superiores a las estimadas en 2010 por el Banco Mundial (BM), el cual calculó en cerca de 6.000 las muertes asociadas a la contaminación del aire en Bogotá (Betancur, 2017). Para el caso específico de esta ciudad, el 10,5% de las muertes se relacionaron directamente con este factor, lo que representó para la capital un costo de 4,2 billones de pesos anuales.

Por otro lado, la capital de Colombia actualmente presenta falencias frente a la normatividad en torno a la calidad del aire. Si bien existe una normatividad que regula los niveles permisibles de emisión de contaminantes, ésta requiere una actualización y modificación con el fin de garantizar tanto la reducción de la contaminación atmosférica como la salud de millones de habitantes que residen en la capital.

Actualmente la calidad del aire en Bogotá, es considerada como “buena” al no superar los límites permisivos estipulados en la normatividad según lo mencionado por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) para el Periódico El Tiempo en 2016. Sin embargo, es claro que es momento de pensar en realizar una modificación a la normatividad frente al tema, considerando que actualmente esta normatividad es laxa y las estrategias de gestión ambiental actuales no son suficientes para mejorar la calidad del aire. Así mismo, el incremento del parque automotor, los carros chimeneas y la concentración de partículas contaminantes, requiere de normatividad más estricta y exigente frente a las emisiones generadas para evitar un incremento mayor en la contaminación del aire y en las enfermedades derivadas de ésta (IDEAM, 2012).

1.3. Propósito del proyecto y preguntas de investigación

Teniendo en cuenta la problemática y la justificación mencionada anteriormente, el presente trabajo de investigación buscará presentar estrategias de gestión que sirvan de insumos para el mejoramiento de la calidad del aire de Bogotá y a su vez lograr solucionar una problemática que por años ha afectado a millones de personas, y de la cual poco se ha logrado avanzar. Considerando lo expuesto anteriormente, esta investigación se centrará principalmente en evaluar ¿cuál es el grado de afectación de la calidad del aire de Bogotá, principalmente por las emisiones de material particulado provenientes de las fuentes móviles que transitan en la ciudad?

2. Objetivos

2.1. General

Analizar la contaminación por material particulado proveniente de los vehículos en la ciudad de Bogotá y plantear nuevas estrategias para su mitigación

2.2. Específicos

- Evaluar y analizar la dinámica de vehículos matriculados en Bogotá durante los últimos 10 años.
- Comparar la normatividad nacional relacionada con la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles con la normatividad internacional con el fin de tener un referente normativo.
- Caracterizar la problemática de calidad del aire por material particulado en las tres estaciones que registran mayor contaminación en Bogotá
- Plantear estrategias de Gestión Ambiental que permitan la disminución de la contaminación atmosférica por material particulado.

3. Marco de Referencia

3.1. Marco conceptual

Para entender una de las problemáticas que actualmente cobra millones de vidas en el mundo, es necesario conocer que la *contaminación atmosférica* está relacionada con la presencia de sustancias en la atmósfera que causan daños, molestias o ponen en riesgo la salud de los seres vivos. Estas sustancias como el dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, por lo general, son producto de los procesos industriales que implican la combustión, tanto en industrias como automóviles y calefacciones residenciales (“Contaminación atmosférica,” s.f.).

El aumento de la contaminación atmosférica se ve relacionada con los *Gases Efecto Invernadero* (GEI) los cuales se encuentran definidos como los gases resultantes derivados de las diferentes actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Pandey et al., 2010; Wiedmann, 2009; citados por Espíndola & Valderrama, 2011). Estos gases forman una capa

permanente en la atmósfera que impide que la radiación solar devuelta por la tierra pueda salir de ésta, generando un aumento en la temperatura (Espíndola & Valderrama, 2011).

El *material particulado* (PM por sus siglas en inglés) es un contaminante atmosférico que denota la mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran presentes en el aire y ocasionan problemas ambientales y en la salud de las personas. El PM se puede clasificar en dos (2) tipos de acuerdo al tamaño de las partículas. En primera medida se encuentran las partículas menores a 10 micrómetros (μm) conocidas como material particulado PM_{10} , y aquellas partículas con un diámetro menor a 2,5 micrómetros (μm) son las conocidas como $\text{PM}_{2,5}$; unas y otras varían respecto a su concentración y composición química según el tiempo y lugar (Suárez-Salas et al., 2017).

La exposición al material particulado causa enfermedades en la salud humana que pueden conducir a la muerte. La *Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica* (EPOC) es una enfermedad pulmonar progresiva, con un alto potencial mortal que puede causar disnea (OMS, 2016). Esta enfermedad se caracteriza por la reducción persistente del aire, donde la principal causa de la EPOC es la exposición al humo del tabaco; sin embargo, un factor importante que puede ocasionar este tipo de enfermedad es la exposición al aire contaminado y de acuerdo al Ministerio de Salud (s.f) esta enfermedad actualmente es la cuarta causa de mortalidad en el mundo.

De otro lado, se presentan otro tipo de enfermedades asociadas a la contaminación del aire. El Ministerio de Ambiente (s.f) establece que las *Infecciones Respiratorias Agudas* (IRA) se presentan en el aparato respiratorio por la presencia de microorganismos como virus y bacterias que atacan repentinamente a éste. Es la enfermedad de mayor frecuencia en el mundo y

la principal causa de mortalidad infantil representando un problema de salud pública para el país (Ministerio de Salud - MinSalud, s.f.).

Asociado a esto, las *Enfermedades Respiratorias Agudas* (ERA) presentan un comportamiento similar a las enfermedades de IRA, las cuales se encuentran estrechamente relacionadas a episodios de presencia de bacterias o virus en el sistema respiratorio, en donde son adquiridas por el aire o por el contacto con personas enfermas. Así como las enfermedades relacionadas con IRA, éstas son la causa más frecuente de morbilidad y mortalidad en niños menores de 5 años en todo el mundo (Organización Panamericana de la Salud – OPS-, Organización Mundial de la Salud –OMS-, 2012).

Asociado a esto, las fuentes de contaminación tienen una influencia directa sobre la calidad del aire de una ciudad o municipio, la cual es un indicador que permite conocer el porcentaje que se encuentra exento de contaminación o polución asociada a las diversas actividades en una zona determinada.

En el marco de este estudio se hará referencia con frecuencia a las diferentes fuentes de contaminantes del aire de la ciudad. En primer lugar, *fuentes móviles* se encuentra asociado al tráfico vehicular, y bajo el cual surgen diversos tipos de contaminantes generados por la transformación de los diferentes tipos de combustibles para su adecuado funcionamiento (Londoño-Ciro et al., 2017). Paralelamente, existen otras fuentes de contaminación que alteran la calidad del aire de una ciudad como son las *fuentes fijas* que hacen alusión a la actividad industrial.

Conociendo las principales fuentes de contaminación de una ciudad, es posible calcular el *Índice de Calidad del Aire* (AQI por sus siglas en inglés) el cual es definido por el

IDEAM (2012) como una herramienta que permite comparar los niveles de contaminación del aire de las diversas estaciones de monitoreo que conforman un Sistema de Vigilancia del Calidad del Aire en un determinado tiempo. De igual manera, este indicador se enfoca en los efectos de salud que pueden presentarse en los diferentes centros urbanos después de respirar unas horas o días el aire contaminado. Tal índice es utilizado por las agencias ambientales estatales de diversos países, para informar oportuna y fácilmente al público sobre la calidad del aire local (“Contaminación atmosférica,” s.f).

3.2. Marco Teórico

De acuerdo a Lavoisier (1775) citado por Liñan (2002) la *combustión* es la acción o efecto de arder o quemar, mediante una reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama. Adicional a esto, la combustión ocurre generalmente en fase gaseosa, entre un combustible (como el carbón, los hidrocarburos líquidos o el gas natural) y el oxígeno del aire.

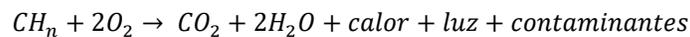
La combustión interna es un proceso que se genera dentro de los motores de los vehículos, que consiste en que la mezcla carburante se quema dentro del cilindro para producir el trabajo mecánico requerido (Giraldi, 1985). Así mismo, la combustión del combustible y del aire es generada por una chispa eléctrica en los motores a gasolina, a queroseno y a gas, o por autocombustión en los motores de Diésel (Giraldi, 2007).

Para la combustión del gasóleo generada en los motores Diésel, principalmente tiene lugar una autoinflamación al entrar el combustible en contacto con el aire caliente comprimido, generando que el retraso en la autoinflamación sea el más pequeño posible para obtener altos regímenes del motor. Por el contrario, el proceso generado en los motores a base de gasolina,

tiene lugar por propagación de una ignición local en una mezcla reactiva, con el objetivo de que el retardo en la autoinflamación sea mayor que el tiempo que tarda en propagarse la llama para evitar que ésta llegue a inflamarse antes de la llegada del frente de llama (Martínez, 1995).

De esta manera, se presenta la reacción global que se origina en la combustión, la cual se presenta en la Ecuación 1:

Ecuación 1: Reacción Global en Combustión

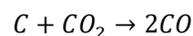
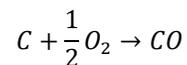


En donde los contaminantes generados hacen referencia a:

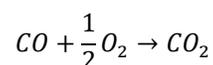
- Partículas (Hollín y cenizas)
- Hidrocarburos sin quemar
- NO_x (óxido de nitrógeno)
- SO₂ (dióxido de azufre)
- CO (monóxido de carbono)

Asimismo, la combustión de carbono se surte en diferentes etapas las cuales involucran la reacción de la gasificación (Ecuación 2) y la reacción de la fase gaseosa (Ecuación 3).

Ecuación 2: Reacción de gasificación



Ecuación 3: Reacción Fase Gaseosa



Para conocer la calidad del aire atmosférico y establecer estrategias para la reducción de la contaminación es necesario monitorear y determinar la concentración de los contaminantes como un indicador ambiental (Manzur et al., 2012).

Partiendo de lo anterior, los *modelos de dispersión de contaminantes* resuelven las ecuaciones de difusión para simular la dispersión y el nivel de contaminación (Sanín, 2002, citado por (Manzur et al., 2012). Existen diferentes tipos de modelos de dispersión de contaminantes, entre los cuales se destacan el *modelo de dispersión gaussiana* el cual considera los contaminantes emitidos por una chimenea en un punto determinado (Manzur et al., 2012). Por otro lado, el *modelo numérico* tiene mayor aplicación para estimar la concentración por fuentes múltiples, las cuales emiten contaminantes reactivos, sin embargo, para este modelo se requiere mayor información y recursos computacionales (Casas et al., s.f).

Asimismo, Casas et al. (s.f) establecen que la aplicación del *modelo estadístico* es adecuada cuando no se conocen claramente los procesos físicos y químicos involucrados en las fuentes de estudio. Estos modelos de predicción de las emisiones en la calidad del aire están basados en modelos matemáticos, considerando la complejidad de los procesos de transporte de contaminantes, especialmente cuando estos son químicos.

De esta manera, para determinar la dispersión de los contaminantes en fuentes móviles existen diversos modelos que permiten estimar las emisiones generadas por las fuentes móviles. Entre estos se destacan el *modelo IVE* el cual fue diseñado para evaluar las condiciones ambientales de las fuentes móviles que operan en las ciudades. Este modelo fue aplicado con éxito en ciudades como Los Ángeles, Santiago, Kajastán, Nairobi, entre otras (Lovera et al., 2004).

Por otro lado, es importante considerar los factores que inciden en la calidad del aire provenientes del flujo vehicular, los cuales dependen de una multitud de factores que afectan directamente su estimación, toda vez que se establece que no existen dos vehículos que emitan la misma cantidad de gases contaminantes (Gasteiz, 2017 citado por Berdugo & Ramírez, 2016).

Entre los factores a considerar se encuentran:

- 1) Factores propios del vehículo como la tipología del motor, la antigüedad, el peso, el combustible que utiliza, el grado de sincronización y la velocidad en que circula.
- 2) Factores externos como la del trayecto, la congestión, el tipo de pavimento de la vía, la altitud y la temperatura ambiente.
- 3) Factores personales como la forma de conducir y la longitud de los recorridos.

De esta manera, Gasteiz (2017, citado por Berdugo & Ramírez, 2016) refiere que por la numerosidad de los factores mencionados anteriormente, es casi imposible un cálculo determinado de las emisiones producidas por el tráfico de vehículos y se ha optado por una estimación a partir del máximo número de factores posibles.

Asimismo, Rojas (2007) establece que los vehículos impulsados por *motores diésel* son la fuente de mayor impacto sobre la exposición de una fracción importante de la población a altas concentraciones de material particulado. Estos vehículos son los responsables del 80% de las emisiones de material particulado, 60% de las emisiones de óxidos de nitrógeno, 65% de las emisiones de óxidos de azufre y, atípicamente, 50% de las emisiones de monóxido de carbono.

Entre los factores de mayor impacto en las emisiones producidas en estos motores están relacionadas con:

- Contenido de azufre del combustible diésel

- Ausencia de tecnologías de control de emisión
- Motores con tecnologías obsoletas
- Mal mantenimiento
- Problemas de diseño y mantenimiento de vías

Para el caso de los *vehículos a gasolina*, estos contribuyen con cerca de 50% de las emisiones de monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, y 40% de óxidos de nitrógeno. Adicional a esto, tienen, una responsabilidad importante en la emisión de promotores de smog fotoquímico, lo cual está vinculado a los siguientes factores:

- Obsolescencia tecnológica
- Movilidad reducida
- Utilización de etanol en la gasolina
- Falta de controles de emisión

De otra manera, existen las *motocicletas con motores de dos tiempos*, las cuales son una fuente significativa de contaminantes teniendo en cuenta que son responsables de cerca del 17% de las emisiones de material particulado de fuentes móviles, siendo la fuente móvil más importante después de los buses y los camiones con motor diésel y el 20% de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (Rojas, 2007). Esto se debe a la baja eficiencia de combustión, a la necesidad de mezclar la gasolina con el aceite lubricante en estas tecnologías, y al importante incremento en el número de motocicletas en circulación, promovido por los bajos precios de estos vehículos.

Finalmente, Rojas (2007) menciona que existen *motores a gas natural*, los cuales han sufrido una conversión a partir de los motores que originalmente fueron diseñados para operar

con gasolina. Por tal razón, las emisiones generadas por los mencionados motores, podrían exceder incluso las emisiones del vehículo original a gasolina. El desempeño en este tipo de motores es inferior al de los vehículos dedicados a gas natural, es decir, los que desde la fábrica vienen diseñados para el uso de gas natural.

3.3. Marco Jurídico

3.3.1. Unión Europea

La problemática de la calidad del aire en Europa es un tema que sin duda genera una alta preocupación en la población y en los gobiernos en general. De acuerdo a la información presentada por la Agencia Europea de Medio Ambiente de Europa (2010), las emisiones de muchos contaminantes se han reducido significativamente durante las últimas décadas. Sin embargo, las concentraciones de contaminantes que aún maneja el continente siguen siendo elevadas ocasionando problemas en la calidad del aire.

La Unión Europea (UE) ha propuesto objetivos a largo plazo en los cuales busca alcanzar niveles de calidad del aire que no generen efectos y riesgos inaceptables para la salud humana y el ambiente (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2010). La UE con el fin de reducir la exposición a la contaminación atmosférica, en el año 2013, a través de la Comisión Europea adoptó el programa denominado “Aire puro para Europa” el cual busca reducir la contaminación atmosférica a través de la adopción de nuevas medidas que resulten más efectivas (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2010).

Sin embargo, la historia de estas reglamentaciones viene de tiempo atrás. En 1987 fueron creadas las normas Euro las cuales fueron aprobadas posteriormente como medida de control en materia de contaminación y de obligatoriedad desde 1993 para los fabricantes de vehículos (Panadero, 2012). Actualmente se han desarrollado seis (6) normas en las cuales se

especifican los límites de emisiones por contaminante en la Unión Europea en g/Km; estas normas se encuentran denominadas como Euro y clasificadas de acuerdo al tipo de combustible.

Desde la Euro I en 1993 hasta la Euro IV del 2005 se proporciona información frente a los límites permisibles para los vehículos diésel y gasolina que circulan por el continente, en tanto la Euro V introduce normatividad para contemplar el material particulado en algunos automóviles a gasolina para el 2017. La norma Euro que se encuentra en vigencia es la Euro VI y está contenida en el reglamento 582 de 2011 estableciendo los requisitos necesarios para la homologación de tipo de los vehículos y motores Euro VI (Parlamento Europeo, 2011).

3.3.2. Estados Unidos – México

A finales de los años 70, en Estados Unidos surgieron las primeras normas pensadas en la descontaminación del aire las cuales buscaban frenar los gases contaminantes producidos por los automóviles (Panadero, 2012).

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) en el año 2000 presentó una reglamentación para la circulación de camiones pesados y autobuses más limpios conocida como el reglamento “Highway Rule”, en el cual se estableció que para los modelos 2007, la contaminación de los vehículos de servicio pesado se reduciría en un 90% exigiendo que el azufre en el diésel se disminuyera en un 97%, es decir, reducir la concentración de 500000 partes por billón (ppb) a 15000 ppb (Segura, 2014).

Para el caso específico de México, la Norma Oficial Mexicana (NOM) 044-Semarnat-2006 fue actualizada en junio de 2014, exigiendo a los fabricantes de vehículos con motores que cumplan con los niveles permitidos de emisiones de contaminantes con base en la EPA 04 de Estados Unidos y la Euro IV, es así como en Estados Unidos, actualmente los motores

empleados responden a la EPA 04, en Europa a la Euro VI y en México a la EPA 04 y la Euro IV (Segura, 2014).

3.3.3. Colombia

La evolución de la normatividad ha sido constante con la implementación a nivel nacional de protocolos, normas específicas para la calidad del aire de acuerdo al tipo de emisión (fuentes móviles, fuentes fijas). De igual manera, se ha logrado aumentar las redes de monitoreo con sus respectivos Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en todo el país, el cual para el año 2010 contaba con 137 estaciones de monitoreo de calidad del aire (IDEAM, 2016).

En 2005 el MAVDT et al., desarrollaron el Conpes 3344 en el cual se establecieron los lineamientos que han buscado avanzar en la formulación de estrategias coordinadas, eficientes y equitativas, dirigidas a prevenir y controlar la contaminación del aire. Asimismo, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial implementó en el 2006 la Resolución 601 en la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

Por otro lado, en 2008 se formuló el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del Aire, en el cual incorpora los lineamientos a tener en cuenta para realizar el diseño y la operación de los sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire en Colombia (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT & Consultor K-2 Ingeniería, 2008).

Actualmente, el país cuenta con la Resolución 650 de 2010 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) en la cual se adopta el protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, Así mismo, este mismo Ministerio puso en marcha la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire (2010) en la cual

buscaba impulsar la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo, a través de diversas actividades con metas medibles dirigidas a alcanzar los niveles de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano.

De igual manera, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) junto con el Ministerio de Ambiente desarrollaron el Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia (2007-2010) en el cual se recolectó información sobre la concentración de contaminantes de origen antropogénico y natural, y el comportamiento de variables meteorológicas que regulaban la distribución de los mismos en la atmósfera bogotana (IDEAM, 2012).

Con base en las emisiones atmosféricas por parte de los vehículos y la problemática que estos han venido generado, una medida de control que se ha desarrollado en el país consiste en la revisión técnico-mecánica de los vehículos con el fin de evaluar el estado del motor y su funcionamiento, el sistema de frenos, llantas, alineación y balanceo, entre otros elementos del vehículo que pueden estar en mal estado y puedan ocasionar accidentes. De igual manera se verifica que las emisiones de gases generadas por el vehículo se encuentren dentro de la norma a fin de reducir la contaminación ambiental.

