



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO DE LA  
CALIDAD DEL AIRE EN CIUDADES CON  
PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN**

**Marian Julieth Hernández López.**

**Andrés Fernando Baloco Vega.**

**Universidad de Antioquia**

**Facultad de Ingenierías**

**Escuela Ambiental**

**Especialización en Gestión Ambiental**

**Medellín, Colombia**

**2019**



**Estrategias de mejoramiento de la calidad del aire en ciudades con problemas de  
contaminación atmosférica**

**Marian Julieth Hernández López.**

**Andrés Fernando Baloco Vega.**

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Especialización en Gestión Ambiental

Asesor:

James Londoño Valencia

Ingeniero Sanitario

M.Sc. en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Escuela Ambiental

Especialización en Gestión Ambiental

Medellín, Colombia

2019

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	1
1. OBJETIVOS.....	4
1.1 Objetivo general .....	4
1.2 Objetivos específicos .....	4
2. METODOLOGÍA .....	5
3. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1 Contaminación del aire.....	6
3.2 Regulaciones.....	8
3.3 Efectos a la salud .....	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	14
4.1 Estrategias convencionales.....	14
4.1.1 Beijing -China .....	14
4.1.2 Brasil .....	15
4.1.3 Latinoamérica.....	15
4.1.4 Colombia .....	16
4.1.5 Bogotá .....	17
4.1.6 Área metropolitana del valle de Aburrá .....	22
4.1.7 Cali .....	24
4.2 Estrategias Innovadoras.....	27
4.2.1 Eliminación húmeda de material particulado.....	27
4.2.2 Implementación de estructuras verdes en calles cerradas y avenidas .....	28
4.2.3 Ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas .....	30
4.2.4 Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano .....	31
4.2.5 Mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas .....	32
4.2.6 Uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica.....	33
4.3 Ventajas y desventajas de las estrategias innovadoras identificadas.....	33
4.4 Evaluación la aplicabilidad de las estrategias implementadas en ciudades con problemas de contaminación atmosférica a nivel regional. ....	40

4.5	Dificultades asociadas a estrategias no convencionales .....	43
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	44
6.	CONCLUSIONES .....	47
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49



## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Límites máximos permisibles de contaminantes criterio, según Organización Mundial de la Salud - OMS .....	8
Tabla 2. Portafolio óptimo de medidas del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá D.C.....	18
Tabla 3. Registro de concentraciones de contaminantes para Bogotá D.C. periodo 2008-2016 .....	20
Tabla 4. Resultados del seguimiento del PDDBA .....	20
Tabla 5. Metas intermedias de concentración para PM2.5, PM10 y Ozono establecidas en el PIGECA .....	23
Tabla 6. Objetivos y metas del Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali .....	25
Tabla 7. Límites máximos permisibles en el año 2030 establecidos en la Resolución 2254 de 2017.....	27
Tabla 8. Clasificación de las precipitaciones (mm) .....	28
Tabla 9. Eficiencia de remoción y la duración efectiva de la precipitación.....	28

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1. Descripción de la metodología.....	5
Ilustración 2. Ciclo de los contaminantes en el aire.....	7
Ilustración 3. Registro fotográfico de la calidad del aire en Bogotá D.C. ....	18
Ilustración 4. Factores que aumentan la concentración de contaminantes atmosféricos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	22
Ilustración 5. Estructura del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburra 2017-2030 – PIGECA.....	24
Ilustración 6. Estructura del Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali – PALSC .....	25
Ilustración 7. Patrones de flujo y dispersión de contaminantes en una calle con diferentes tipos de vegetación.....	30
Ilustración 8. Patrones de dispersión en autopistas urbanas con diferentes tipos de vegetación. ....	30
Ilustración 9. Esquema de la chimenea de ventilación gigante.....	31

## RESUMEN

La Organización Mundial de la Salud – OMS ha publicado en reiteradas ocasiones cifras alarmantes de las consecuencias en morbilidad y mortalidad que ha generado la mala calidad del aire a nivel mundial (World Health Organization, 2018), a raíz de ello, es común ver en diversos planes de gobierno la aplicación de estrategias convencionales para atacar este problema ambiental, técnicas enfocadas en la prevención, control, medición y reducción de las emisiones atmosféricas, como por ejemplo las aplicadas en ciudades como Beijing, el Área Metropolitana de São Paulo (MASP) e incluso en las principales ciudades de Colombia, prácticas de tipo normativo o técnico en las que se destacan: la implementación de sistemas de control en fuentes fijas y móviles, reconversión tecnológica (Barreto Carvalho et al., 2015), adopción de normatividad ambiental más restrictiva, sanciones al incumplimiento de las mismas (Feng & Liao, 2016), implementación de sistemas integrado de transporte público (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011), renovación y modernización del parque automotor, uso eficiente y la mejora en la calidad de los combustibles (CONPES, 2018), entre otras; sin embargo a pesar de la implementación de estas acciones catalogadas como “convencionales” y las cuales son necesarias e indispensables en el desarrollo de la región, es evidente que estas no son suficientes para el logro de los objetivos propuestos, los cuales básicamente pretenden cumplir los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud – OMS, es por ello que en este documento se presentan las estrategias tradicionales y se exponen algunas estrategias “no convencionales”, las cuales fueron extraídas después de realizar una búsqueda exhaustiva en las diferentes revistas indexadas, información que fue analizada y recopilada en el presente trabajo; se exponen seis (6) estrategias innovadoras cuya ejecución al igual que cualquier otra medida dependen principalmente de la economía, tecnología, desarrollo, clima, topografía y fenómenos meteorológicos del país o la región en donde se pretendan desarrollar, en cada una de estas alternativas se indica los resultados en su mayoría positivos en relación al mejoramiento de la calidad del aire, de igual manera se hace énfasis en las ventajas, desventajas, dificultades y aplicabilidad de cada una de ellas.

**Palabras Clave:** Contaminación atmosférica, calidad del aire, estrategias de control, gestión ambiental, innovación.

## ABSTRACT

The World Health Organization - WHO has repeatedly published alarming figures on the morbidity and mortality consequences of poor air quality worldwide (World Health Organization, 2018), as a result, it is common to see in various government plans the implementation of conventional strategies to attack this environmental problem, which are focused on atmospheric emissions prevention, control, measurement and reduction. For example, the techniques applied in cities such as Beijing, the Metropolitan Area of São Paulo (MASP) and even in the main cities of Colombia, which are normative or technical practices in which the following are highlighted: the control systems implementation in fixed and mobile sources, technological reconversion (Barreto Carvalho et al., 2015), adoption of more restrictive environmental regulations, sanctions for non-compliance (Feng & Liao, 2016), integrated public transport systems implementation (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011), renewal and modernization of the vehicle fleet, efficient use and improvement of fuel quality (CONPES, 2018), among others. However, despite the implementation of these actions labelled as "conventional" and which are necessary and indispensable for the region development, it is evident that they are not sufficient for the accomplishment of the proposed objectives, which basically intend to achieve the limits established by the World Health Organization – WHO. It is for this reason that this document describes the traditional strategies and exposes some "non-conventional" strategies, which were taken after an exhaustive search in the different indexed journals, information that was analyzed and compiled in the present study. Six (6) innovative strategies are presented, the implementation of which, like any other measure, depends mainly on the economy, technology, development, climate, topography and meteorological events of the country or region in which they are intended to be developed. In each one of these alternatives the results are indicated in their majority positive in relation to the air quality improvement, in the same way, emphasis is made in the advantages, disadvantages, difficulties and applicability of each one of them.

**Keywords:** Atmospheric pollution, air quality, control strategies, environmental management, innovation.

## INTRODUCCIÓN

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2019) la contaminación atmosférica hace referencia a la presencia en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos en su mayoría precursores de riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente, generados principalmente por procesos industriales y fuentes móviles tales como los automóviles.

A nivel mundial la problemática generada por este tipo de contaminación ambiental ha tomado mayor relevancia con el paso del tiempo, situación originada principalmente por las preocupantes cifras registradas y emitidas por la Organización Mundial de la Salud - OMS, que afirman que a nivel global mueren aproximadamente 4.2 millones de personas por padecimientos generados por la mala calidad del aire (World Health Organization, 2018). Colombia no se aleja de esta alarmante realidad, según publicación del Departamento Nacional de Planeación – DNP, para el año 2015 es posible atribuir a la mala calidad del aire cerca de 8.000 muertes en mayores de 44 años y 22 muertes en menores de 5 años, así como el padecimiento de 67 millones de enfermedades en vías respiratorias. (DNP, 2015). Según el DNP para el año 2017 se registró que el 76% de los 78 municipios que en el país cuentan con sistema de vigilancia de calidad del aire superan los niveles perjudiciales que generan afectaciones sobre la salud (DNP, 2018).