Este proceso indica que todas aquellas personas que adquieran un vehículo ya sea de transporte público o privado deben hacer revisar su vehículo por Centros de Diagnóstico automotor (CAD) de forma obligatoria y con una periodicidad anual con el fin de obtener el correspondiente certificado que los avala para transitar por la ciudad y garantiza que estos cumplan con las condiciones técnicas y mecánicas para que sus emisiones no superen los máximos admisibles, limitando de esta manera las emisiones atmosféricas de los vehículos y controlando en algún sentido la contaminación atmosférica a la que se enfrenta a diario la

contaminación atmosférica. Este tipo de pruebas, aunque no son eminentemente estrictas como en algunos otros países como por ejemplo Chile, permite limitar especialmente el tránsito de vehículos de modelos antiguos que no cuentan con las tecnologías necesarias para el control de sus emisiones a las que se encuentra a diario la ciudad.

3.4. Antecedentes

3.4.1. Antecedentes Internacionales

Para comprender de fondo la problemática que en la actualidad enfrentan los centros urbanos de todo el mundo, es necesario hablar y conocer sobre los factores que generan un aumento en la contaminación atmosférica. Se considera que existen factores tales como la producción industrial, la falta de planificación del crecimiento urbano, la inmensa cantidad de vehículos circulando y el uso de tecnologías obsoletas en la producción que hacen que los niveles de polución se incrementen deteriorando la calidad de vida de la población (Ochoa-Jiménez et al., 2015).

A nivel mundial, el problema que enfrentó Londres en 1952 provocó la muerte de más de 12.000 ciudadanos y enfermó a aproximadamente 100.000 personas producto del crecimiento acelerado de la quema de combustibles fósiles en la industria y los transportes. Adicionalmente, China en el 2013, sufrió una serie de problemas ambientales superando al menos en cuatro (4) ocasiones los índices máximos de contaminación recomendados por la OMS, con un valor superior a los 900 microgramos por metro cúbico de partículas con diámetro menor a 2,5 μm . El Ministerio de Protección Ambiental calificó el aire de diez (10) ciudades chinas como “fuertemente contaminado”, en las cuales resultaron afectadas 800 millones de personas (Aguilera, 2013).

Lacasaña-Navarro et al. (1999) presentan las condiciones de contaminación del aire en tres ciudades, o megaciudades; dentro de las cuales se encuentran Ciudad de México, Sao Paulo y Santiago de Chile. Los autores sintetizan que la mala calidad del aire que viven estas megaciudades, es producto del rápido y desbordado crecimiento urbano que enfrentaron las ciudades en el camino a la industrialización y a la incursión de nuevos mercados.

Asimismo, a pesar de que la contaminación atmosférica que vive Ciudad de México constituye un hecho cotidiano en la zona, esta alteración es relativamente reciente, producto del desarrollo y agudización de diversos problemas de carácter económico, urbano, energético, social y ambiental; destacándose de esta manera el rápido crecimiento de la población provocando una expansión urbana significativa (Romero et al., 2006).

Para el caso particular de Chile, específicamente en la ciudad de Chillán, en donde se afirma que la ciudad presenta características relacionadas con la morfología y con el tráfico vehicular que enfrenta la ciudad, se hace suponer que la principal fuente de emisión en el área urbana proviene especialmente de las fuentes móviles con las que cuenta la ciudad, es decir que, el principal aportante de dicha contaminación se ve relacionado con el transporte urbano (Celis et al. 2007).

De igual manera, Cuba enfrentó un proceso acelerado de desarrollo industrial de 1971 a 1980 como lo menciona Romero et al., (2006). Partiendo del desarrollo generado, se realizó un estudio en La Habana para determinar los niveles de monóxido de carbono presentes en algunas vías de la isla. Con estos resultados se pudo relacionar los efectos de la exposición a contaminantes ambientales sobre la salud en niños y adultos (Romero et al., 2006).

En América Latina, la ciudad en que se presentan los mayores problemas de salud pública relacionados con material particulado, es Lima, Perú, en donde de acuerdo a lo mencionado por Suárez-Salas et al. (2017) es una de las ciudades con mayor frecuencia en casos de asma en niños por relación con el PM provenientes del parque automotor.

Por su parte, Cabrera (2017) presenta las urbes modelo que según la OMS gozan del aire más limpio en materia de $PM_{2,5}$, entre las cuales se destacan: Estocolmo (Suecia), Auckland (Nueva Zelanda), Brisbane (Australia), Wellington (Nueva Zelanda), Boston (Estados Unidos), Ottawa (Canadá), Vancouver (Canadá), Edimburgo (Reino Unido), Las Vegas (Estados Unidos) y Sydney (Australia). Todas estas ciudades comparten la implementación de programas de sostenibilidad entre las cuales se encuentran el reemplazo de los vehículos por bicicletas, el uso del vehículo compartido o “carpooling” y la existencia de un sistema desarrollado de transporte público entre otros.

3.4.2. Antecedentes Nacionales

3.4.2.1. Calidad del Aire en Bogotá

En 1967 la Organización Panamericana de la Salud- OPS por medio del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS), puso en funcionamiento la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire – RED PANAIRES la cual contaba inicialmente con 8 estaciones y buscaba llegar a 88 para el año 1973. Estas estaciones se ubicaron en 26 ciudades de 14 países, de las cuales 6 se encontraban en Colombia en las ciudades de Bogotá, Bucaramanga, Cali, Medellín, Barranquilla y Cartagena (IDEAM, 2016)

Colombia ha tenido una larga y amplia tradición en materia de acciones para el control de la contaminación del aire. Inicialmente, en 1967 se instalaron las primeras redes para el

monitoreo de la calidad del aire (MAVDT, 2010). Adicionalmente, se contempla que durante el año 2007 se realizó un diagnóstico detallado de ocho (8) redes de calidad del aire ubicadas en centros urbanos entre las cuales se encontraba Bogotá, lo cual permitió definir un plan de trabajo para fortalecer la medición de calidad del aire en el país y ajustar y validar el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, que se adoptó mediante Resolución 650 de 2010.

De acuerdo a la información presentada por el IDEAM en 2014, la calidad del aire representa uno de los retos más grandes que tiene el país por afrontar en términos de contaminación. A su vez, el deterioro de la calidad del aire ha provocado que se vea comprometida la salud de la población colombiana, especialmente relacionada con la proliferación de enfermedades respiratorias. Adicionalmente, en ciudades como Bogotá, D.C., se ha detectado que existen zonas con un nivel importante de contaminación atmosférica entre las cuales se encuentran Puente Aranda, Carvajal y Kennedy (IDEAM, 2014).

A través de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire en Bogotá – RMCAB se puede conocer desde 1997 las concentraciones de los contaminantes “criterios”, bajo las cuales Rojas (2007) concluye que el contaminante que mayor excede la norma de calidad de aire es el PM₁₀ seguido del ozono y que tanto la industria como las fuentes móviles tienen una contribución importante a las emisiones de contaminantes.

Partiendo de lo mencionado anteriormente, el Distrito Capital cuenta con diferentes mecanismos implementados actualmente para monitorear la calidad del aire, entre las cuales se encuentran: la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), el Índice Bogotano de Calidad del Aire (IBOCA), el modelo de calidad del aire de Bogotá y para mitigar la contaminación: los Programas Acercar Industria, Acercar Transporte y PREAD.

De otro lado, la Política de Prevención y Control de la Contaminación planteó dentro de su información que, de acuerdo a un estudio epidemiológico de Bogotá, realizado en 2007 en conjunto con la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, se pudo evidenciar que el 79,6% de los niños presentó chillidos o silbidos en el pecho en los jardines infantiles ubicados en las zonas de mayor exposición, frente al 69% de las zonas de menor exposición. Adicionalmente, se detectó que los niños menores de 5 años que van a jardines infantiles y están expuestos a mayor contaminación del aire tienen 1,7 veces más riesgo de ausentismo escolar por enfermedad respiratoria. Finalmente concluyó que, los resultados preliminares concuerdan con la literatura y evidencian la relación entre contaminación del aire por material particulado respirable y síntomas respiratorios en las localidades de Bogotá. En todos los estudios realizados han logrado cuantificar el incremento en el número de casos por Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA) asociado a un incremento en la concentración de contaminantes como ozono, dióxido de nitrógeno, material particulado menor a 10 micras y material particulado menor a 2,5 micras (MAVDT, 2010).

3.4.2.2. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB es un instrumento que permite determinar el comportamiento de las concentraciones de contaminantes en la atmósfera. La RMCAB está conformada por 13 estaciones fijas de monitoreo y una móvil ubicadas en diferentes puntos de la ciudad, las cuales cuentan con tecnología de última generación que permiten realizar el monitoreo continuo de las concentraciones de material particulado (PM₁₀, PST, PM_{2,5}), de gases contaminantes (SO₂, NO₂, CO y O₃) y de las variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, n.d.).

3.4.2.3. Índice Bogotano de Calidad del Aire – IBOCA

La Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2015) a través de la Resolución 2410 de 2015, define al Índice Bogotano de Calidad del Aire (IBOCA) como un indicador multipropósito adimensional, calculado a partir de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en un momento y lugar de la ciudad, que comunica simultáneamente de manera sencilla, oportuna y clara el riesgo ambiental por contaminación atmosférica. Este índice funciona como un indicador de riesgo ambiental por contaminación atmosférica en el marco del Sistema Distrital de Alertas del Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático.

A través de la página de la SDA es posible conocer el pronóstico del IBOCA por localidad, así como conocer las medidas ciudadanas voluntarias para contribuir y mejorar la calidad del aire en Bogotá D.C. Finalmente, este indicador se encuentra relacionado con la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de la Secretaría Distrital de Ambiente, teniendo en cuenta que es ésta la encargada de generarlo.

Este índice permitirá emitir alertas tempranas frente a emergencias de contaminación y tomar medidas preventivas a través del IBOCA, teniendo en cuenta que la capital colombiana será la ciudad modelo para la implementación de la nueva normatividad ambiental que presentará el Ministerio de Ambiente en agosto con el fin de reducir la contaminación en el país (“Bogotá tendrá pronóstico de la calidad del aire,” 2017).

3.4.2.4. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá – PDDAB

De acuerdo a la información presentada por la SDA et al. (2010), el principal objetivo del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá (PDDAB) 2010-2020 es el establecimiento de un programa integral de descontaminación del aire que permita cumplir la norma nacional de calidad del aire establecida por el MAVDT en toda la zona urbana del Distrito

Capital, así como la observancia de la Política Nacional de Calidad del Aire emitida. De igual manera, y teniendo en cuenta la situación actual que vive la capital, para el cumplimiento de esta meta se hace especial énfasis en material particulado y ozono.

A su vez, el PDDAB comprende una serie de programas de control y reducción de emisiones aplicables tanto a fuentes móviles como a fuentes fijas presentes en la ciudad, considerando sus características y teniendo en cuenta el contaminante de interés emitido por cada una de estas. Por otro lado, se contemplan medidas para el mejoramiento de la calidad del aire tales como el mejoramiento tecnológico, mayores controles a las fuentes de emisión, capacitación y acompañamiento, legislación y estrategias de comando y control; dichas medidas van dirigidas principalmente al sector industrial y de transporte

4. Área de Estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en la capital de Colombia, en la ciudad de Bogotá, D.C en la zona urbana de la ciudad. Se encuentra ubicada a los 04°36'35' N de latitud y 74°04'54 W de longitud, cuya altura en promedio es de 2.600 m.s.n.m., ubicada en el centro de Colombia, en la región natural conocida como la Sabana de Bogotá, la cual hace parte del altiplano cundiboyacense, formación ubicada en la cordillera de los Andes. Tiene una longitud de 33 km de sur a norte y 16 km de oriente a occidente, y se encuentra dentro de la zona de confluencia intertropical, produciendo dos épocas de lluvia; en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y en la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Bogotá cuenta con un clima homogéneo durante todo el año con una temperatura media de 14°C (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012).

Una vez estos vientos se desplazan, aproximadamente en septiembre, aumenta el cubrimiento de la nubosidad y aparecen las primeras lluvias producto de la presencia del viento. Posteriormente, en la segunda temporada de lluvias (entre septiembre y noviembre), los vientos locales son bastante variables y dependen de la distribución de las precipitaciones; los vientos más dominantes en la temporada son los del noreste, este y oeste, con velocidades hasta de 6 a 8 m/s (IDEAM, s.f).

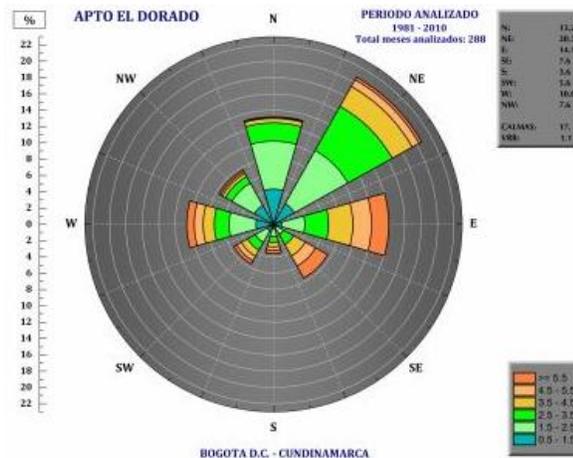
Adicionalmente, y teniendo en cuenta el estudio realizado por el IDEAM (s.f) relacionado con la caracterización climática de Bogotá y la Cuenca Alta del Río Tunjuelo, con base en el comportamiento de la dirección y velocidad del viento se menciona que el comportamiento en general es de la dirección Este, oscilando entre el Norte y el Este durante todos los meses del año regularmente entre las 7 y 8 de la noche hasta las 9 a 10 de la mañana; sin embargo, el comportamiento cambia en las horas del día hacia otras direcciones, lo cual permite establecer que la presencia del sol y su calentamiento, elevan paulatinamente la temperatura y por tanto cambian la mayoría de variables en su estado, permitiendo la formación de corrientes convectivas y advecciones de masas de aire de un sector a otro.

De igual manera, el estudio menciona que a partir de las 10 de la mañana se definen los vientos de direcciones entre Este y Sur, con predominio de flujo del Sureste, hasta aproximadamente las 6 de la tarde; esta situación se presenta desde el mes de mayo hasta septiembre con buena definición y persistencia, no obstante, que en los meses de julio, agosto y septiembre, la hora de ocurrencia comienza a las 8 - 9 horas de la mañana, hasta las 8 de la noche. Finalmente, durante los meses de octubre a abril el predominio continúa en la dirección Este, sin embargo, en horas del día el cambio se observa de la dirección entre Sur al Oeste, con predominio del Suroeste, con mayor intensidad en horas de la tarde a partir de la 1 p.m. hasta las

5 p.m.; y a partir de las 5 p.m. hasta las 7 p.m. se observa un cambio significativo de la dirección oscilante entre el Oeste al Norte, lo que se determina particularmente entre los meses de noviembre y abril (IDEAM, s.f).

Teniendo en cuenta la información mencionada anteriormente y con base en la **Ilustración 2**, se observa que en Bogotá el régimen de vientos calculado con base en el promedio multianual, indica una dirección predominante hacia el sur-este (SE) de la ciudad. Su velocidad oscila entre 0,5 y 5,5 m/s de acuerdo con el reporte del IDEAM (s.f).

Ilustración 2: Comportamiento de los vientos en Bogotá



Fuente: (IDEAM, 2018)

Por otro lado, la altitud en la que se encuentra una ciudad influye directamente en el proceso de combustión alterando la velocidad en que se realiza este proceso. En condiciones de presión menor, la velocidad inicial de combustión es más lenta, ocasionando que la liberación de calor generado sea de igual manera lenta, con temperaturas de llama menores. Esto ocasiona que algunas reacciones químicas no se completen y se tenga en algunos casos la emisión de gases contaminantes junto con los gases propios de la combustión (por ejemplo, monóxido de carbono), de acuerdo con la información presentada por Velasco & Velasco en 2014.

Así mismo, la velocidad inicial del proceso de combustión (que es función de la altitud), incide en las propiedades de la llama como, por ejemplo, en la velocidad de deflagración, la cual es definida como la rapidez con la que se transmite la combustión desde la zona donde se inicia la reacción hacia las zonas de mezcla aire/combustible aún no reaccionadas. La presión a la que se encuentra la zona de combustión y la temperatura de la mezcla aire/combustible dependen de la altitud donde se desarrolle la llama, y por lo tanto, existe una dependencia entre la velocidad de deflagración y la altitud (Velasco & Velasco, 2014).

Teniendo en cuenta la información anterior y partiendo de que Bogotá se encuentra a una altura promedio de 2.630 metros sobre el nivel del mar, los procesos de combustión se realizan con mayor dificultad, motivo por el cual se genera mayor cantidad de emisiones durante el proceso al no poderse completar en su totalidad la reacción química propia del proceso. Esta condición puede incidir directamente en la cantidad de emisiones generadas por material particulado al que se ve enfrentada la ciudad deteriorando la calidad del aire.

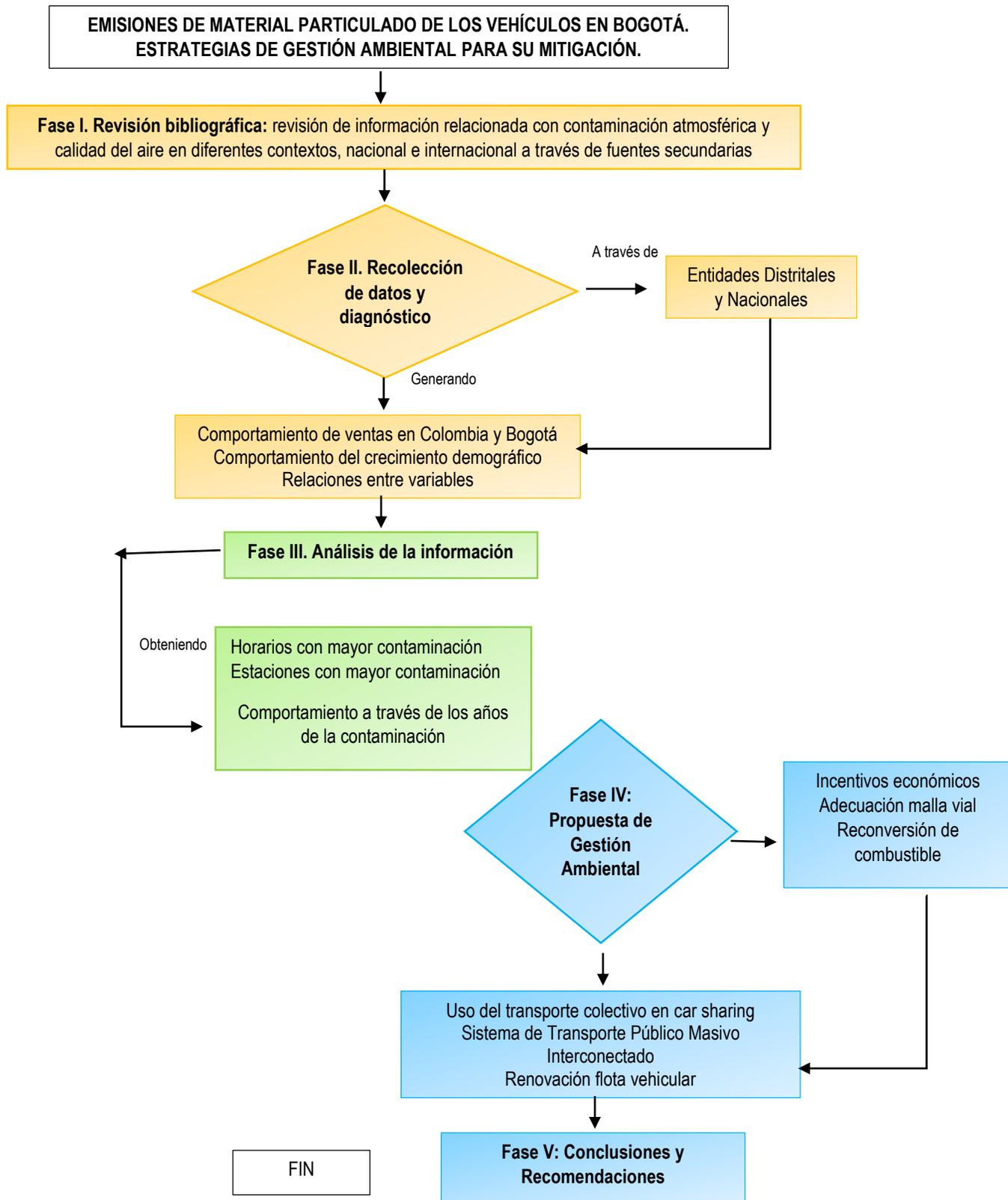
5. Materiales y métodos

El planteamiento de estrategias de mitigación para la reducción de la contaminación atmosférica producto de las emisiones generadas por fuentes móviles, fue una investigación desarrollada en cuatro etapas correspondientes a cada uno de los objetivos específicos. Esta investigación se enmarca dentro de un enfoque mixto ya que contiene tanto un enfoque cuantitativo como un enfoque cualitativo de acuerdo con lo mencionado por Hernández et al., (2014), el cual representa un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de la investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como la integración y discusión de los mismos para lograr un mejor entendimiento de la problemática de estudio.