En atención a estos problemas de contaminación se vienen implementando a nivel nacional e internacional estrategias de control que permiten disminuir y mitigar los impactos generalizados que se evidencian sobre la salud de los seres humanos y los ecosistemas. A nivel mundial y especialmente en ciudades con altos índices de calidad del aire como Beijing, Los Ángeles, México, Buenos Aires, Rio de Janeiro, Madrid entre otras ciudades, han implementado una serie de medidas encaminadas a reducir dichos niveles, estas estrategias se basan principalmente en desarrollar, mejorar e implementar tecnología en las diferentes fuentes de emisión tanto fijas como móviles, así como la implementación de normatividad robusta que aborde la mitigación de los contaminantes la cual ayuda en gran manera para que los planes y programas ambientales no encuentren obstáculos de tipo normativo, económico y tecnológico en su implementación y así lograr las metas propuestas observando resultados tangibles y sujetos a evaluación y continuidad en el tiempo; en estas megaciudades es un común

denominador encontrar grandes y sólidas redes de monitoreo con una gran cobertura, tecnología de punta y con un gran alcance relacionado con la representatividad de los contaminantes monitoreados, sin restringir la información a la ciudadanía.

De acuerdo a lo manifestado por el IDEAM (IDEAM, 2017), en Colombia las autoridades ambientales han venido implementando y renovando sus sistemas de vigilancia con tecnología automática para realizar la evaluación y seguimiento de los contaminantes atmosféricos, mejorando así la confiabilidad, temporalidad y oportunidad de las mediciones, permitiendo a las autoridades ambientales adoptar medidas de control precisas e informar a la comunidad en tiempos adecuados sobre los riesgos de determinados niveles de contaminación.

De acuerdo a los diferentes planes adoptados por las respectivas autoridades ambientales de las principales ciudades o áreas metropolitanas de Colombia, como lo son el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá – PDDAB (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011), el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburra 2017-2030 – PIGECA, en concordancia con el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2008-2020 (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA, 2018) y el Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali – PALSC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC & Universidad del Valle, 2017), es posible evidenciar que estas urbes presentan problemas de mala calidad del aire, basados en los reportes de las respectivas redes de monitoreo que permiten conocer el nivel de contaminación en tiempo real de estas regiones. De acuerdo a lo establecido en la Política para el Mejoramiento de la Calidad del aire (CONPES, 2018), Colombia es consciente de la problemática ambiental que enfrenta, razón por la cual ha fortalecido su normatividad en relación a los niveles permisibles de inmisión, sin embargo aún falta llegar a sectores críticos como lo son: el parque automotor, la calidad del combustible, consumo responsable de energía, optimización del control de las emisiones del sector industrial y mejoramiento de las vías de comunicación (pavimentación); todo esto requiere sin duda un fortalecimiento interinstitucional y un cambio de cultura de los ciudadanos de prevención y manejo de riesgos en todos los grupos de población.

El desarrollo de las medidas de control convencionales mencionadas anteriormente permite cuestionar la efectividad de las mismas, debido a que siguen presentándose eventos en los que la calidad del aire se caracteriza por ser mala, ocasionando el surgimiento de estrategias

*alternativas* de control de la contaminación atmosférica que se pueden categorizar como tecnologías innovadoras y que actúan en respuesta a las necesidades de ciudades o pequeñas regiones, por lo que surge la duda en relación a las ventajas y desventajas de la implementación de cada una de estas estrategias.

A través de la presente monografía se pretende hacer una revisión de las estrategias de mejoramiento de la calidad del aire implementadas a nivel nacional e internacional, partiendo inicialmente de su identificación, posteriormente se indicarán las ventajas y desventajas de las mismas y finalmente se evaluará su aplicabilidad en ciudades con problemas de contaminación atmosférica a nivel regional. Todo lo anterior contextualizado en la identificación de lo existente a nivel de estrategias implementadas y la propuesta a nivel nacional de estrategias innovadoras de gestión de la contaminación atmosférica.



## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo general**

Desarrollar una revisión de las estrategias implementadas en pro del mejoramiento de la calidad del aire a nivel nacional e internacional.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Identificar las estrategias implementadas en las diferentes ciudades con problemas de mala calidad del aire.
- Determinar las ventajas y desventajas de las estrategias innovadoras identificadas.
- Definir la aplicabilidad de las estrategias implementadas en ciudades con problemas de contaminación atmosférica a nivel regional.



## 2. METODOLOGÍA

En la ilustración 1 se describe el paso a paso de la forma en que se realiza esta monografía, asegurando el cumplimiento de los objetivos propuestos inicialmente.

**Ilustración 1.** Descripción de la metodología



**Fuente:** (Elaboración propia)

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Contaminación del aire.

La contaminación ambiental es una problemática que ha tomado auge en la actualidad a nivel mundial, debido a los preocupantes índices de mortalidad y morbilidad emitidos por entidades como la Organización Mundial de la Salud – OMS, lo que ha obligado a incluir esta temática en los diferentes planes gubernamentales. Según la resolución 601 de 2006 (Ministerio de Ambiente, 2006), la contaminación atmosférica es la presencia de sustancias en la atmósfera en altas concentraciones en un tiempo determinado como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden ocasionar daños a la salud de las personas o al ambiente, fenómeno generado por la emisión, acumulación y mezcla de contaminantes en el aire provenientes de fuentes naturales y antropogénicas.

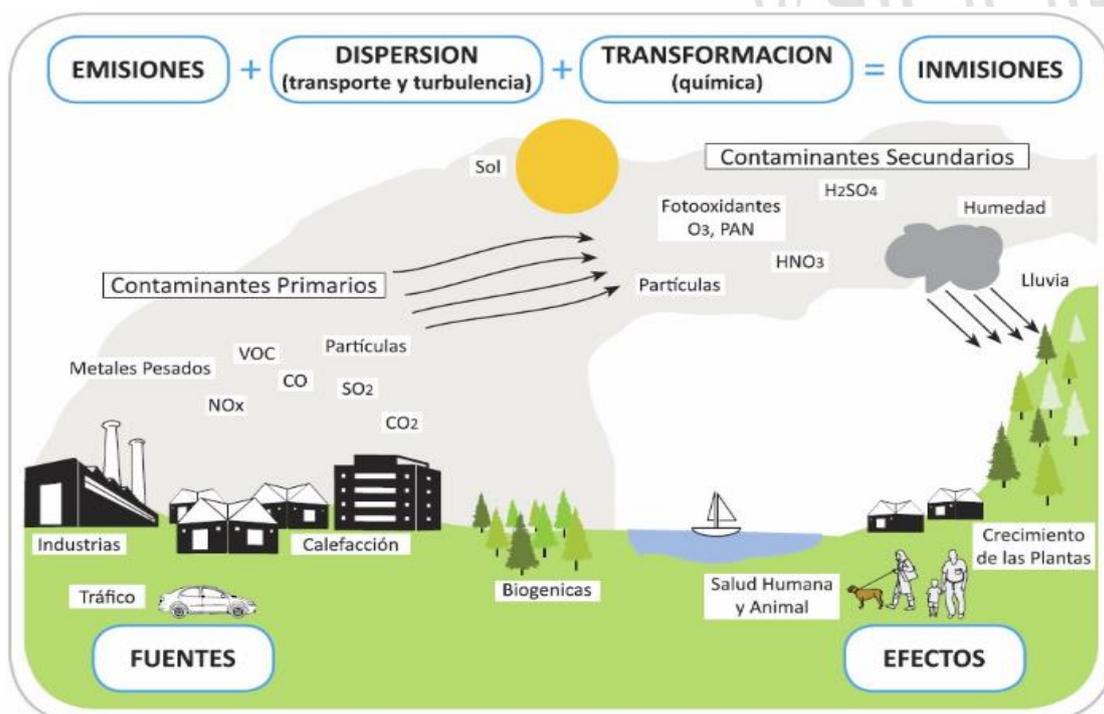
Las fuentes de contaminación atmosférica son clasificadas partiendo de la forma como se liberan dichos contaminantes al aire, categorizándose de esta manera en fuentes fijas, que generan emisiones en un lugar determinado e inamovible y fuentes móviles, que por su uso o propósito las emisiones se generan durante el desplazamiento de la fuente (CONPES, 2018). Según el Sistema de Información Ambiental en Colombia (Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC, 2019), basado en los principales inventarios de emisión de contaminantes al aire del país, el Material Particulado - MP, los óxidos de azufre SO<sub>x</sub>, los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, el monóxido de carbono CO (contaminantes criterio) y el dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, son los contaminantes que se generan en mayor cantidad, lo anterior como consecuencia del uso masivo de combustibles fósiles, la resuspensión de polvos y la explotación minera; las acciones enfocadas a la reducción de las emisiones al aire de contaminantes criterio, metales pesados, dioxinas, furanos, sustancias generadoras de olores ofensivos y ruido, entre otras, son indispensables para mejorar la calidad de vida de los colombianos y proteger sus riquezas naturales.