Para conocer el comportamiento que ha tenido la ciudad de Bogotá a lo largo de los años, se realizó un análisis de los datos arrojados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá D.C. para toda la información disponible (1997-2017 para PM_{10} y 2005-2017 para $PM_{2.5}$) en cada una de las estaciones, con el fin de conocer la información registrada, su variabilidad, las tendencias de las concentraciones de contaminantes y la cantidad de datos faltantes.

Posteriormente, para establecer las estaciones con mayor grado de contaminación de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), se calculó el promedio con los datos disponibles y reportados por la RMCAB para las once estaciones. Seguido a esto, a través de un método estadístico de promedio aritmético se procedió a realizar la clasificación y limpieza de datos en las tres estaciones con mayor contaminación con el fin de conocer el comportamiento y el promedio de cada una. Una vez obtenidos estos valores se procedió a calcular la desviación estándar del conjunto de datos para de esta manera identificar los valores que no son representativos para el análisis, es decir, los datos con valores que superen el promedio aritmético + 4 desviaciones estándar los cuales sugieren se trata de errores de medición de los equipos (generalmente datos “absurdos” a la luz de la variable evaluada). Identificados estos valores, se eliminaron manualmente y se procedió a realizar el análisis con los datos obtenidos como representativos para cada una de las estaciones a analizar.

5.1. Diagrama de flujo



5.2. Métodos de análisis de datos

Dentro de una investigación mixta, el análisis de datos se encuentra relacionado con los procedimientos estandarizados cuantitativos y cualitativos obtenidos a través de estadística descriptiva e inferencial como codificación y evaluación temática respectivamente. Este análisis se encuentra directamente en la aplicación de métodos estadísticos de regresión lineal y curvilínea a través de la distribución de una o varias variables, que para este caso se encuentra relacionada con la venta de vehículos a través de los años, el crecimiento demográfico evidenciado y el aumento en la concentración de material particulado.

Para la presente investigación el análisis de datos fue realizado a partir de las bases de datos generales de vehículos (vendidos y matriculados) y el crecimiento demográfico en la ciudad de Bogotá. Posteriormente, se realizó el análisis estadístico a través de diferentes modelos (lineal, exponencial, logarítmico y potencia) para conocer el mejor ajuste con el comportamiento de datos. Este análisis se realizó para las variables de los vehículos matriculados, crecimiento demográfico y vehículos vendidos en Bogotá, para este último, se realizó el análisis con los modelos mencionados anteriormente más el modelo polinómico teniendo en cuenta el comportamiento evidenciado. Este análisis se realizó por tipo de vehículo con el fin de establecer el comportamiento por cada uno de ellos.

Posteriormente, se plantearon las posibles relaciones existentes entre las diferentes variables para establecer si alguna de las variables analizadas depende o se encuentra estrechamente relacionada con las otras de tal forma que permita explicar el comportamiento de cada una a través de los años.

De otro lado, se realizó el análisis de las bases de datos depuradas de las estaciones con mayor contaminación de material particulado con el fin de lograr establecer el comportamiento

de cada una de ellas a través de los años. Igualmente, se realizó el análisis a partir del promedio mensual por año y por estación con el fin de lograr establecer los meses en que la contaminación atmosférica disminuye y si esta se encuentra relacionada con las temporadas en que dejan de circular vehículos en la ciudad tales como vacaciones o semana santa, así como la relación entre la concentración de material particulado y el régimen bimodal de lluvias con el que se enfrenta la zona Andina del país a través de sus dos temporadas invernales.

Así mismo, y partiendo del promedio horario por estación y por año disponible, se analizaron los datos presentes para establecer si existe un comportamiento similar en las estaciones a determinadas horas del día. Adicionalmente, analizar los picos horarios con mayor grado de contaminación por material particulado con el fin de establecer posibles fuentes de contaminación y establecer si existe una relación directa entre la contaminación y la circulación de la flota vehicular en la ciudad. Es importante mencionar que los datos reportados por la RMCAB no se encuentran discriminados por el porcentaje aportante entre fuentes fijas y fuentes móviles.

6. Resultados y Discusión de Resultados

6.1. Capítulo 1: Dinámica de Vehículos matriculados en Bogotá

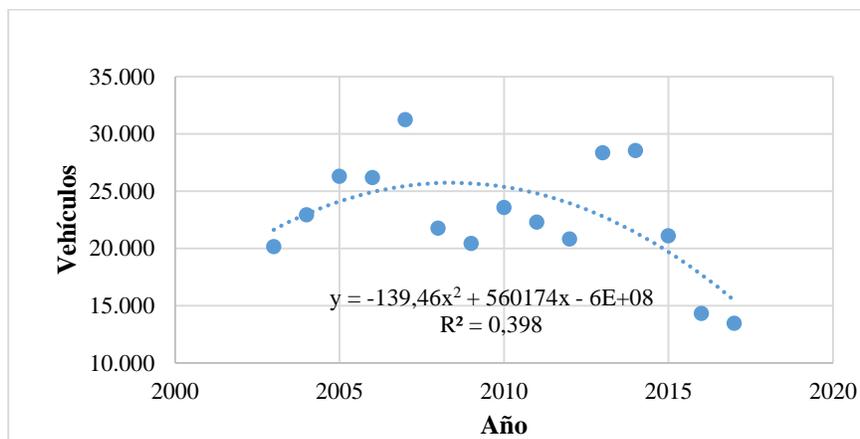
Para este caso específico, la venta de vehículos en Colombia se comporta de acuerdo al modelo polinomial sin importar el tipo de vehículo. En la **Tabla 1** se presentan los resultados obtenidos de la venta de vehículos en Colombia, discriminada por tipo de vehículo y por venta total de los mismos.

Tabla 1: Venta de vehículos en Colombia

Tipo de Vehículo	Modelo	R ²	Probabilidad
Vehículos particulares	Polinomial	0,68	0,009
Vehículos de transporte público	Polinomial	0,43	0,05
Vehículos Totales	Polinomial	0,74	0,019

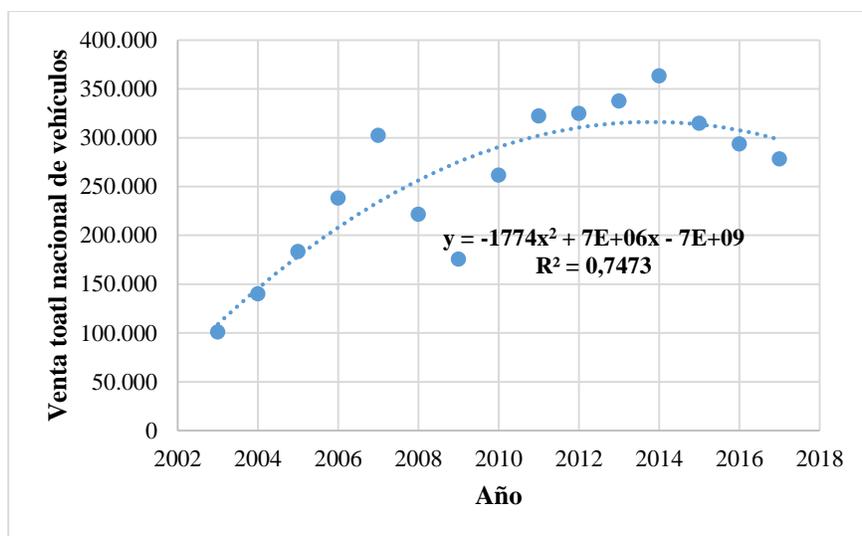
De esta manera, se observa que la venta de los vehículos de transporte público en Colombia también tiene un comportamiento polinomial en el tiempo como se presenta en la

Gráfica 1.



Gráfica 1: Venta de Vehículos de Transporte Público en Colombia

Teniendo en cuenta los resultados presentados anteriormente frente al comportamiento de las ventas de vehículos en Colombia discriminados por tipo, se puede concluir que, el crecimiento frente al total de las ventas de vehículos presentadas en Colombia durante los años 2003 al 2017 fue significativo al evidenciar en la **Gráfica 2** un ajuste al modelo polinomial que sugiere que ya se ha alcanzado un punto de saturación en las ventas anuales, y que el 74,7 % de las variaciones presentadas de las ventas pueden explicarse con el paso de los años.



Gráfica 2: Venta Total de Vehículos en Colombia

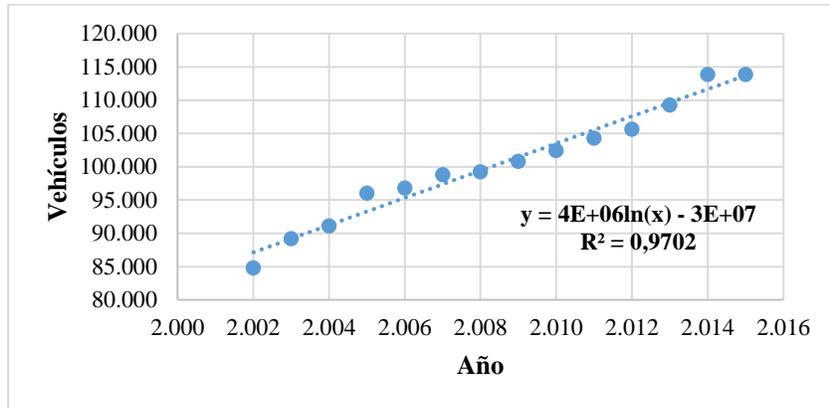
Por otro lado, se consideró la información presentada por la Secretaría Distrital de Movilidad en el 2015, con el fin de determinar el comportamiento del acumulado de los vehículos matriculados en Bogotá a través de los años discriminándolos por tipo de vehículo. Esta información se puede observar en la **Tabla 2**, en donde se presenta el resumen del análisis efectuado frente al acumulado de los vehículos matriculados anualmente en Bogotá, discriminado por tipo de vehículo y el modelo que mejor se ajustó de acuerdo con el crecimiento de los mismos.

Tabla 2: Vehículos matriculados en Bogotá (Acumulados 2002-2016)

Tipo de Vehículo	Ecuación	Modelo	R ²	Probabilidad
Vehículos públicos	$y = 4E+06 \ln(x) - 3E+07$	Logarítmico	0,97	10E-10
Vehículos particulares	$y = 1E-84e0,1032x$	Exponencial	0,99	83 E-15
Vehículos Totales	$y = 3E-78e0,0959x$	Exponencial	0,99	2E-15

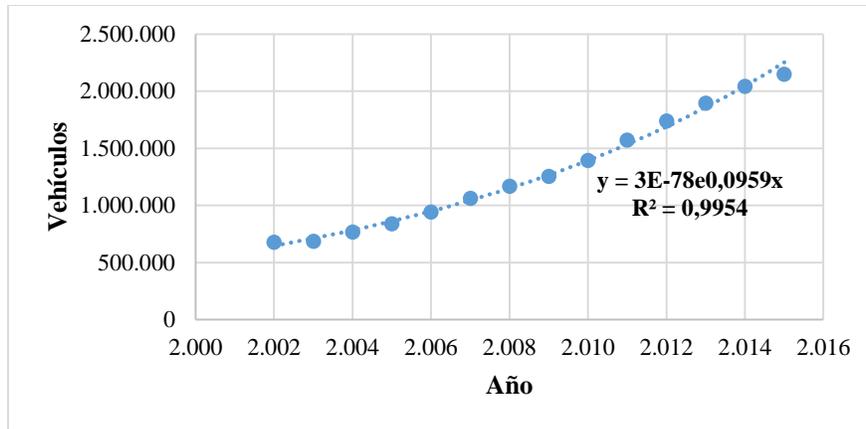
Partiendo de lo anterior, se evidencia en la **Gráfica 3** que existe una relación logarítmica directa significativa en el acumulado de los vehículos públicos matriculados en Bogotá, explicándose el 97,02% de las variaciones con el paso de los años. Este resultado es un insumo importante para lograr explicar el incremento del material particulado toda vez que son

vehículos que no cuentan con tecnología de control de emisiones y que en su mayoría utilizan diésel como combustible.



Gráfica 3: Vehículos Públicos Matriculados en Bogotá (Acumulado 2002-2016)

Teniendo en cuenta la información presentada en la **Tabla 2**, se puede afirmar que el acumulado del total de los vehículos matriculados en la ciudad obedece también a un modelo exponencial directo en el cual el 99,5% de las variaciones se pueden explicar a través de los años, a una tasa de crecimiento de 9,6% cercana a la de vehículos particulares como se observa en la **Gráfica 4**. Frente a este incremento, se puede afirmar que ha sido ocasionado por diversos factores tales como el no contar con un adecuado Sistema Integrado de Transporte Público masivo que permita transportar a la población bogotana. Sin embargo, es importante mencionar que, existen muchos vehículos que circulan diariamente en la ciudad y que no se encuentran matriculados en ella, esto es debido a que las personas se encuentran en tránsito por la ciudad para llegar a sus lugares de trabajo y al finalizar el día retornan a los municipios aledaños a la capital del país.



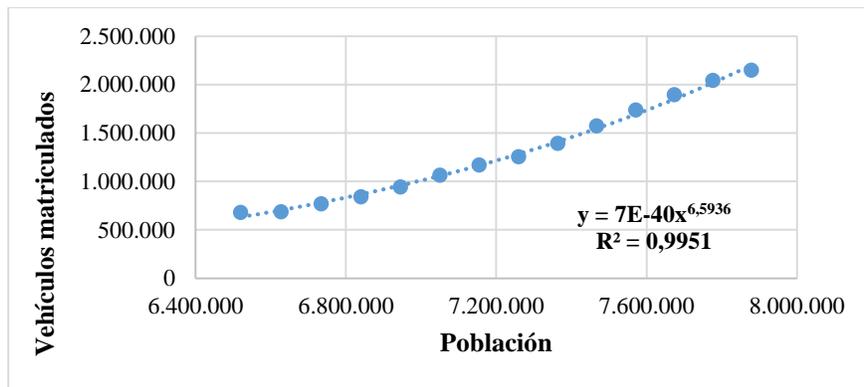
Gráfica 4: Vehículos Totales Matriculados en Bogotá (Acumulado 2002-2016)

De igual manera es importante considerar los vehículos siniestrados que salen de circulación por Pérdida Total por Daños (PTD), de los cuales es cancelada la matrícula por pérdida total. Sin embargo, la información reportada por Fasecolda únicamente corresponde a los vehículos asegurados y adicionalmente, dichos vehículos se encuentran entre el 20 y 30% del total del parque automotor colombiano. Asimismo, el seguro de automóviles tiene una participación de aproximadamente del 90% de vehículos livianos y pesados y solo un 10% corresponde a motos.

En otro orden de ideas y teniendo como referencia la información presentada por el DANE, frente al crecimiento demográfico que ha evidenciado la ciudad, fue posible establecer que la población ha crecido linealmente del año 2013 al 2017 a una tasa aproximada de 101 mil personas por año ($R^2=1$). Ello sugiere que, en alguna medida, el crecimiento poblacional explica en parte el incremento vehicular de la ciudad.

Por otro lado, en la **Gráfica 5** se presenta la relación entre la población y el acumulado de los vehículos matriculados en Bogotá, en la cual en este caso específico se evidencia que a medida que aumenta la población, se presenta un aumento significativo y exponencial en el

acumulado de vehículos matriculados explicándose el 99% de esta última variable. Este aumento puede estar relacionado directamente con el crecimiento poblacional o con las diversas acciones que ha implementado la administración, entre los cuales cabe mencionar *el pico y placa*. Esta medida ha contribuido a que la población adquiera más de un vehículo y lo matricule en la ciudad con el fin de poder transportarse todos los días en vehículo particular y cumplir sus diversas obligaciones.



Gráfica 5: Población Vs. Acumulado de Vehículos Matriculados en Bogotá

Adicionalmente, se analizó la relación existente entre la población y el número de vehículos de transporte público, encontrándose que no hay una relación significativa entre estas dos variables.

Finalmente, y teniendo en cuenta el porcentaje en ventas que aporta Bogotá con respecto a las ventas nacionales, se calcularon las unidades vendidas anualmente en la ciudad con el fin de lograr determinar el comportamiento que ha tenido a través de los años, **Tabla 3**.

Tabla 3: Venta de Vehículos en Bogotá.

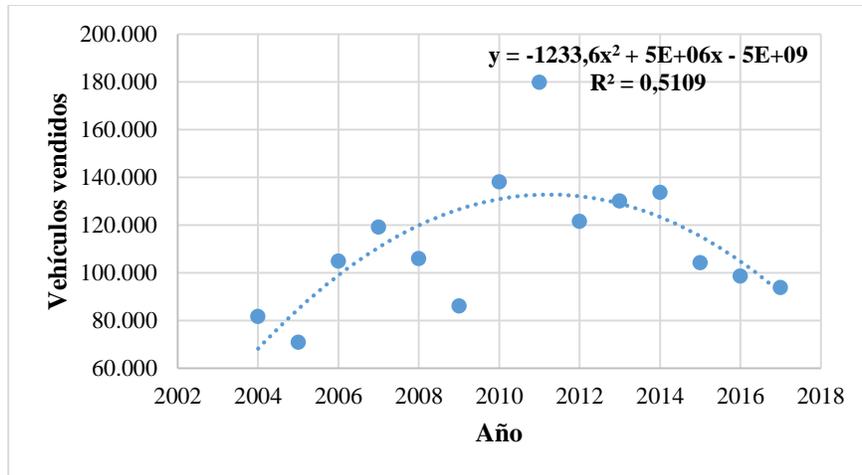
AÑO	% Aportante en Bogotá	Total Unidades en Colombia	Total Unidades en Bogotá
2004	58%	140.113	81.708
2005	39%	183.510	70.919

AÑO	% Aportante en Bogotá	Total Unidades en Colombia	Total Unidades en Bogotá
2006	44%	238.291	104.903
2007	39%	302.541	119.148
2008	48%	221.512	105.987
2009	49%	175.695	86.172
2010	53%	261.825	138.073
2011	56%	322.385	179.781
2012	37,4%	325.035	121.563
2013	38,5%	337.782	130.046
2014	36,8%	363.476	133.759
2015	33,1%	314.879	104.225
2016	33,6%	293.655	98.668
2017	33,7%	278.303	93.788

Fuente: Fenalco y Secretaría Distrital de Movilidad

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, se puede evidenciar que el comportamiento que ha tenido la ciudad frente a la venta de vehículos obedece a un modelo polinomial tal y como se presenta en **Gráfica 6**, en donde se sugiere que se ha alcanzado el punto de saturación en ventas anuales en Bogotá y en donde el 51% de las variaciones presentadas en las ventas se pueden explicar en el paso de los años.