La principal fuente de contaminación son las fuentes móviles en todas las ciudades del mundo (Abhijith et al., 2017). Estas fuentes requieren para su funcionamiento el uso de combustibles fósiles, emitiendo contaminantes como material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), gases de efecto invernadero, sustancias carcinogénicas y metales pesados, entre otros (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2010b); un factor relevante en la cantidad de contaminantes es el modelo del

vehículo (año de fabricación), dado que por el diseño del motor la combustión podría no ser muy eficiente, estos generalmente no poseen sistemas de control en los exostos, y particularmente no se les realiza de manera periódica y recurrente su mantenimiento (Onursal & Gautam, 1997). Por su parte las fuentes fijas emiten contaminantes dependiendo de la tecnología implementada en la industria, el tipo de combustible, la eficiencia en el uso de la energía y del proceso productivo e incluso las condiciones del lugar (National Renewable Energy Laboratory., 2006).

Uno de los contaminantes en los que se tiene mayor interés es el material particulado, el cual se clasifica de acuerdo al tamaño de la partícula en PM<sub>10</sub> (material particulado con diámetro inferior a 10 micras) y PM<sub>2.5</sub> (material particulado con diámetro inferior a 2.5 micras) (IDEAM, 2017). Entre más pequeño es el diámetro de esta partícula más profundo puede llegar a depositarse en el sistema respiratorio e incluso en el torrente sanguíneo, asociando de esta manera los notables efectos en la salud que tiene este contaminante, otros contaminantes presentes en el aire son los gases como: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y monóxido de carbono (CO), es así que estos gases junto al material particulado son considerados contaminantes criterio, debido a su habitualidad y al daño que puede generar a la salud del ser humano (CONPES, 2018).

**Ilustración 2.** Ciclo de los contaminantes en el aire



**Fuente:** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019)

### 3.2 Regulaciones

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda límites de concentración para material particulado, ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), esperando que sean considerados por los planes de gobierno en búsqueda de mejorar las condiciones ambientales y de salud de los diferentes países, recomendando metas intermedias (World Health Organization, 2018). Los valores guía propuestos por la OMS son:

**Tabla 1.** Límites máximos permisibles de contaminantes criterio, según Organización Mundial de la Salud – OMS.

Partículas gruesas (PM <sub>10</sub> )	Partículas finas (PM <sub>2.5</sub> )	Ozono (O <sub>3</sub> )	Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )
20 µg/m <sup>3</sup> media anual	10 µg/m <sup>3</sup> media anual	100 µg/m <sup>3</sup> media en 8h	40 µg/m <sup>3</sup> media anual	20 µg/m <sup>3</sup> media en 24h
50 µg/m <sup>3</sup> media en 24h	25 µg/m <sup>3</sup> media en 24h	-	200 µg/m <sup>3</sup> media en 1h	500 µg/m <sup>3</sup> media en 10 min

**Fuente:** (World Health Organization, 2018)

A nivel nacional la preocupación ante la calidad del aire que se presenta en las distintas ciudades del país ha sido notoria, por lo que el gobierno ha venido presentado a través de los últimos años un paquete regulatorio que permite establecer legalmente control sobre las fuentes de emisión y los contaminantes atmosféricos de manera general, con el fin de garantizar las condiciones óptimas para el desarrollo de la vida desde el enfoque del recurso aire. En este sentido a continuación se presenta una descripción de la normatividad más relevante que a nivel nacional se ha implementado para el control ambiental sobre la matriz aire, las cuales se encuentran dentro del orden de leyes, decretos y resoluciones, estos son:

- Decreto 1076 de 2015: “*Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Este decreto en su Libro 2 en el que se establece el Régimen reglamentario del sector ambiente, específicamente en la parte 2 de Reglamentaciones, Título 5 del componente Aire y capítulo 1 se establece el Reglamento de protección y control de la calidad del aire y capítulo 2 se establecen las medidas para el control de las exportaciones de sustancias agotadoras de la capa de ozono.