Sin embargo, a pesar de que en la ciudad existe una saturación de vehículos y algunas vías se encuentren en mal estado, la ausencia de un Sistema Integrado de Transporte masivo interconectado y con tecnologías limpias sumado a los problemas de seguridad que se viven en la capital, han llevado a que los ciudadanos sigan adquiriendo vehículos para movilizarse. Esto se encuentra directamente asociado a la calidad del aire en la ciudad al emitir mayores emisiones de contaminantes que afectan directamente la salud de las personas. De tal manera, que se evidencia que al aumentar la población, aumenta el número de vehículos que se movilizan en la ciudad, lo que demuestra que es un problema que se encuentra en crecimiento constante y del cual se deben tomar medidas que se enfoquen en mejorar tanto la calidad del aire como la calidad de vida de los ciudadanos.



Gráfica 6: Venta Total de Vehículos en Bogotá.

De esta manera, y considerando lo mencionado por Rojas (2004), los vehículos automotores son la principal fuente de emisiones de material particulado, en donde la mayor contribución se encuentra relacionado con el parque automotor a diésel. Agrega que, un vehículo con motor diésel emite de 45 a 80 veces más la masa de partículas que emite un vehículo a gasolina con la misma potencia y en las mismas condiciones. Adicionalmente, un vehículo pesado con diésel genera de 100 a 200 veces más partículas que los homologados de gasolina (Ferris *et al*, 2003). No obstante, si se cuenta con la tecnología de trampa o filtro de partículas, un vehículo a diésel puede emitir menores concentraciones de partículas que los vehículos a gasolina (Rojas, 2004).

Por otro lado, Giraldo & Behrentz (2005) concluyen en su estudio que la categoría vehicular en la cual se encuentran los buses, es la más crítica con respecto al aporte de las emisiones totales de la ciudad, la cual es la responsable del 50% de las emisiones del PM₁₀, en donde se considera que la flota vehicular de buses representa menos del 5% de la flota vehicular total que circula por la ciudad. Adicionalmente, y considerando que los buses aportan la mitad

del total de emisiones de PM₁₀ se menciona que el principal problema se encuentra relacionado con la calidad de los combustibles diésel disponibles, en donde si bien la composición de azufre en el diésel de Bogotá es de 1500000 ppb (siendo el contenido de azufre más bajo del país con relación al nacional la cual se encuentra en 4500000 ppb), ésta se encuentra en un valor muy elevado en comparación con ciudades tales como Santiago de Chile, en donde únicamente el diésel contiene 50000 ppb de azufre.

De igual manera, de acuerdo a los estudios citados por Giraldo & Behrentz (2005) se ha encontrado una relación directa entre el contenido de azufre en el diésel y el incremento en las emisiones del material particulado PM₁₀. Las emisiones generadas por diésel constituyen una mezcla compleja de miles de sustancias orgánicas e inorgánicas en forma de gases y finas partículas, adicionalmente, estas emisiones se catalogan en su mayoría como contaminantes atmosféricos con efectos tóxicos, mutagénicos y cancerígenos que pueden causar o aumentar la mortalidad, incrementar la morbilidad y presentar un riesgo potencial y grave para la salud humana (Ferris *et al*, 2003).

Finalmente, para conocer con detalle la memoria de cálculo obtenida para el análisis de estas variables se puede remitir al **Anexo 1**, en el cual se encuentra clasificada la información por cada una de las variables analizadas (vehículos matriculados y vendidos y crecimiento demográfico en Bogotá) y las relaciones obtenidas entre cada una de ellas.

6.2. Capítulo 2: Normatividad Nacional e Internacional relacionada con la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles.

Es necesario analizar la normatividad ambiental legal vigente nacional existente frente a la contaminación atmosférica generada por las fuentes móviles que circulan en el país,

específicamente las fuentes que circulan en la capital con el fin de lograr establecer un marco de referencia con relación a la normatividad internacional.

Unión Europea

La Unión Europea ha establecido normas para las partículas en suspensión de material particulado (PM), ozono, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, plomo y otros contaminantes que ponen en riesgo la salud humana y los ecosistemas (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2013).

Adicionalmente, y de acuerdo a la información presentada por la Agencia Europea de Medio Ambiente (2013), se establece para cada sector específico una normativa de calidad del aire aplicable. Para el caso de las emisiones de los vehículos, se han regulado a través de una serie de normas de rendimiento y carburantes, incluida la Directiva de 1998 relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo (98/70/CE) y las normas de emisiones de los vehículos, denominadas “normas Euro”. Las normas Euro 5 y Euro 6 abarcan las emisiones de vehículos ligeros, incluidos los de turismo, las furgonetas y los vehículos comerciales. Por su parte, la norma Euro 5 entró en vigor el 1 de enero de 2011 y exige que los vehículos nuevos incluidos en la legislación emitan menos partículas y óxidos de nitrógeno que los límites establecidos. La norma Euro 6, que entró en vigor en 2015 impuso límites más estrictos a los óxidos de nitrógeno emitidos por los motores de gasóleo.

Para el caso de las partículas en suspensión, la emisión se regula directamente por tres instrumentos legales europeos (las directivas sobre calidad del aire y sobre emisiones de contaminantes atmosféricos, y los límites Euro sobre emisiones del transporte por carretera) y dos convenios internacionales (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2013).

De otro lado, en la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo establece los valores límite que puede tolerar el aire ambiente con el fin de proteger la salud humana. Estos valores se encuentran definidos por día y año civil, para lo cual se busca alcanzar el valor límite desde el 1 de enero de 2005 con el fin de preservar la salud humana. En el **Anexo 2** se presentan los valores límite de acuerdo al tiempo de contaminante que se encuentre en el ambiente.

De igual manera, se establecen los valores límites en materia de la concentración de la exposición de partículas en suspensión PM_{2,5}. Para el año 2015 el valor límite de PM_{2,5} considerado por la Unión Europea debía ser de 0,02 ppb, un valor inferior al 0,025 ppb establecido en la fase I, como se presenta en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Valor límite para PM_{2.5} establecido por la UE.

Periodo medio	Valor límite	Margen de Tolerancia
Fase I		
Año Civil	0,025 ppb	20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y, en los sucesivos, cada 12 meses, en porcentajes idénticos anuales hasta alcanzar un 0% el 1 de enero de 2015.
Fase II¹		
Año Civil	0,02 ppb	-

Fuente: (Directiva 2008/50/CE, 2008)

A nivel internacional encontramos la normatividad presentada por la CEPE² para Europa, la cual es una regulación similar a la presentada por Unión Europea. Para el caso de la categoría de vehículos, la Unión Europea únicamente asigna una letra dependiendo del diseño y sus características; esta información se puede evidenciar en el **Anexo 3**. Clasificación de Vehículos Europeos.

¹ La fecha en que debe alcanzarse el valor límite es el 01 de Enero de 2020 según lo contemplado en la Directiva 2008/50/CE.

² CEPE: Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE o ECE en inglés)

Es así como se establecen límites máximos permisibles para los vehículos de acuerdo al tipo de combustible usado con el fin de mejorar las emisiones generadas. La Unión Europea, ha adelantado modificaciones en los límites permisibles hasta llegar a su última actualización Euro VI, estableciendo los límites que se presentan a continuación:

Tabla 5: Límites permisibles Unión Europea

Categoría del vehículo*	Límite de CO (g/km)	Límite de THC ³ (g/km)
M ₁ , N ₁ , CL1	15	1.8
N ₁ , CL2	24	2.7
N ₁ , CL3, N2	30	3.2

* Para conocer el significado de las categorías remitirse al Anexo 3. en el cual se describen cada una de las categorías correspondientes y su respectiva descripción.

Fuente: (Delphi Technologies, 2018)

De esta manera, para la comercialización de vehículos en Europa, es necesario realizar una homologación previa, es decir, un Servicio Técnico Acreditado por la Autoridad Ambiental competente, la cual realiza los ensayos correspondientes con el fin de verificar que el vehículo cumpla la norma. Una vez realizados estos ensayos, la autoridad emite el certificado de homologación para el vehículo referida a sus emisiones contaminantes. A continuación, se presentan los límites de emisiones por contaminante en la Unión Europea expresados en partes por billón (ppb).

Tabla 6: Límites de emisiones por contaminante en la Unión Europea expresadas en ppb.

Tipo	Fecha	CO ⁴	HC ⁵	HC + NO _x	NO _x ⁶	PM
Diésel						
Euro I	Julio de 1992	2,72 x10 ⁶ (3,16 x10 ⁶)	-	9,7 x10 ⁵ (1,13 x10 ⁶)	-	140 (180)
Euro II	Enero de 1996	1,0 x10 ⁶	-	7 x10 ⁵	-	80
Euro III	Enero de 2000	6,4 x10 ⁵	-	5,6 x10 ⁵	5 x10 ⁵	50
Euro IV	Enero de 2005	5 x10 ⁵	-	3,0 x10 ⁵	2,5 x10 ⁵	25

³ THC: Hidrocarburos Totales (por sus siglas en inglés: Total Hydrocarbons)

⁴ CO: Monóxido de Carbono

⁵ HC: Hidrocarburos no quemados

⁶ NO_x: Óxidos de Nitrógeno

Euro V	Septiembre de 2009	5 x10 ⁵	-	2,3 x10 ⁵	1,8 x10 ⁵	5
Euro VI	Septiembre de 2014	5 x10 ⁵	-	1,7 x10 ⁵	8 x10 ⁴	5
Gasolina						
Euro I	Julio de 1992	2,72 x10 ⁶ (3,16 x10 ⁶)	-	9,7 x10 ⁵ (1,13 x10 ⁶)	-	-
Euro II	Enero de 1996	2,2 x10 ⁶	-	5 x10 ⁵	-	-
Euro III	Enero de 2000	2,30 x10 ⁶	2,0 x10 ⁵	-	1,5 x10 ⁵	-
Euro IV	Enero de 2005	1,0 x10 ⁶	1,0 x10 ⁵	-	8 x10 ⁴	-
Euro V	Septiembre de 2009	1,0 x10 ⁶	1,0 x10 ⁵	-	6 x10 ⁴	5
Euro VI	Septiembre de 2014	1,0 x10 ⁶	1,0 x10 ⁵	-	6 x10 ⁴	5

* Antes de Euro V turismos <2500 kg estaban clasificados en la categoría Vehículo industrial ligero N1 -I⁷

Estados Unidos

Frente a la normatividad internacional de Estados Unidos, se consideran dos estándares: estándar de nivel 2, el cual fue introducido gradualmente desde el 2004 y hasta el 2009, y bajo el cual se considera la misma normatividad tanto para automóviles y camiones hasta 8500 lb GVBR⁸, en donde los límites de emisión son aplicados para gasolina, diésel, y todos los combustibles. Por otro lado, se encuentra el estándar de nivel 3, el cual fue acogido en el 2014 e introducido gradualmente desde el 2017 y del cual se espera su total implementación en 2025, este estándar refuerza los límites de emisión relacionados con el azufre para la gasolina. Para este caso, se debe certificar que las emisiones se encuentran en alguna de las siguientes categorías que se presentan en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Estándares de compartimientos Nivel 3. Estados Unidos.

Bin*	NMOG ⁹ + NO _x (mg/mi)	PM (mg/mi)	CO (mg/mi)	HCHO (mg/mi ¹⁰)
Bin 160	160	3	4.2	4
Bin 125	125	3	2.1	4

⁷ Categoría Vehículo Industrial Ligero N1-I: vehículos de transporte de mercancías con un peso bruto vehicular (PBV) de carga máxima no superior a 3,5 toneladas. La categoría N1 se divide en tres (3) clases: N1-I, N1-II y N1-III basadas en el peso.

⁸ GVWR: Peso Bruto Nominal (por sus siglas en inglés: Gross Vehicle Weight Rate)

⁹ NMOG: Gases Orgánicos no metálicos (por sus siglas en inglés: Nonmethane Organic Gas)

¹⁰ mg/mi: miligramos por millas.

Bin*	NMOG⁹ + NO_x (mg/mi)	PM (mg/mi)	CO (mg/mi)	HCHO (mg/mi¹⁰)
Bin 70	70	3	1.7	4
Bin 50	50	3	1.7	4
Bin 30	30	3	1.0	4
Bin 20	20	3	1.0	4
Bin 0	0	0	0	0

* **Bin:** Categorías propuestas por la EPA para clasificar los vehículos automotores de acuerdo con sus emisiones.

Fuente: (Delphi Technologies, 2018)

Por su parte, para la comercialización de vehículos en Estados Unidos es necesario contar con la autocertificación emitida directamente por el fabricante del vehículo, quien elige en qué laboratorio realizar las pruebas correspondientes a las emisiones y con base en eso comercializar los vehículos; adicionalmente, existen organismos encargados del control a los vehículos posterior a la venta de los mismos (Revista Cesvimap, 2016). De esta manera, Estados Unidos establece los estándares de emisión aplicables en donde se presentan los límites de contaminantes. A continuación, se relaciona esta información:

Tabla 8: Límites de contaminantes en Estados Unidos para Vida Intermedia¹¹

Diésel y Gasolina	NO_x	NMOG (HC)	CO	PM	HCHO Formaldehídos
Tier 2 Bin 5*	0,05 (g/mi)	0,075 (g/mi)	3,4 (g/mi)	-	0,015 (g/mi)
	0,031 (g/km)	0,047 (g/km)	2,113 (g/km)	-	0,0093 (g/km)

* **Tier 2 Bin 5:** Estándar de Emisión para Vehículos Ligeros propuesto por la EPA.

Fuente: (Revista Cesvimap, 2016)

Tabla 9: Límites de contaminantes en Estados Unidos para Vida Útil Completa¹²

Diésel y Gasolina	NO_x	NMOG (HC)	CO	PM	HCHO Formaldehídos
Tier 2 Bin 5*	0,07 (g/mi)	0,090 (g/mi)	4,2 (g/mi)	0,01 (g/mi)	0,018 (g/mi)

* **Tier 2 Bin 5:** Estándar de Emisión para Vehículos Ligeros propuesto por la EPA.

Fuente: (DieselNet, s.f)

¹¹ Vida Intermedia: 5 años o 50.000 millas lo que primero ocurra

¹² Vida Útil completa: 10 años o 120.000 millas lo que primero ocurra

Adicionalmente, los vehículos y motores nuevos deben contar con el certificado de conformidad emitido por la EPA¹³ antes de ingresar o de ser importados a los Estados Unidos; dicho certificado especifica que el vehículo cumple con todos los requisitos necesarios sobre emisiones. De igual manera, el combustible para transporte que se vende en Estados Unidos debe contener un volumen mínimo de combustible renovable con el fin de reducir las emisiones de GEI¹⁴ y el uso de combustibles derivados del petróleo (EPA, 2016).

A partir de esta información, la EPA ha adicionado dos nuevos límites de concentración ambiente o estándares primarios para partículas finas (PM_{2,5}) con el fin de incrementar la protección contra los efectos adversos en la salud humana relacionados con material particulado (PM). Los estándares propuestos por la EPA describen que la media anual de PM_{2,5} debe ser de 0,015 ppb y el promedio de 24 horas no debe superar los 0,05 ppb para la concentración en el ambiente. (Introducción al monitoreo atmosférico, s.f).

Finalmente, Estados Unidos desde el año 2015 ha planteado objetivos claros que permitan mejorar la calidad del aire en este país, es así como se establecieron en 2015 planes estatales de acción contra el cambio climático de los Estados Mexicanos Fronterizos; en el 2018 su objetivo se relacionó con mantener las redes de monitoreo de calidad del aire y acceso a datos en tiempo real y finalmente para el 2020 su objetivo principal se encuentra directamente relacionado con la reducción del número de vehículos, reducción de emisiones contaminantes en ciertas ciudades y de emisiones asociadas a proyectos de energía (Ministerio de Ambiente - MinAmbiente, 2017).

Colombia

¹³ EPA: Agencia de Protección del Medio Ambiente (por sus siglas en inglés: Environmental Protection Agency)

¹⁴ GEI: Gases de Efecto Invernadero

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emitió la Resolución 910 de 2008 en la cual se reglamentan a nivel nacional los niveles permisibles de emisión de contaminantes producto de las fuentes móviles terrestres, así como se reglamentan los requisitos y certificaciones a los que son sujetos todos los vehículos y fuentes móviles. En ella se establecen los límites máximos permitidos por tipo de combustible (Otto –combustión interna- o diésel).

Para el caso de los vehículos automotores con motores a gasolina, biocombustibles con motores a gasolina, gas natural vehicular o gasolina - GPL¹⁵ en la **Tabla 10** se presentan los límites máximos de emisión permisibles en los cuales se contempla durante su funcionamiento en velocidad de crucero y en velocidad de marcha mínima, ralentí o prueba estática a temperatura normal de operación.

Tabla 10: Límites máximos de emisión permisibles para vehículos con motores a gasolina, vehículos biocombustibles con motores a gasolina, gas natural vehicular o gasolina – GPL.

Año modelo	CO(%)	HC (ppb)
1970 y anterior	5.0	8 x 10 ⁵
1971 – 1984	4.0	6,5 x 10 ⁵
1985 – 1997	3.0	4 x 10 ⁵
1998 y posterior	1.0	2 x 10 ⁵

Fuente: (Resolución 910 de 2008)

Adicionalmente, se estableció que a partir del año modelo 2010, se debe garantizar una emisión máxima permisible equivalente al 80% del valor estimado en la tabla anterior para los vehículos 1998 y posterior. De igual manera se contemplan los niveles máximos de emisión para motocicletas, motociclo o mototriciclo con mezcla a gasolina aceite (dos tiempos) con las condiciones de funcionamiento mencionadas anteriormente. En la **Tabla 11** se presentan estos niveles máximos de emisión para este tipo de fuentes móviles, garantizando de igual manera que

¹⁵ GPL: Gas Licuado de Petróleo (LPG por sus siglas en inglés: Liquefied Petroleum Gases)

para los modelos posteriores al año 2010, se debe garantizar una emisión máxima permisible equivalente al 80%.

Tabla 11: Máximos niveles de emisión permisibles para motocicletas, motociclo o mototriciclo.

Año modelo	CO(%)	HC (ppb)
2009 y anterior	4.5	1×10^7
2010 y posterior	4.5	2×10^6

Fuente: (Resolución 910 de 2008)

Estos límites de emisión permisibles son establecidos de acuerdo al valor de exceso de oxígeno máximo para cada tipo de vehículo, el cual se encuentra en 11% para motocicletas, motociclo o mototriciclos de dos tiempos, y de 6% para motocicletas, motociclo y mototriciclos de cuatro tiempos, de acuerdo a la información presentada en el párrafo 3 del artículo 7 de la Resolución 910 de 2008. Para el caso de los vehículos en el que el valor obtenido con concentraciones de oxígeno sea superior a los establecidos, se deberá corregir y ajustar la información de acuerdo a la ecuación presentada en la Resolución 910 de 2008 con el fin de realizar una comparación con los datos presentados en la **Tabla 11**.