- Ley 99 de 1993: *“Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA- y se dictan otras disposiciones”* (Congreso de la República de Colombia, 1993). Dentro de esta ley se establecen los entes de control ambiental que deben establecer la regulación y cumplimiento de toda la normatividad ambiental que se emita en materia aire. Complementariamente, en los numerales 11 y 25 del artículo 5 de esta ley se establece:
  - *“11. Ejercer control para la reducción de la contaminación atmosférica en todo el territorio nacional”.*
  - *“25. Fijar los límites permisibles de emisiones que puedan afectar el medio ambiente o los recursos naturales renovables”.*

Complementariamente, la ley en su artículo 17, crea el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que asume las funciones del antiguo HIMAT. El objeto del IDEAM es suministrar a las instituciones del Sistema Nacional Ambiental (SINA) la información de carácter científico y técnico en asuntos ambientales de su competencia.

- Decreto 948 de 1995: *“Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire”* incorporado en el Decreto 1076 de 2015 (MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE COLOMBIA, 1995).
- Resolución 2254 de 2017: *“Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). En esta resolución se establecen los límites máximos permisibles de los contaminantes criterio del aire (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO). Esta resolución deroga la resolución 601 de 2006 y la resolución 610 de 2010 a partir del 1 de enero de 2018 por la cual se adopta la norma de calidad del aire.
- Resolución 619 de 1997: *“Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas”* (Ministerio

del Medio Ambiente, 1997). Complementariamente, reglamenta parcialmente el artículo 73 del Decreto 948 de 1995 (literales a, b, d, f y m) y determina los factores a partir de los cuales se requiere el permiso de emisión.

- Resolución 910 de 2008: *“Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones”* (MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2008). Esta resolución reglamenta el artículo 91 del Decreto 948/95, incorporado en el artículo 2.2.5.1.8.2 del Decreto 1076/15, y establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres. A su vez, indica que a partir de los vehículos modelos 2010 y 2011, los comercializadores representantes de marca, importadores, fabricantes o ensambladores de dichos vehículos deberán garantizar una emisión máxima permisible más restrictiva que la que estamos aplicando actualmente según lo indican las tablas en ella consignadas.
- Resolución 1111 de 2013: *“Por la cual se modifica la resolución 910 de 2008”* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013). De manera general especifica que deben cumplir con los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes los vehículos y demás fuentes móviles, excepto locomotoras, equipos fuera de carretera para combate o defensa, equipos o maquinaria para obras civiles (vibradores, grúas) o viales (retroexcavadoras, mezcladoras, cortadoras, compactadores, vibrocompactadores, terminadoras o finishers), equipos internos para manejo de carga en la industria y terminales, equipos para minería (retroexcavadoras, cargadores, palas, camiones con capacidad superior a 50 toneladas), equipos agrícolas (trilladoras, cosechadoras, tractores, sembradoras, empacadoras, podadoras), ya sean movidas por llantas, rodillos, cadenas u orugas y en general los equipos establecidos como maquinaria o vehículos NONROAD, las declaradas por la autoridad de tránsito como vehículos antiguos o clásicos y los vehículos eléctricos.
- POLÍTICA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE: la estructuración de esta política se basa en los lineamientos definidos en el documento CONPES 3344 de 2005, buscando el desarrollo de la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo, a partir de planes, programas y actividades agrupadas que tengan metas comunes con enfoque medible y que garantice los niveles

de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano, y que a su vez trabajen de la mano para la gestión adecuada de temas como vigilancia epidemiológica, renovación del parque automotor, calidad de combustibles, producción más limpia y consumo sostenible, buenas prácticas, mejores tecnologías disponibles, responsabilidad social empresarial, ordenamiento territorial y gestión de proyectos compartidos (MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010).