Es importante mencionar que en relación con las partículas, la Resolución 910 de 2018 reza que “*el material particulado (MP) sólo aplica para vehículos Diésel mientras que las emisiones evaporativas sólo aplica para vehículos a gasolina*”. Adicionalmente, el Artículo 8 expresa los límites máximos de opacidad para vehículos diésel (**Tabla 12**).

La medición de opacidad permite evaluar las emisiones de gases a la atmosfera generada por la combustión de diésel en los vehículos que circulan en el país. La medición se realiza a cualquier tipo vehículo automotor con el fin de medir la opacidad de los gases de escape del vehículo.

Tabla 12: Límites máximos de opacidad permisibles para vehículos accionados con diésel (ACPM) en aceleración libre.

Año modelo	Opacidad (%)
1970 y anterior	50
1971 – 1984	45
1985 – 1997	40
1998 y posterior	35

Fuente: (Resolución 910 de 2008)

Adicionalmente, en Bogotá se realizan mediciones en vía, en las cuales se efectúa la prueba de opacidad y gases a los vehículos. Es importante mencionar que en los operativos de control no se miden las partículas en vía sino la opacidad a cada uno de los vehículos. Una vez se realiza esta prueba, se genera un concepto técnico que es enviado al propietario de cada vehículo. La información obtenida queda almacenada en la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). De igual manera, esta información reporta si el vehículo se encuentra dentro de los límites de la norma y la presentada al usuario. La información que alimenta la base de datos del equipo de medición se guarda en el dispositivo y se reporta directamente a la SDA. Sin embargo, la información obtenida no se encuentra almacenada y publicada en un sistema de acceso público; únicamente en el Observatorio Ambiental de Bogotá de la Secretaría Distrital de Ambiente se publica la cantidad de mediciones realizadas y cuantas de ellas resultados aprobadas y cuantas no.

Igualmente, existen los límites máximos permisibles para los vehículos que utilizan mezclas de combustibles, los cuales deben cumplir con los límites establecidos para los vehículos ciclo Otto presente en la **Tabla 10** y los vehículos a ciclo diésel mencionados en la **Tabla 12**, así como las motocicletas, motociclo o mototriciclos de dos y cuatros tiempos deben cumplir los límites establecidos en la **Tabla 11**.

No obstante, es importante mencionar que en la actualidad no existe una relación cuantificable y directa entre las partículas y la medición de opacidad y gases. Sin embargo, la prueba de opacidad y gases permite comprobar y controlar el estado de emisiones en el que se encuentra el vehículo midiendo el nivel del humo en el escape con una aceleración máxima del motor.

Durante esta prueba, se mide la cantidad de hollín que emiten los vehículos con motores diésel y la cantidad de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) que emiten los vehículos con motores a gasolina. El hollín por su parte, es uno de los componentes directos del diésel, por esta razón se relaciona con pequeñas partículas en suspensión que no pueden ser tratadas como un gas y cuantificadas a través del analizador de gases, dichas partículas se relacionan con el material particulado $PM_{2.5}$.

Por otro lado, y de acuerdo con la investigación presentada por Espinosa & Salazar (2017), existe una relación directa entre el porcentaje de opacidad y la concentración de material particulado, teniendo en cuenta que ambas variables disminuyen con el incremento de la presión de inyección, en donde al aumentar la presión de inyección, se reduce el dosado de la mezcla, disminuyendo así la formación de hollín en la llama, lo que produce una mayor liberación de calor que acelera el proceso de mezcla y permite oxidar con mayor rapidez el hollín formado, reduciendo la opacidad antes de su expulsión (Espinosa & Salazar, 2017).

Adicionalmente, se menciona que, a través de expresiones matemáticas propuestas, es posible afirmar que, en la prueba estática y dinámica, el porcentaje de opacidad explica el 96,46% y 96,49% de la variabilidad en la concentración del material particulado ($PM_{2.5}$) respectivamente, demostrando que existe una relación lineal directa y fuerte entre las variables mencionadas.

Con el fin de garantizar una reducción significativa en las emisiones generadas de las fuentes móviles, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial determinó disposiciones sobre la certificación inicial de las emisiones contaminantes, en donde todas las fuentes móviles clasificadas como motor ciclo Otto deberán encontrarse dentro de los límites permisibles establecidos en la resolución en mención con el fin de obtener la certificación, la cual será responsabilidad y expedida por el comercializador del vehículo cumpliendo con las Normas Técnicas Colombianas dispuestas en la Resolución 3500 de 2005 por un periodo de dos (2) años.

Adicionalmente, y teniendo en cuenta la Ley 769 de 2002 por medio de la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre, todos los vehículos particulares, de servicio público y motocicletas que circulen por el país deben someterse a las revisiones técnico-mecánicas periódicas, el cual podrá realizarse en cualquiera de los Centros de Diagnóstico Automotor (CDA) con el fin de comprobar que el nivel de emisión de gases contaminantes se encuentre dentro de los parámetros establecidos por la normativa legal vigente.

Asimismo, el Decreto 019 de 2012 establece que los vehículos nuevos de servicio particular diferentes a motocicletas o similares, deberán someterse a la primera revisión técnico-mecánica y de emisiones a partir del sexto año contado a partir de la fecha de matrícula; para el caso de los vehículos nuevos de servicio público, estos deberán someterse a la primera revisión al cumplir dos años a partir de la fecha de matrícula. Una vez cumplidos estos tiempos, deberá realizar anualmente la revisión para todos los vehículos automotores (Ministerio de Transporte, 2018).

Partiendo de la información mencionada anteriormente, la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá emitió la Resolución 1304 de 2012 en la cual se establecen los niveles

máximos de emisión que deben cumplir las fuentes móviles del sector de servicio público terrestre de pasajeros en los sistemas colectivo, masivo e integrado que circulen por la ciudad. De esta manera en la **Tabla 13** se presentan los límites máximos permisibles de emisiones para los vehículos del sector público accionados con diésel (ACPM).

Tabla 13: Límites máximos de opacidad permisibles para vehículos accionados con diésel (ACPM) para el sistema público de transporte

Año modelo	Opacidad (%)
1970 y anterior	50
1971 – 1984	26
1985 – 1997	24
1998 - 2009	20
2010 y posterior	15

Fuente: (Resolución 1304 de 2012)

Adicionalmente, se establece que se debe contar con un sistema de control de emisiones para los vehículos con motor ciclo Diésel del Sistema Integrado de Transporte Público vinculados al sistema de transporte antes de la entrada de vigencia de la Resolución 2604 de 2009, los cuales deben instalar desde abril de 2013 y hasta octubre del 2013, sistemas de control de emisiones como medida de control, teniendo en cuenta los lineamientos establecidos para tal por parte de la SDA, así como los vehículos con motor ciclo Otto convertidos a Gas Natural deberán cumplir con las estipulaciones presentadas en la Resolución 910 de 2008.

De igual manera, se menciona que los vehículos con motor ciclo Otto accionados con gasolina deben seguir cumpliendo con la normatividad relacionada con fuentes móviles establecidas en la Resolución 910 de 2009 y 2604 de 2009. Para el caso de los vehículos con motor ciclo Otto accionados por Gas Natural (GN) o Gas Licuado de Petróleo (GLP) que se encuentren dentro del Sistema Integrado de Transporte Público se debe garantizar que los motores cumplan los niveles de emisiones presentadas en la **Tabla 14** que se relaciona a continuación de conformidad con el Principio de Rigor Subsidiario.

Tabla 14: Límites máximos de emisiones permisibles para motores ciclo Otto, accionados con Gas Natural o Gas Licuado de Petróleo, de vehículos pesados, evaluados mediante ciclo de la Unión Europea (ETC) en (g/kw- h)¹⁶.

Ciclo	Aplicación	CO	NMHC	CH4	NOx
ETC	M2, M3	4.00	0,55	1,10	2.00

Fuente: (Resolución 1304 de 2012)

Por otro lado, para el caso de los vehículos con motor ciclo diésel y que ingresen al Sistema Integrado de Transporte Público de la capital, la SDA estableció en el Artículo 9 de la Resolución 1304 de 2012 los límites máximos de emisión permisibles para estos vehículos basados en los ciclos de la Unión Europea (ESC y ELR) y en los ciclos de Estados Unidos (Ciclo Transitorio de Servicio Pesado y ciclos complementarios). Esta información se puede encontrar en la **Tabla 15** y **Tabla 16** respectivamente.

Tabla 15: Límites máximos de emisiones permisibles para motores ciclo diésel de vehículos pesados, evaluados mediante ciclos de la Unión Europea (ESC y ELR) en (g/bhp-h)¹⁷

Ciclo	Aplicación	CO	HC	NOx	PM
ESC Y ELR	M2, M3	1,50	0,46	2.00	0,02

Fuente: (Resolución 1304 de 2012)

Tabla 16: Límites máximos de emisión permisibles para motores ciclo diésel de vehículos pesados, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos (Ciclo Transitorio de Servicio Pesado y ciclos complementarios) (g/bhp-h)

Ciclo	Aplicación	CO	HC	NOx	PM
	LHDDE				
FTP&SET/ NTE	MHDDE	0,25	0,15	0,01	0,06
	HHDE Urban Bus				

Fuente: (Resolución 1304 de 2012)

Es así como el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emitió en el 2006 la Resolución 601, modificada por la Resolución 610 de 2010 en la cual se expedían los límites de calidad de aire o nivel de inmisión en condiciones de referencia. En ella se establecen los niveles máximos permisibles para los contaminantes criterio en condiciones de referencia. A continuación, se relacionan esta información:

¹⁶ g/kw-h: Gramos por Kilowatio-hora (por sus siglas en inglés: Grams per kilowatt-hour).

¹⁷ g/bhp-h: gramos/caballos de fuerza al freno-hora (por sus siglas en inglés: Grames per brake horsepower-hour)

Tabla 17: Niveles máximos permisibles para material particulado $PM_{2,5}$, PM_{10} y PST (ppb)

Contaminante	Nivel Máximo Permissible (ppb)	Tiempo de Exposición
PST ¹⁸	0,1	Anual
	0,3	24 Horas
PM ₁₀	0,05	Anual
	0,1	24 Horas
PM _{2,5}	0,025	Anual
	0,05	24 Horas

Fuente: (Resolución 610 de 2010)

Teniendo en cuenta la información presentada en la **Tabla 17** los niveles de exposición para material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} se encuentran dentro de los objetivos intermedios 2 (OI-2) de la OMS, los cuales, de acuerdo con la entidad, reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente con relación a los niveles máximos establecidos anteriormente en la Resolución 601 de 2006 la cual se encontraba dentro del objetivo intermedio 1 (OI-1).

No obstante, el Ministerio ha incorporado paulatinamente las recomendaciones establecidas por la OMS para la protección de la salud hasta llegar a la incorporación de unos objetivos progresivos. Sin embargo, para lograr la incorporación de objetivos más estrictos, es necesario que el país mejore en condiciones tales como la infraestructura vial y la calidad de los combustibles, así como la incorporación de criterios más estrictos para la prevención, mitigación y control de la contaminación del aire frente al otorgamiento de licencias ambientales, la renovación del parque automotor, la adopción de tecnologías limpias con mecanismos de control eficientes y la adopción de programas de reducción de la contaminación concertados y con la participación de los actores involucrados en tal (Ministerio de Ambiente - MinAmbiente, 2017).

De esta manera, en el 2017, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emitió la Resolución 2254 de 2017 en la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente, donde se

¹⁸ PST: Partículas Suspendidas Totales

establecen los niveles máximos permisibles en el aire para el año 2030 en Colombia. Esta información se presenta a continuación:

Tabla 18: Niveles máximos permisibles de PM para el año 2030

Contaminante	Nivel Máximo Permissible (ppb)	Tiempo de Exposición
PM ₁₀	0,03	Anual
PM _{2,5}	0,015	Anual

Fuente: (Resolución 2254 de 2017)

Partiendo de lo anterior, la SDA formuló el Programa de Autorregulación Ambiental como instrumento de gestión ambiental para reducir las emisiones de los vehículos con motor accionado a diésel en un programa integral de mantenimiento vehicular a las empresas de transporte público colectivo de pasajeros y de carga con el cual se busca mantener un 20% por debajo del límite permisible establecido en la Resolución 910 de 2008 (Secretaría Distrital de Ambiente, s.f). De esta manera, la Secretaría Distrital de Ambiente modificó los resultados presentados en la **Tabla 12** y **Tabla 13** con el fin de incluir el límite máximo de opacidad permisible de acuerdo al programa de autorregulación. Estas modificaciones se presentan en los Anexos 4 y 5 respectivamente.

Adicionalmente, y teniendo como referencia la ciudad de Bogotá, el PDDAB¹⁹ ha planteado una serie de programas de control y reducción de emisiones aplicables a las diferentes fuentes de emisión (vehiculares e industriales) de acuerdo con sus propias características así como con el contaminante de interés, con el fin de que dichas estrategias permitan alcanzar el propósito global y el cumplimiento normativo de calidad del aire establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible entre los años 2010 – 2020 (Ministerio de Ambiente - MinAmbiente, 2017).

¹⁹ PDDAB: Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá

De esta manera, con la implementación de las estrategias planteadas por PDAAB para las fuentes móviles de la ciudad, se espera un mejoramiento en la calidad del aire, el cual pretende obtener una reducción del 45% de las emisiones contaminantes atmosféricas acumuladas de PM para el periodo 2010 – 2020 (Ministerio de Ambiente - MinAmbiente, 2017).

Teniendo en cuenta el alcance de la presente investigación, a continuación, se presenta el cuadro comparativo frente a la normatividad internacional versus la normatividad nacional con relación a los límites máximos permitidos para material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}). Es importante mencionar que, si bien existe una normatividad relacionada con los límites máximos permitidos de opacidad por modelo de vehículo, no existe una norma de partículas de emisión que cuantifique la relación directa con la opacidad medida en los vehículos.

Tabla 19: Normatividad de Emisión de Partículas

Contaminante	Europa (Euro VI)	Estados Unidos	Colombia
	Nivel Máximo Permisible	Nivel Máximo Permisible	Nivel Máximo Permisible
PM	5 ppb	0,01 (g/mi)	-

Igualmente, se presenta el cuadro comparativo frente a la norma nacional e internacional (Europa y Estados Unidos y la OMS) relacionada con los límites permisibles de la calidad del aire. En esta normatividad, no se discrimina por tipo de fuente generadora (fuente móvil o fija), sin embargo permite comparar el estado actual de cada normatividad con relación a la información presentada por la OMS²⁰ que no ponga en riesgo la salud humana de las personas.

Tabla 20: Normatividad de Calidad del Aire en ppb (Europa Vs Estados Unidos Vs Colombia Vs OMS)

Contaminante	Europa		Estados Unidos		Colombia		OMS*	
	Nivel Máximo Permisible	Periodo de Reporte						
PM ₁₀	0,04	Anual	-	Anual	0,05	Anual	0,02	Anual

²⁰OMS: Organización Mundial de la Salud

Contaminante	Europa		Estados Unidos		Colombia		OMS*	
	Nivel Máximo Permisible	Periodo de Reporte	Nivel Máximo Permisible	Periodo de Reporte	Nivel Máximo Permisible	Periodo de Reporte	Nivel Máximo Permisible	Periodo de Reporte
	0,05	24 Horas	0,15	24 Horas	0,1	24 Horas	0,05	24 Horas
PM _{2.5}	0,02	Anual	0,012 Primario 0,015 - Secundario	Anual	0,025	Anual	0,01	Anual
	-	-	0,035	24 Horas	0,05	24 Horas	0,025	24 Horas

* Media Anual y media de 24 horas.

Considerando la información presentada se puede concluir que al encontrarse un nivel de saturación en la venta de vehículos en la ciudad que para el año 2017 oscilaba en 93788 unidades de 278303 a nivel nacional, se puede determinar que se encuentra directamente relacionado con las emisiones generadas por los vehículos, ocasionando potenciales cargas de contaminación que deterioran la calidad del aire presente en Bogotá. Si bien existe una normatividad frente a las emisiones máximas permitidas por tipo de vehículo, se puede observar que existen falencias en relación a la normatividad colombiana con respecto a la internacional, la cual es más laxa frente a la internacional; asimismo, la normatividad internacional se encuentra en constante actualización con el fin de ser más exigente para garantizar una mayor reducción de las emisiones contaminantes.

6.3. Capítulo 3: Caracterización de la problemática de calidad del aire por material particulado en Bogotá.

Una vez evaluados y evidenciados los resultados anteriores y con el fin de conocer la calidad del aire actual de la ciudad de Bogotá, es necesario realizar una caracterización de esta problemática que permita evidenciar el comportamiento del material particulado a través de los años. Para esto, se tomaron los datos de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del

Aire de Bogotá (RMCAB), las cuales miden diferentes parámetros entre ellos el material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}.

La RMCAB se encuentra conformada por 13 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil, ubicadas en toda la ciudad para realizar el monitoreo continuo de las concentraciones de material particulado, de gases contaminantes y de las variables meteorológicas que se presentan en la ciudad. Los datos recolectados de las estaciones son enviados a una estación central para someterse a un proceso de validación final y posteriormente un análisis con el fin de verificar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire adoptados en la ciudad (Secretaría Distrital de Ambiente, s.f). A continuación, se presentan las coordenadas geográficas de las trece estaciones que hacen parte de la RMCAB, asimismo, en el **Anexo 10** se puede observar la ubicación geográfica sobre el plano de Bogotá de cada una de las estaciones que hace parte de la red de monitoreo de la ciudad.

Tabla 21: Ubicación Geográfica de las Estaciones de la RMCAB

Estación	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
Suba	4,76251	-74,09343
Guaymaral	4,78374	-74,04417
Usaquén	4,70939	-74,03199
Las Ferias	4,69060	-74,08256
Kennedy	4,62490	-74,16135
Centro de Alto Rendimiento	4,65837	-74,08400
MinAmbiente	4,62529	-74,06724
Carvajal- Sevillana	4,59580	-74,14855
Tunal	4,57619	-74,13093
San Cristóbal	4,5725	-74,0836
Bolivia	4,735879	-74,12588
Fontibón	4,6701125	-74,14155
Puente Aranda	4,631779	-74,11748

De esta manera, las trece estaciones miden PM₁₀, no obstante, a la fecha de realización de esta investigación, la estación de Fontibón no se encontraba operando desde el año 2014. Con

esto, y para un periodo comprendido entre 1997 y 2017 (julio) se establecieron las tres estaciones con mayor contaminación por material particulado PM₁₀ de acuerdo con los datos promedio registrados por las estaciones.

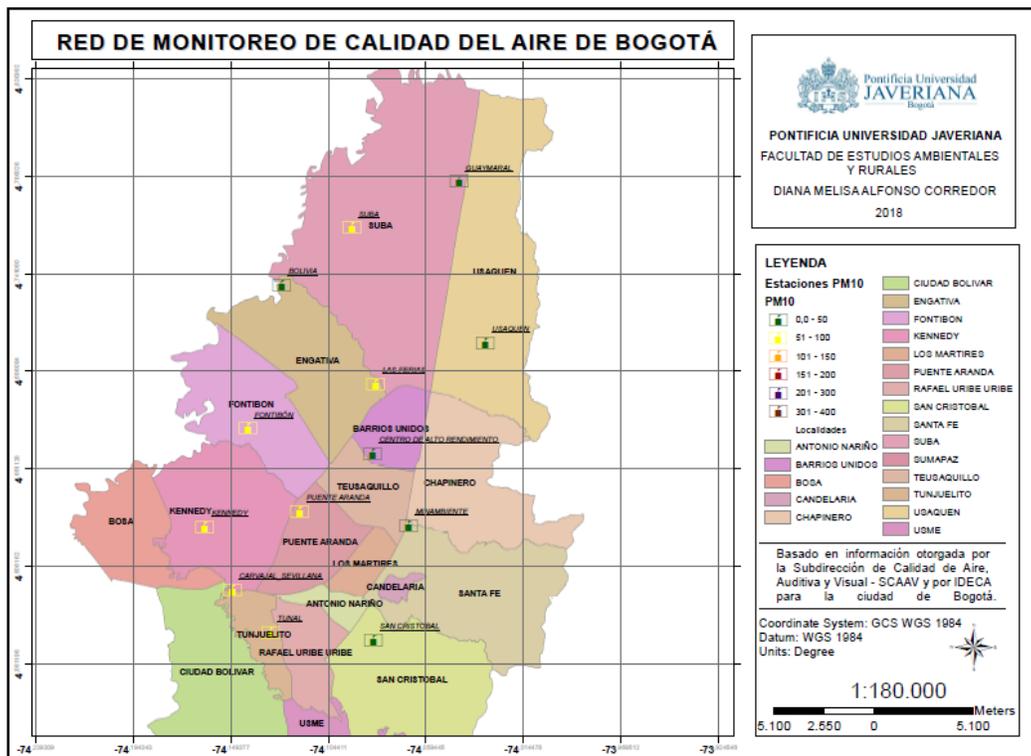
Tabla 22: Estaciones con mayor contaminación de PM10

Estación	Valor Promedio	Valor Máximo
Kennedy	78,77	943,5
Fontibón	77,50	528
Puente Aranda	76,44	692,9
Carvajal	75,92	506,5

* Para conocer con detalle las emisiones de PM₁₀ remitirse al Anexo 7, en el cual se encuentran las memorias de cálculo de las estaciones.

Teniendo en cuenta la información mencionada anteriormente, en la **Ilustración 3** se presenta el mapa de las concentraciones promedio por PM₁₀ en las trece estaciones de referencia.

Ilustración 3: Mapa de Promedio de concentraciones por PM₁₀ en cada estación



Fuente: (Autor, 2018)

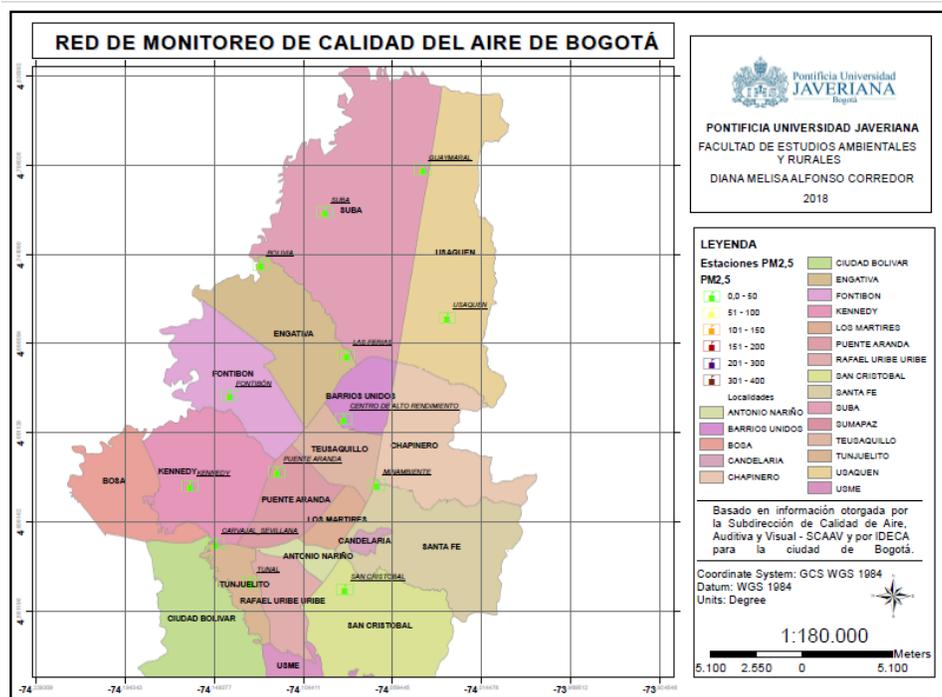
De igual manera, once estaciones de la red de monitoreo miden las concentraciones de material particulado PM_{2.5}, para un periodo comprendido entre 2005 y 2017 (julio). Con base en esta información, se establecieron las tres estaciones con mayor contaminación de PM_{2.5}, las cuales se presentan a continuación.

Tabla 23: Estaciones con mayor contaminación de PM_{2.5}

Estación	Valor Promedio	Valor Máximo
Guaymaral	45,75	360
Kennedy	30,62	716,6
Carvajal	30,30	152,3

* Para conocer con detalle las emisiones de PM_{2.5} remitirse al Anexo 6. en el cual se encuentran las memorias de cálculo de las estaciones.

Ilustración 4: Mapa de Promedio de concentraciones por PM_{2.5} en cada estación



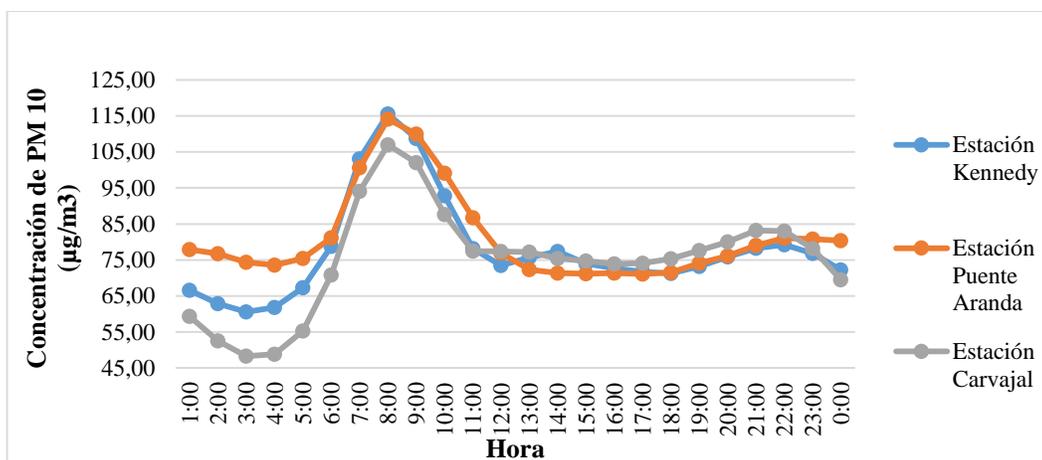
Fuente: (Autor, 2018)

Como se puede observar en la **Tabla 23**, la estación con mayor contaminación es la estación Guaymaral, sin embargo, y teniendo en cuenta la ubicación de esta y el comportamiento histórico de la misma, es posible afirmar que si bien los datos disponibles y reportados por la RMCAB la clasifican como una de las de mayor contaminación, esta información presenta

valores anormales toda vez que su ubicación en cercanías a los cerros orientales de la ciudad permite la recirculación de la contaminación que pueda presentarse en ella. Adicionalmente, esta información puede estar sesgada toda vez que la renovación de los equipos de monitoreo se ha realizado variando las condiciones de calibración entre una marca y otra y la transición de cambio de los equipos pueden generar variaciones que sobrestimen los parámetros registrados.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, para la presente investigación no fue tomada en cuenta la estación de Guaymaral en cada uno de los análisis correspondientes al material particulado, debido a que la información reportada presenta anomalías en relación con los valores promedio superiores al de las demás estaciones objeto de análisis, presumiendo de esta manera que los datos se encuentran mal tomados y considerando que se presentan gran cantidad de valores faltantes de medición, razón por la cual podrían alternar significativamente las propuestas de gestión planteadas.

Una vez identificadas las estaciones con mayor contaminación de material particulado, se eliminan los valores mayores al promedio aritmético +4 desviaciones estándar que sugieren daño o mal registro en la toma de las concentraciones. En la **Gráfica 7** se puede evidenciar el comportamiento horario en las concentraciones registradas en las estaciones que miden PM_{10} .



Gráfica 7: Comportamiento Horario de PM₁₀

De acuerdo a la información presentada en la gráfica anterior, se puede observar que las mayores concentraciones de PM₁₀ se presentan de las 7:00 am a las 9:00 am, periodo en el que es considerando el aumento en la circulación de los vehículos en la ciudad para llegar a sus diferentes destinos laborales, conocido como “hora pico”. Adicionalmente, esta gráfica permite evidenciar que las estaciones de Kennedy y Puente Aranda presentan mayores niveles de contaminación en comparación con la estación de Carvajal. Esto puede estar relacionado principalmente por el tránsito de tráfico pesado que se encuentra presente en las principales vías al occidente y sur de la ciudad.

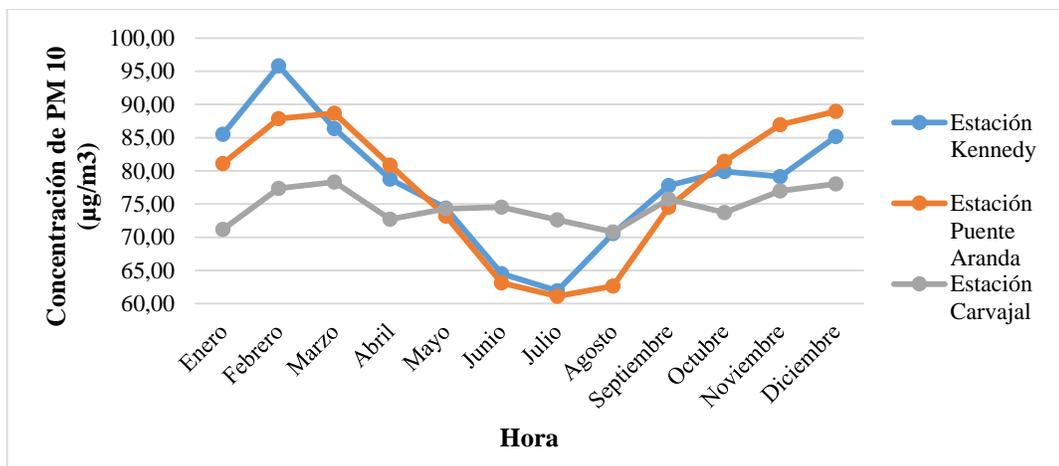
De otro lado, y a pesar de que las concentraciones no son tan elevadas en comparación con la hora pico de las 07:00 a las 09:00 en horas de la noche, se evidencia un aumento en dichas concentraciones, entre las 20:00 a 22:00 horas, este pico puede estar ocasionado principalmente a que es levantado el pico y placa en la capital bogotana y muchos vehículos salen a circulación ya sea para retomar a sus hogares o para realizar alguna otra actividad pendiente. Sin embargo, se puede observar que entre las 22:00 y las 00:00 se evidencia una disminución con relación a las concentraciones, teniendo en cuenta que la ciudad se encuentra descansando para el siguiente

día. Igualmente, se presentan los menores valores de contaminación entre las 03:00 a 04:00 de la mañana hasta que estas empiezan a aumentar a medida que se desarrollan diversas actividades en la capital.

Adicionalmente, y teniendo en cuenta la información de la red de monitoreo, se puede afirmar que a través de los años, las mayores concentraciones de PM_{10} se presentan en los horarios mencionados, comprobando de esta manera que existe una relación directa entre la circulación de vehículos y el aumento en las concentraciones de material particulado. Esta información se puede ver con detalle en el Anexo 11, en el cual se presenta el comportamiento de las estaciones con mayor contaminación a través de los años.

De igual manera, en la **Gráfica 8** se evidencia que existe una disminución en las concentraciones de material particulado durante los meses de Enero y Junio-Agosto, esto debido a que es la temporada de vacaciones y por ende existe una disminución en la circulación de vehículos en la ciudad (ej. Población escolar). Igualmente, y partiendo de que los vehículos de transporte público continúan su operación normal, la disminución en las concentraciones de material particulado se encuentra relacionada directamente con las condiciones climatológicas y meteorológicas presentes en la ciudad, teniendo en cuenta que en esta temporada, se presentan mayores vientos en la ciudad, lo que permite la recirculación del material particulado y la limpieza de la atmósfera.

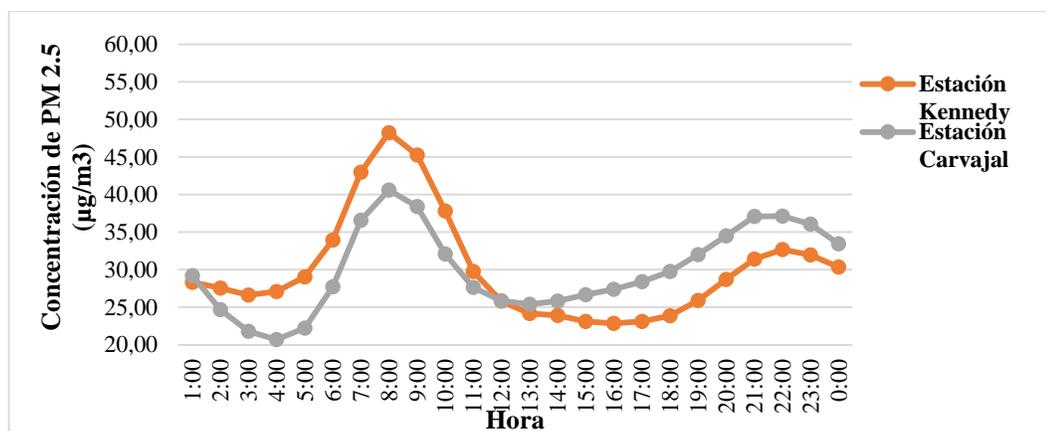
Adicionalmente, se puede evidenciar que para el caso de PM_{10} existe una disminución en las concentraciones durante los meses de marzo, abril y mayo y septiembre, octubre y noviembre, teniendo en cuenta que durante estos meses se producen las dos épocas de lluvias que enfrenta el país con un régimen bimodal. Durante estas épocas de lluvias la atmósfera se lava y las concentraciones de material particulado disminuyen.



Gráfica 8: Comportamiento Mensual de PM₁₀

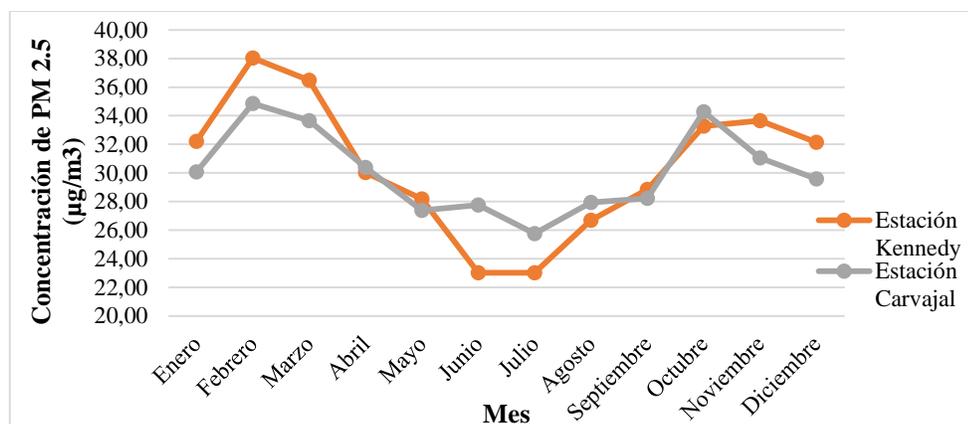
De igual manera, es posible conocer las horas con mayor afectación en material particulado PM_{2,5} en Bogotá. Es así como en la **Gráfica 9** se evidencia que el PM_{2,5} presenta un comportamiento similar al registrado para el PM₁₀ toda vez que sus mayores concentraciones se encuentran registradas de las 07:00 a las 09:00 y entre las 17:00 y 19:00 con el mayor punto de concentración a las 08:00 y a las 17:00, en su orden. Sin embargo, las concentraciones empiezan a disminuir entre las 22:00 y las 00:00.

Como se mencionó anteriormente, estos puntos máximos de concentración se encuentran relacionados con el aumento en la circulación de vehículos en la ciudad, conocidos como “horas pico” en donde los ciudadanos se transportan diariamente para realizar sus diferentes actividades y cumplir con sus obligaciones.



Gráfica 9: Comportamiento Horario de PM_{2,5}

De igual manera, se realizó el análisis en el comportamiento de las concentraciones de PM_{2,5} mensualmente, con el fin de conocer si existe una relación directa entre el aumento de las concentraciones de material particulado y la circulación de las fuentes móviles presentes en la ciudad. En la **Gráfica 10** se presenta el comportamiento en las tres estaciones con mayor contaminación de PM_{2,5}. En ella se observa que al igual que en las estaciones con mayor contaminación de PM₁₀, los meses en que disminuyó la circulación de vehículos en la ciudad por diferentes actividades tales como vacaciones, semana santa o directamente por las condiciones meteorológicas presentes durante esos meses en la ciudad, lo que ocasionó una disminución en las concentraciones de material particulado, específicamente durante los meses de diciembre – enero, abril – mayo y junio – julio. Adicionalmente, y teniendo en cuenta el comportamiento de un régimen bimodal en lluvias, en la ciudad también se registraron menores registros de material particulado durante los meses de abril – mayo y octubre – noviembre; meses en los que se encuentra presente la temporada invernal en la zona Andina considerando la ubicación en la zona de confluencia intertropical. Las memorias de cálculo se encuentran contenidas en los **Anexos 8 y 9** para PM₁₀ y PM_{2,5} respectivamente.



Gráfica 10: Comportamiento Mensual de PM2.5

Por otro lado, en el **Anexo 13** y **Anexo 14**. se presentan los niveles de calidad del aire determinados para cada estación tanto de PM₁₀ como de PM_{2.5} respectivamente, los cuales fueron determinados con base en el Índice de Calidad del Aire (ICA) que establece los niveles de las concentraciones registradas de la calidad del aire a partir de una escala numérica que varía entre 0 y 500 (Metropolitana Valle de Aburrá, 2011).

Tabla 24: Rangos de clasificación de calidad del aire según ICA

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN
0 - 50	Verde	Buena
51 - 100	Amarillo	Moderada
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud
201 - 300	Púrpura	Muy Dañina a la salud
301 - 400	Marrón	Peligrosa
401 - 500	Marrón	Peligrosa

Fuente: (Metropolitana Valle de Aburrá, 2011)

Este índice fue seleccionado en tanto se considera apropiado para llevar a cabo el análisis del estado de la calidad del aire en cada una de las estaciones de la RMCAB, toda vez que presenta una clasificación cualitativa-cuantitativa que incluye especialmente rangos enfocados en el grado de peligrosidad de la concentración de material particulado sobre la salud pública. Con el fin de realizar una adecuada evaluación del ICA de la información recolectada para el desarrollo de la

presente investigación, fue establecido el valor promedio horario de información capturada por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) para cada una de las estaciones contemplado los periodos de tiempo entre los años 1997 y 2017 para PM_{10} y entre los años 2005 y 2017 para $PM_{2.5}$.

Con base en la información arrojada por el ICA se puede concluir que de las 13 estaciones de monitoreo para PM_{10} , siete de ellas se encuentran dentro de la clasificación moderada con un color amarillo (ver ilustración 3 y Anexo 13) las seis restantes se encuentran con una calidad del aire buena. Por otro lado, para las estaciones de monitoreo de $PM_{2.5}$, las once estaciones de medición se encuentran dentro de la calidad del aire buena (ver ilustración 4 y Anexo 14) al encontrarse dentro de los rangos propuestos por el ICA, en tanto las estaciones medidas con esta referencia se consideran con buenas mediciones y dentro de los rangos establecidos por el ICA, sin embargo, a la luz de lo establecido por la EPA y OMS no son valores deseados para la protección de la salud humana y del ambiente toda vez que superan los límites permisibles por la OMS y ponen en riesgo la salud de cada una de las personas, así como la calidad del ambiente (una posible razón es que el efecto de las partículas queda enmascarado por las demás variables).

No obstante, de acuerdo con los límites admisibles por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es posible afirmar que, aunque el estado de calidad del aire generado para las estaciones objeto de estudio a partir de la clasificación propuesta por el ICA es relativamente apropiado, el estado real de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá presenta valores por encima de los establecidos que ponen en riesgo la salud humana tanto para PM_{10} ($>50\mu\text{g}/\text{m}^3$) como para $PM_{2.5}$ ($>25\mu\text{g}/\text{m}^3$). De acuerdo con las perspectivas colombianas de los escenarios futuros de la calidad del aire en el país, para el año 2030 se pretende restringir los valores máximos admisibles de concentración de material particulado con el fin de enmarcarse dentro del segundo objetivo

propuesto por la Organización Mundial de la Salud el cual indica valores de concentración de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, y así reducir el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente. Sin embargo, una vez efectuada esta investigación, el panorama es desalentador, teniendo en cuenta que en la actualidad, las concentraciones de las estaciones de monitoreo se encuentran por encima de los límites máximo permisibles y adicionalmente, como se ha mencionado anteriormente la tendencia indica que para el futuro la flota vehicular aumentará teniendo en cuenta la línea tendencial de años anteriores y el crecimiento demográfico de la ciudad de Bogotá.

Finalmente, la ciudad se encuentra lejos de llegar a alcanzar la inclusión dentro del objetivo intermedio -3 (OI-3) propuesto por la OMS para garantizar una calidad del aire viable y segura a los ciudadanos, en donde se reduce la exposición máxima permitida tanto para PM_{10} como para $\text{PM}_{2.5}$ favoreciendo la calidad de vida de los ciudadanos reduciendo en un 6% la mortalidad (OI-3), teniendo en cuenta que, la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón aumenta en respuesta a la exposición prolongada de $\text{PM}_{2.5}$ con un 95% de confianza.

6.4. Capítulo 4: Estrategias de Gestión Ambiental para la reducción de material particulado.

Partiendo de los resultados arrojados en los capítulos anteriores sobre la relación en el aumento de la flota vehicular, la población y las concentraciones de material particulado; es necesario establecer estrategias a mediano y largo plazo que permitan reducir la concentración del material particulado y por ende mejorar la calidad de vida de los bogotanos.

Dentro de las estrategias a considerar se propone desincentivar el uso del vehículo personal en los desplazamientos a realizar activando el transporte colectivo en car sharing, de tal forma que los ciudadanos que normalmente utilizan cinco (05) vehículos diferentes para llegar a

un sitio, lleguen a transportarse en un solo vehículo disminuyendo de esta manera las emisiones de los cuatro (04) vehículos restantes, articulando esta estrategia inicialmente dentro de entidades a través de políticas de las mismas hasta conseguir una implementación masiva en la ciudad. Adicionalmente, y como parte complementaria de esta estrategia, es necesario que la ciudad cuente con un modelo de Sistema Integrado de Transporte Público masivo completo e interconectado con tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente frente a sus emisiones que permita garantizar a los ciudadanos un desplazamiento rápido, cómodo y oportuno.

De igual manera, se debe garantizar la renovación de la flota vehicular por vehículos eléctricos e híbridos que sean amigables con el ambiente y no generen emisiones en los trayectos. Esta propuesta debe ir acompañada de incentivos económicos tales como la exoneración en el pago de impuesto, que a su vez permitan recuperar la inversión inicial con la adquisición de estas tecnologías para reducir las emisiones.

Adicionalmente, y con el fin de garantizar una acogida apropiada en la renovación de la flota por vehículos eléctricos, es necesario establecer y actualizar las redes de estaciones de servicio eléctrico que permitan recargar el vehículo en cualquier parte de la ciudad a través de la implementación de celdas o paneles solares al alcance de todos gratuitamente.

De otro lado, la adecuación de la malla vial en la ciudad es fundamental para lograr los objetivos de reducción de emisiones, toda vez que, al contar con una malla vial adecuada y en buenas condiciones se facilita la circulación de los vehículos, los cuales no tendrán que detenerse constantemente y por ende evitarán la quema de combustible reduciendo las emisiones generadas; en tanto se conoce que la velocidad media actual de circulación es de apenas 23 km/h la cual desciende en zonas de alto tráfico en hasta 12,3 km/h . De igual manera, es pertinente la

implementación de semáforos inteligentes que permitan agilizar la movilidad en las principales vías con mayor afluencia con el fin de reducir la generación de emisiones con cada parada y estacionamiento por parte del automotor.

Con el fin de garantizar una reducción en las emisiones de material particulado, es necesario realizar una reconversión de combustible de diésel a otros combustibles, teniendo en cuenta que éste aporta 3 veces más la carga contaminante a la atmosfera que otros combustibles. Adicionalmente, y complementando esta estrategia, es necesario la implementación de filtros de partículas directamente desde la fuente de emisión; esto considerando que las alternativas planteadas actualmente son utópicas y a largo plazo. Sumado a esto, la alta inversión en cada una de las alternativas, hace pensar en la implementación de medidas para la mitigación de las emisiones desde su fuente generadora.

Por otro lado, es necesario que las restricciones establecidas para la circulación de la flota vehicular sean más estrictas respecto al año de fabricación y motor de los mismos, con el fin de garantizar una reducción en las emisiones generadas por fuentes móviles. Adicionalmente, y teniendo en cuenta que el transporte público aporta el 50% de las emisiones totales de material particulado, es necesario que la tecnología que estos vehículos usen sea de última generación (Euro 6 o superior) o remplazada por una flota vehicular eléctrica e híbrida, así como los controles y revisiones técnico-mecánicas sea constante y oportuno, que permita garantizar una mejora en la calidad del aire de la ciudad.

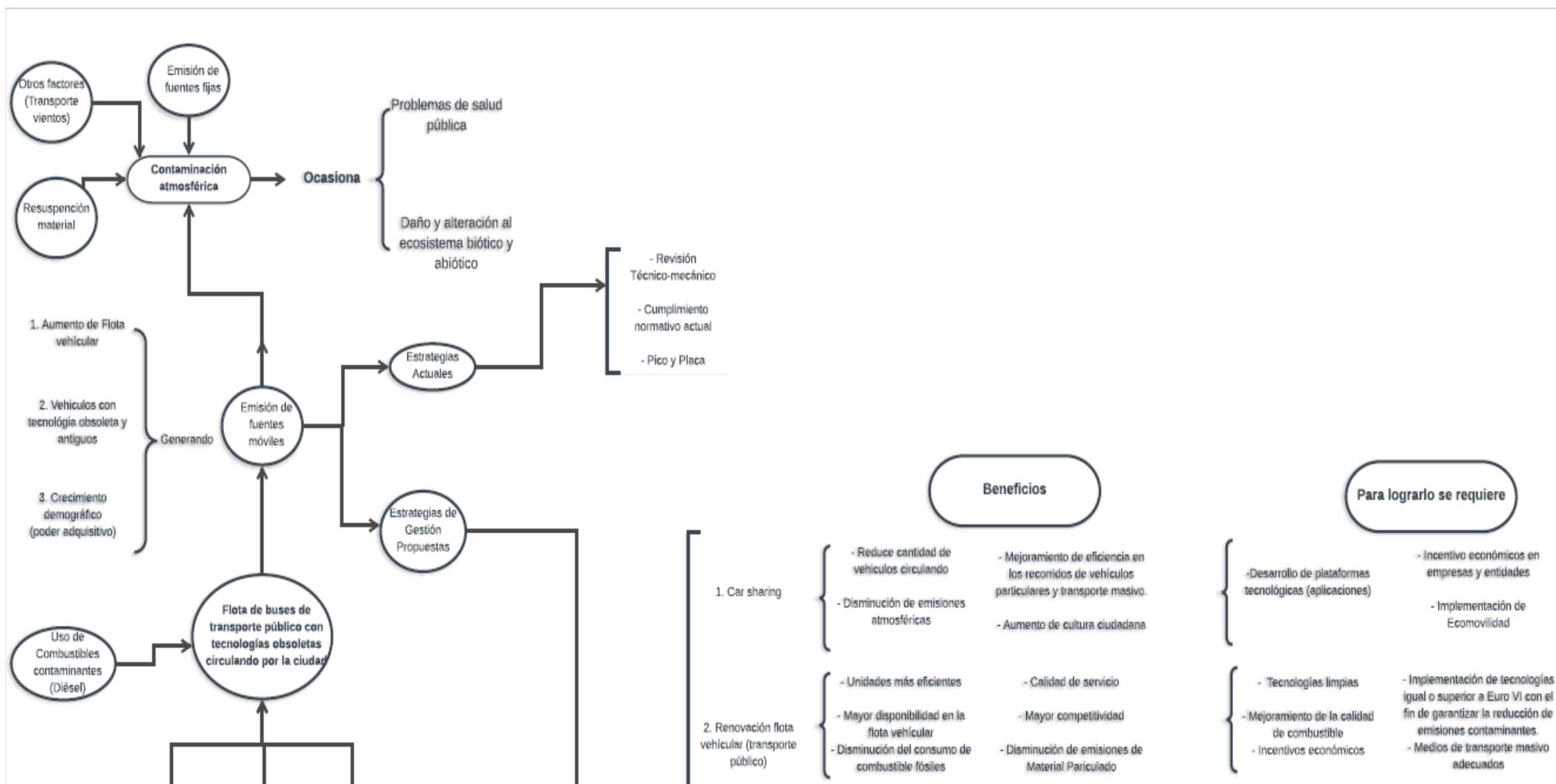
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación, es necesario realizar una planeación del territorio y de la ciudad con base en los niveles de contaminación de la misma, en donde se tenga en cuenta la dinámica meteorológica de la ciudad para la planeación

territorial de manera tal que las emisiones puedan dispersarse de manera más rápida y a su vez la población no se vea completamente afectada por esto.

De igual manera, es importante considerar dentro de esta problemática que hasta la fecha no se ha tenido en cuenta el polvo que los vehículos levantan cuando están rodando, el cual es uno de los factores de contaminación altos que se generan y que no ha tenido en cuenta dentro del inventario de emisiones alto generado. Este polvo es producto entre la fricción de la llanta y el asfalto, para lo cual se debe considerar el diseño de llantas que limite la fricción generada entre la llanta y el asfalto.

En resumen, la gestión planteada para esta problemática se presenta en el siguiente diagrama. Adicionalmente, esta información se puede observar con mayor detalle en el **Anexo 15** de la presente investigación.

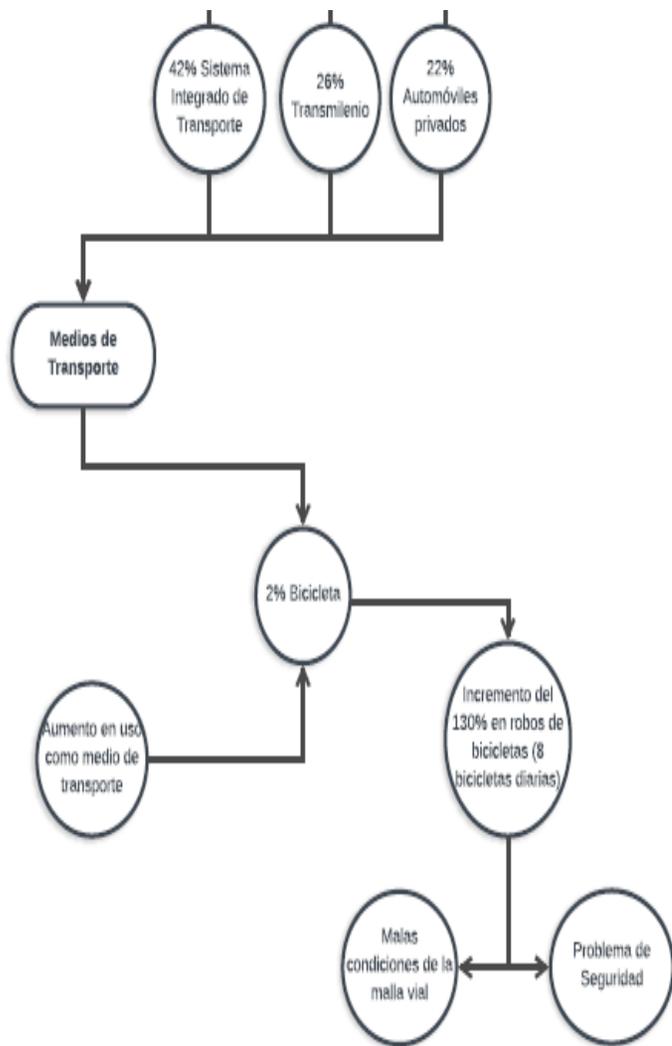
Ilustración 5: Gestión ambiental de las emisiones vehiculares en la ciudad de Bogotá D.C.



Beneficios

Para lograrlo se requiere

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Mejoramiento de eficiencia en los recorridos de vehículos particulares y transporte masivo. - Aumento de cultura ciudadana | <ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo de plataformas tecnológicas (aplicaciones) - Incentivo económicos en empresas y entidades - Implementación de Ecomovilidad |
| <ul style="list-style-type: none"> - Calidad de servicio - Mayor competitividad - Disminución de emisiones de Material Particulado | <ul style="list-style-type: none"> - Tecnologías limpias - Implementación de tecnologías igual o superior a Euro VI con el fin de garantizar la reducción de emisiones contaminantes. - Mejoramiento de la calidad de combustible - Incentivos económicos - Medios de transporte masivo adecuados |



7. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la investigación, se puede concluir que a medida que aumenta la población, se evidencia un aumento en los vehículos matriculados en la ciudad; esto debido a que la ciudad no cuenta con un adecuado Sistema Integrado de Transporte Público que logre atender la demanda que se adiciona. No obstante, y teniendo en cuenta las restricciones actuales de la administración frente a la restricción de movilización de vehículos (pico y placa), obliga a los ciudadanos a adquirir 2 o más vehículos para poder movilizarse a sus diferentes destinos.

A partir de la información recolectada con relación a la venta de vehículos, es posible afirmar que Bogotá ha alcanzado a la fecha, un punto de saturación en ventas anuales, teniendo en cuenta que este crecimiento obedece a un modelo polinomial, en donde las variaciones presentadas se pueden explicar con el paso de los años. Este punto de saturación en los vehículos se puede evidenciar en la lenta movilidad que vive la ciudad ocasionándole pérdida de competitividad con respecto a otras ciudades.

Se puede concluir de acuerdo a la información recolectada en cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, que las concentraciones promedio de PM_{10} y $PM_{2,5}$ superan los límites permisibles por la OMS. Si bien, de acuerdo a la clasificación de la calidad del aire propuesta por el ICA, frente a $PM_{2,5}$ en promedio todas las estaciones se encuentran en una buena calidad, la realidad es otra, toda vez que, estas partículas son las que se acumulan en los alvéolos de las personas y ocasionan graves enfermedades al estar altamente expuesto a éstas.

De igual manera, se puede concluir que, teniendo en cuenta la predominancia y comportamiento de los vientos en la ciudad de Bogotá, los cuales se desplazan de oriente a

occidente, tienen una influencia directa frente a las concentraciones de material particulado reportado por las estaciones tales como Kennedy y Puente Aranda, toda vez que, este flujo arrastra el material particulado a la zona occidental de la ciudad; motivo por el cual se puede apreciar que las estaciones ubicadas en el oriente de la ciudad registran concentraciones de material particulado mucho menores a las ubicadas en la zona occidental de Bogotá.

Adicionalmente, se debe considerar la ubicación de cada una de las estaciones de monitoreo y a su vez conocer las actividades que se desarrollan en la zona ya que pueden influir directamente en el aumento de las concentraciones de material particulado. Por otro lado, el estado y la calidad de la malla vial aledaña a la ubicación de cada estación, puede generar alteración en el reporte presentado por la RMCAB. Siendo este último, un factor determinante e influyente en las emisiones reportadas ya que las principales vías de transporte de tráfico pesado se encuentran ubicadas en la zona occidental y sur de la ciudad.

Por otro lado, fue posible concluir que si bien existían datos para la estación de Guaymaral que arrojaba a esta como una de las de mayor grado de contaminación, esta no fue tomada en cuenta dentro de los análisis multitemporales toda vez que los datos se encontraban con valores anormales y sesgados que podían alterar las variables a ser analizadas y a su vez las propuestas de gestión a plantear.

Asimismo, una vez recolectada la información correspondiente a las tecnologías y normativas aplicadas en las grandes capitales de países desarrollados, se evidencia que Bogotá se encuentra lejos de llegar al nivel de estos países, toda vez que la renovación de flota vehicular propuesta actualmente por el Distrito para Transmilenio se base en tecnologías Euro V, la cual en Europa se encuentra fuera de circulación debido a sus porcentajes de emisiones contaminantes que alteran el ambiente y la salud humana.

Dentro de los pliegos de licitación propuestos por el Distrito se evidencia que los vehículos deben contar con tecnologías limpias y que cumplan como mínimo con el estándar requerido por la norma Euro V para contribuir con un aire más limpio. No obstante, en estos pliegos no fueron tenidas en cuenta las investigaciones y recomendaciones de expertos al respecto con vehículos eléctricos y vehículos con motores Euro VI, al ser esta última la norma actual que rige en el territorio europeo y que garantiza la reducción de emisiones.

Frente a las emisiones generadas con tecnologías Euro VI se encuentra una reducción suplementaria de más del 50% de emisiones contaminantes respecto a la norma Euro V, lo que nos demuestra que se podría mejorar la calidad del aire y de vida de las personas exigiendo tecnologías limpias en cumplimiento de la norma Euro VI, teniendo en cuenta que los vehículos de transporte público son los mayores aportantes de emisiones de material particulado en Bogotá.

Por otro lado, y teniendo en cuenta que la flota vehicular de transporte público que circula en Bogotá es de vehículos de modelos muy antiguos, la carga contaminante de sus emisiones es muy alta, motivo por el cual se puede evidenciar en la investigación que estos vehículos son el mayor aportante de emisiones de material particulado. Adicionalmente, se evidencia un aumento en las emisiones contaminantes por material particulado a partir de las 5 de la mañana, hora en la cual los vehículos de transporte público empiezan su jornada laboral.

Finalmente, se pudo concluir que si bien la medida restrictiva de pico y placa aplica en mayor proporción para los vehículos particulares, es necesario aumentar dicha restricción en los vehículos de transporte público teniendo en cuenta que son los que mayor aporte realizan a la ciudad en materia de emisiones de material particulado. Esta restricción se puede plantear considerando el modelo y el tipo de combustible utilizado por el automotor con el fin de reducir

el tiempo de circulación en la ciudad y a su vez reducir las cargas contaminantes de material particulado generadas por estos vehículos.

Para que esta medida sea efectiva y no genere complicaciones en la población, se debe considerar y plantear un modelo de transporte público interconectado que permita mejorar el desplazamiento de las personas y a su vez reducir las emisiones generadas. Es decir, que se requiere de diferentes alternativas que se encuentren estrechamente relacionadas con el fin presentar resultados óptimos, como por ejemplo, la construcción del metro y de los trenes de cercanía permitirá reducir y descongestionar la demanda de pasajeros en los buses de transporte público actuales y que a su vez tengan tecnologías amigables con el ambiente.

Adicionalmente, la implementación de esta estrategia debe estar enfocada principalmente sobre los vehículos de transporte público antiguos y que operen con combustibles diésel, en donde la renovación de la flota vehicular acarreará beneficios económicos tales como la reducción o exoneración de impuestos asociados, teniendo en cuenta su contribución al mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad. De esta manera se hace necesario la selección adecuada de lotes de vehículos con emisiones aceptables que cumplan con las condiciones normativas y con los diversos sistemas de gestión para la reducción de emisiones desde la fuente.

Finalmente, esta medida de gestión operará para los vehículos de transporte público que no cumplan con los estándares de calidad generando altas concentraciones de material particulado, buscando de esta manera incentivar la reconversión del sistema de transporte público con tecnologías limpias tales como vehículos eléctricos e híbridos o vehículos con tecnologías Euro VI o superior.

8. Recomendaciones

De acuerdo con la clasificación de la OMS, se concluye que es necesario cambiar los estilos de vida con el fin de lograr una reducción sustancial de las emisiones y garantizar la mejora en la calidad de vida, dentro de este cambio de estilo de vida una de las recomendaciones fundamentales es el uso de transporte masivo y la reducción del vehículo particular, pues la población que se moviliza a diario con vehículos generalmente lo hace sola, generando mayores emisiones de material particulado.

Partiendo de los resultados evidenciados, se recomienda que el ingreso de la nueva flota vehicular tanto para transporte público como transporte particular, cumpla con las condiciones exigidas en la normatividad, en donde es necesario que esta tecnología se encuentre por encima de Euro VI teniendo en cuenta que este tipo de tecnología emite menores emisiones de material particulado y a su vez busca preservar la salud de los ciudadanos.

Se recomienda diseñar y construir un adecuado sistema integrado de transporte público interconectado en la ciudad, teniendo en cuenta que este sin duda recudirá la movilización de los vehículos particulares y a su vez la emisión de material particulado. Este sistema debe estar basado en tecnologías limpias o vehículos con tecnología de norma Euro VI o superior con el fin de disminuir la carga contaminante a la cual se ve expuesta la ciudad por emisiones por material particulado provenientes de fuentes móviles y que a su vez permitan obtener una solución óptima y favorable a nivel de movilidad.

Se recomienda realizar paulatinamente un cambio de tecnología en los vehículos que circulan en la ciudad, adoptando estrategias como la implementación y uso de vehículos eléctricos e híbridos. No obstante, es necesario priorizar y realizar una reconversión del tipo de

combustible en cada uno de los vehículos teniendo en cuenta que, el uso y calidad del diésel genera un aporte mayor de emisiones de material particulado al realizarse su combustión.

Finalmente, es necesario realizar la implementación y articulación de las estrategias mencionadas y el cambio normativo en conjunto con el fin de obtener resultados esperados, ya que si bien, únicamente el cambio normativo no generará una reducción sustancial en las emisiones de material particulado.

9. Referencias

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2010). Contaminación atmosférica. La contaminación atmosférica perjudica la Salud humana y el medio ambiente, 7. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/downloads/614d5dfa214c977868c097af826fc6f0/1484643935/intro.pdf>

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2013, Abril 23). La legislación europea en relación con el aire. Señales - Vivir en un clima cambiante, 1-10. Retrieved Junio 23, 2018, from <https://www.eea.europa.eu/downloads/65f6aee22c874e9e96e721709ef1fdbb/1464912702/la-legislacion-europea-en-relacion.pdf>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2012, Noviembre 13). Información General de Bogotá. Retrieved Agosto 20, 2018, from <http://www.bogota.gov.co/ciudad/informaci%C3%B3n-general-de-bogot%C3%A1>

Barreto, L. P. (2015). El aire como recurso y los afectores que lo afectan. Apuntes de Clase (Vol. Documento No. 69). Bogotá: Universidad de la Salle. Retrieved April 30, 2017

Betancur, L. (2017, May 8). Atención de males por calidad del aire cuesta 1,6 billones al año. Periódico El Tiempo. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/informe-de-calidad-del-aire-en-colombia-del-dnp-85038>

Bogotá tendrá pronóstico de la calidad del aire. (2017, May 9). Periódico El Tiempo. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/bogota/en-bogota-se-podra-consultar-la-calidad-del-aire-en-pagina-web-de-la-secretaria-de-ambiente-86338>

Cabrera, C. (2017, July 9). Las ciudades con el aire más limpio del mundo, según la OMS - Medio Ambiente - Vida. Periódico El Tiempo. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/las-ciudades-con-el-aire-mas-limpio-del-mundo-segun-la-oms-107092>

Cabrera-Arana, G., Velásquez-Osorio, N., & Orozco-Arbelaez, A. (2015). Movilidad: Aporte para su discusión. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 33(3). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v33n3a13>

Casas, W., Otorlano, L., & Sánchez Triana, E. (n.d.). Capítulo 4: Modelos de calidad del Aire. In *Adaptación del Capítulo de evaluación de impactos ambientales en la atmósfera*. Libro Environmental Planning and Decision Making Wiley (1984).

Celis, J. E., Morales, J. R., Zaror, C. A., & Carvacho, O. F. (2007). Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán

(Chile). *Informacion Tecnologica*, 18(3), 49–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000300007>

Chow, J. C., Watson, J. G., Shah, J. J., Klang, C. S., Loh, C., Lev-On, M., ... Lulsa, M. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 54(6), 644–680. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936>

Contaminación atmosférica. (n.d.), 1–10. Retrieved from <https://www.agro.uba.ar/users/semmarti/Atmosfera/contatmosf.pdf>

Contaminación en Bogotá - Bogotá. (2016, October 26). Periódico El Tiempo. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/bogota/contaminacion-en-bogota-36856>

DANE. (2017). Proyecciones de Población. Recuperado el 20 de Julio de 2018, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Delphi Technologies. (2018). Global Emission Standars Guide. Retrieved Junio 18, 2018, from https://d2ou7ivda5raf2.cloudfront.net/sites/default/files/2018-04/2018-2019%20Global%20emissions%20standards%20guide_0.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (2017). Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones. Retrieved October 21, 2017, from [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)

DieselNet. (s.f). United States: Cars and Light-Duty Trucks: Tier 2. Retrieved Julio 07, 2018, from United States: Cars and Light-Duty Trucks: Tier 2:

https://www.dieselnet.com/standards/us/ld_t2.php

Duarte, C. S. (2010). Línea de Calidad de Aire y Salud. Recuperado el 28 de Septiembre de 2018, de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/linea-de-calidad-de-aire-y-salud>

Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Informacion Tecnologica*, 23(1), 163–176. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>

Espinosa, V. M., & Salazar, E. F. (2017, Abril). Correlación entre la opacidad y el material particulado PM2.5, en vehículos diésel en la ciudad de Quito utilizando como muestra un motor de prueba. Retrieved Junio 28, 2018, from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19310>

Franco, J. F. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. *Revista EAN*, ISSN 0120-(72), 193–204.

García Sánchez, G. F., Chacón Velasco, J. L., & Chavés Guerrero, A. (2013). Modelado de la combustión en motores Diésel: revisión del estado del arte. *Revista ION*, 26(1), 41–54. <https://doi.org/0120-100X>

Giraldi, J. (2007). Motores De Combustion Interna. In 1985 Agroamericana (Ed.) (p. 133). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Granada-Aguirre, L. F., Pérez-Vergara, I., Valencia-Rodríguez, M., Rojas-Alvarado, R., & Herrera-Orozco, I. (2014). Sistema para el manejo de la calidad del aire en la ciudad de Cali - Colombia. *Ingeniería Industrial*, 35(1), 13–24. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362014000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Guillermo Aguilera. (2013). *La Contaminación del Aire. La amenaza esta en el viento*. Información Ambiental (Vol. 1).

Hernández , R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). McGraw Hill Education. Recuperado el 21 de Agosto de 2018

IDEAM. (2012). Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. Ideam. Bogotá, D.C. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

IDEAM. (2014). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA - CALIDAD DEL AIRE. Retrieved October 22, 2017, from <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>

IDEAM. (2016). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011 – 2015. Bogotá, D.C. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-imageviewer.pl?biblionumber=38104>

IDEAM. (2018). Atlas de Viento de Colombia. Recuperado el 31 de Agosto de 2018, de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

IDEAM. (s.f). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Bogota. Recuperado el 29 de Agosto de 2018.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2012). Índice de calidad del aire (ICA). Ideam, 1–8.

Introducción al monitoreo atmosférico. (s.f). Retrieved Junio 25, 2018, from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap5.pdf>

Jiménez, J. (2016). Alemania propone prohibir la venta de coches no eléctricos en 2030. Retrieved November 15, 2017, from <https://www.xataka.com/ecologia-y-naturaleza/alemania-propone-prohibir-la-venta-de-coches-no-electricos-en-2030>

Lacasaña-Navarro, M., Aguilar-Garduño, C., & Romieu, I. (1999). Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *203 Salud Pública De México*, 41(3), 203–215. <https://doi.org/10.1590/S0036-36341999000300008>

Legarreta Perusquia, A., Delgado Ríos, M., Corral Avitia, A. Y., Torres Pérez, J., & Flores Marguez, J. P. (2016). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Cultura Científica Y Tecnológica (CULCyT)*, 12(56), 234–245.

Liñan, A. (2002). Modelos de combustión y fuego.

Londoño-Ciro, L. A., Cañón-Barriga, J. E., & Giraldo-Ocampo, J. D. (2017). Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(1), 111–122. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n1a12>

Lovera, D., Osses, M., Nikila, N., Nuñez, D., Valentín, L., Mayor, G., ... Vera, S. (2004). Modelo IVE: Metodología, mediciones y simulación de las emisiones de fuentes

móviles en la ciudad de Lima - Perú. Revista Del Instituto de Investigación FIGMMG, 7(14), 92–99.

Manzur, M., Benzal, G., & González, S. (2012). Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Actas VII Congreso de Medio Ambiente AUGM, 1–19.

Retrieved from

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26838/Documento_completo.pdf?sequence=1

Martínez, E., Quiroz, C. M., & Rúa, J. A. (2011). Morbilidad respiratoria asociada con la exposición a material particulado en el ambiente. Revista de La Facultad Nacional de Salud Pública., 29(4), 454–460. Retrieved from

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=83287921&lang=es&site=ehost-live>

Martínez, I. (1995). Procesos de combustion : características, 55–82.

Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. Atmospheric Environment, 33(24–25), 4029–4037. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2)

Metropolitana Valle de Aburrá. (2011). ICA (Índice de Calidad del Aire). Retrieved Agosto 17, 2018, from Calidad del Aire en el Valle de Aburrá:

<http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/ica.aspx>

Ministerio de Ambiente - MinAmbiente. (2017, Agosto). Documento Técnico de Soporte. Retrieved Junio 28, 2018, from

<http://www.andi.com.co/Uploads/Documento%20tecnico%20de%20soporte%20Agosto%20V5%20Final.pdf>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, & Consultor K-2 Ingeniería. (2008). PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE, 287.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Transporte, Ministerio de Protección Social, IDEAM, & Departamento Nacional de Planeación. (2005). Lineamientos para la formulación de la política y control de la contaminación del aire. Documento Conpes, 1–30.

Ministerio de Ambiente-Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). POLÍTICA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE. Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible. Bogotá, D.C. <https://doi.org/978-958-57674-9-2>

Ministerio de Salud - MinSalud. (n.d.). Infecciones Respiratorias Agudas (IRA). Retrieved October 31, 2017, from [https://www.minsalud.gov.co/salud/Paginas/Infecciones-Respiratorias-Agudas-\(IRA\).aspx](https://www.minsalud.gov.co/salud/Paginas/Infecciones-Respiratorias-Agudas-(IRA).aspx)

Ministerio de Transporte. (2018). Transporte Automotor - Revisión Vehicular Mecánica y Gases. Retrieved Julio 09, 2018, from <https://www.mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=FAQ&lFuncion=viewPreguntas&id=76>

Minsiterio de Salud - MinSalud. (n.d.). Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Retrieved October 31, 2017, from <https://www.minsalud.gov.co/salud/publica/PENT/Paginas/Enfermedad-pulmonar-obstructiva-cronica.aspx>

Ochoa-Jiménez, D. A., Cueva-Agila, A., Prieto, M., Aragón, G., & Benitez, Á. (2015). CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN DE LÍQUENES EPÍFITOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE LOJA (ECUADOR). *Caldasia*, 2(37), 333–343. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n2.53867>

Organización Mundial de la Salud, O. (2014). OMS | 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica. WHO. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>

Organización Mundial de la Salud, O. (2016). Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Retrieved October 31, 2017, from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs315/es/>

Organización Panamericana de la Salud, O., & Organización Mundial de la Salud, O. (2012). Unidad de Atención de Enfermedad Respiratoria Aguda Comunitaria - UAERAC/UAIRAC. Retrieved from http://www.paho.org/col/index.php?option=com_content&view=article&id=1755:unidad-de-atencion-de-enfermedad-respiratoria-aguda-comunitaria&Itemid=361

Ortiz Durán, E., & Rojas Roa, N. (2013). Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM 10 en Bogotá. *Revista de Salud Pública*, 15(1), 90–102. <https://doi.org/10.15446/rsap>

Pachon, J. E., & Sarmiento Vela, H. (2008). Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia. *Revista Facultad De Ingenieria-Universidad De Antioquia*, 120–133.

Panadero, J. (2012). Análisis de normativas de emisiones por países y continentes - Tecmovia. Retrieved October 2, 2017, from <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/07/15/analisis-de-normativas-de-emisiones-por-paises-y-continentes/>

Parlamento Europeo. (2011). Reglamento (UE) n° 582/2011 de la Comisión Europea, (6), 1–168.

Pérez, J. E. (2017). La calidad del Aire en Colombia: Un problema de salud pública, un problema de todos. *Revista Biosalud*, 16(2), 5-6. doi:DOI: 10.17151/biosa.2017.16.2.1

Ramírez, I. (21 de Noviembre de 2017). Ubicación de la Ciudad. Recuperado el 2018 de Septiembre de 02, de Alcaldía Mayor de Bogotá: <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>

Revista Cesvimap. (2016, Enero 26). Control de emisiones contaminantes en Europa y Estados Unidos. Cesvimap. Retrieved Junio 2018, 25, from <http://www.revistacesvimap.com/control-de-emisiones-contaminantes-en-europa-y-estados-unidos/>

Riojas-Rodríguez, H., Álamo-Hernández, U., Texacalac-Sangrador, J. L., & Romieu, I. (2014). Health impact assessment of decreases in PM 10 and ozone concentrations in the Mexico City Metropolitan Area . A basis for a new air quality management program. *Revista de Salud Pública de México*, 56(6), 579–591.

Rojas, N. (2007). Aire y problemas ambientales de Bogotá. *Foro Nacional Ambiental*, Documento de Políticas Públicas, 18(Problemas ambientales de Bogotá), 12.

Romero, M., Francisca, D., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene Epidemiológica* y *Epidemiológica*, 44(2), 15. Retrieved from http://www.bvs.sld.cu/revistas/hie/vol44_2_06/hie08206.htm

Sanín Cortés, N. (2002). Construcción de un Modelo Tridimensional para Ajuste de Campos de Viento y Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera.

Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Empresa de Transporte Tercer Milenio Transmilenio S.A., Universidad de Los Andes, & Universidad de La Salle. (2010). Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. (Oficina Asesora de Comunicaciones, Ed.). Bogotá, D.C. Retrieved from http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886

Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2015a). Conozca el Índice Bogotano de calidad del Aire, IBOCA , (2).

Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2015b). Índice Bogotano de Calidad del Aire - IBOCA. Retrieved October 22, 2017, from <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=43>

Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (n.d.). Red de Calidad del Aire - Secretaría Distrital de Ambiente. Retrieved October 22, 2017, from <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/red-de-calidad-del-aire>

Secretaría Distrital de Ambiente. (s.f). Programa de Autorregulación Ambiental. Retrieved Junio 14, 2018, from <http://ambientebogota.gov.co/de/autorregulacion>

Secretaría Distrital de Ambiente. (s.f). Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB. Retrieved Agosto 20, 2018, from <http://ambientebogota.gov.co/red-de-calidad-del-aire>

Segura, R. (2014). El reto de las emisiones responsables | Transportes y Turismo. Retrieved October 2, 2017, from <http://tyt.com.mx/reportajes/motores-epa-y-euro-emisiones-responsables/>

Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendezu, Y., & Pomlaya, J. (2017). Caracterización Química del Material Particulado Atmosférico del Centro Urbano de Huancayo, Perú. *Sociedad Química Perú*, 83(2).

Taborda, C. (2017, May 10). Ciudades: a barrer el aire. Retrieved from <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/ciudades-barrer-el-aire-articulo-693216>

Torres, E. E. (2017). Normatividad Nacional e internacional de emisiones contaminantes para vehículos nuevos en planta. Retrieved Junio 18, 2018, from Normatividad Nacional e internacional de emisiones contaminantes para vehículos nuevos en planta. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14072/Tesis.pdf?sequence=3>

Universidad de Los Andes - University College London. (2013). Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia. Bogotá. Recuperado el 28 de Septiembre de 2018, de <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp->

content/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia.pdf#page=5&zoom=100,0,94

Velasco, C., & Velasco, J. (2014). Efectos de la altitud sobre la combustión. Revista Metalúrgica(35). Recuperado el 29 de Agosto de 2018, de http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n35/n35_a03.pdf

Anexos

Anexo 1. Memoria de Calculo Resultados Capítulo 1.

Anexo 2. Valores límites para la protección de la Salud humana en la UE.

Anexo 3. Clasificación de Vehículos Europeos.

Anexo 4. Límites máximos permisibles para vehículos de transporte colectivo, masivo e integrado. Vehículos Diésel de Transporte Público de Carga ajustados al Programa de Autorregulación

Anexo 5. Límites máximos de opacidad permisibles para vehículos accionados con diésel (ACPM) para el sistema público de transporte ajustados al Programa de Autorregulación.

Anexo 6. Datos Estaciones PM_{2.5} Bogotá.

Anexo 7. Datos Estaciones PM₁₀ Bogotá.

Anexo 8. Memoria de Calculo Estaciones Mayor Contaminación PM_{10} .

Anexo 9. Memoria de Calculo Estaciones Mayor Contaminación $PM_{2.5}$.

Anexo 10. Mapa de ubicación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.

Anexo 11. Comportamiento Anual de PM_{10} en las tres estaciones con mayor contaminación atmosférica.

Anexo 12. Comportamiento Anual de $PM_{2.5}$ en las tres estaciones con mayor contaminación atmosférica.

Anexo 13. Estado de Calidad del Aire en las Estaciones de PM_{10} .

Anexo 14. Estado de Calidad del Aire en las Estaciones de $PM_{2.5}$

Anexo 15. Gestión Ambiental de las emisiones vehiculares en Bogotá.