- **POLÍTICA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE:** El Departamento Nacional de Planeación en el año 2018 dispuso de la Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire a través del CONPES 3943, en la que se estipulan metas medibles para el mejoramiento de la calidad del aire (CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL, 2018).

### **3.3 Efectos a la salud**

La contaminación del aire es un impacto ambiental que actúa directa e indirectamente como condicionante para la salud, ya que favorece la ocurrencia de eventos asociados a morbilidad relacionadas a problemas cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma (DNP, 2015). Para el año 2016 según resultados emitidos por la OMS, este tipo de contaminación en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provocó cada año 4,2 millones de defunciones prematuras, de las cuales el 91% de estas se produjeron en países de bajos y medianos ingresos, mientras que las mayores tasas de morbilidad registradas se observaron en las regiones de Asia Sudoriental y el Pacífico Occidental (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS, 2018).

Los efectos de la contaminación del aire sobre la salud se pueden medir a corto, mediano y largo plazo, en relación a estos tiempos de ocurrencia las entidades de control se han visto preocupadas al observar la significancia que tiene la exposición a largo plazo de estos contaminantes sobre la salud pública. De manera general se ha identificado que la mayoría de las muertes que son atribuidas a la contaminación atmosférica en la población mundial están asociadas con las enfermedades no transmisibles, y es que el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 35% de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las cardiopatías isquémicas son el resultado de contaminantes de carácter atmosférico. Esta problemática se acrecienta sobre la población

infantil, debido a que más de la mitad de las muertes de niños menores de 5 años por infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (IRA) son resultado de la inhalación de partículas atmosféricas contaminantes, datos que se reflejan en las tasas de mortalidad emitidas por la Organización Panamericana de la Salud (ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD - OPS, 2016).

Específicamente la OMS en sus registros publica que para el año 2016, cerca del 58% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, 18% de se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas, y el 6% de las muertes se debieron al cáncer de pulmón (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS, 2018).

En función del grado de afectación que representa la exposición humana a los contaminantes atmosféricos la Organización Mundial de la Salud emite un criterio en el que se observa las consecuencias puntuales que generan estos parámetros en las personas.

- **Material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>:** Para el control de estas partículas contaminantes las autoridades ambientales las clasifican en función del tamaño de su partícula en PM<sub>10</sub>, que corresponden a partículas con diámetro menor a 10 micrones y PM<sub>2.5</sub> con diámetro inferior a 2.5 micrones (IDEAM, 2017). Esta clasificación se ha hecho efectiva al identificar el grado peligrosidad y accesibilidad que pueden tener estas dentro del organismo de los seres vivos, ya que estos pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo, favoreciendo la ocurrencia de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón, aumentando los indicadores de mortalidad y morbilidad diarios, reduciendo la esperanza media de vida en 8,6 meses (Valor estimado) como resultado de la exposición crónica de estas partículas de origen antropogénico (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS, 2018).
- **Ozono (O<sub>3</sub>):** Este es un contaminante de orden secundario, producto de reacciones fotoquímicas complejas con intensa luz solar entre contaminantes primarios como son los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. La presencia de ozono en la troposfera (ozono troposférico) puede producir efectos nocivos de relevancia en la salud humana, causando problemas respiratorios, asma, reducción de la función pulmonar y originar enfermedades pulmonares (IDEAM, 2017).

- **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>):** Es un contaminante criterio en el que las principales fuentes de emisiones antropogénicas son los procesos de combustión generadas por calefacción, generación de electricidad y motores de vehículos y barcos. En cuanto a las afectaciones sobre la salud, la OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS, 2018) a través de los distintos estudios que ha adelantado presenta a través de sus informes que la exposición prolongada de este contaminante disminuye el desarrollo de la función pulmonar, favorece a la ocurrencia de síntomas de bronquitis en niños asmáticos e inflama las vías respiratorias.
- **Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):** El dióxido de azufre es un gas caracterizado por ser incoloro y de olor penetrante producto de la combustión de fósiles (carbón y petróleo) y la fundición de menas que contienen azufre (IDEAM, 2017). Este contaminante ambiental causa irritación ocular, afecta al sistema respiratorio y las funciones pulmonares complementarias, evidenciando problemas asociados a inflamación del sistema respiratorio que provoca síntomas como tos, secreción mucosa, agravamiento del asma, bronquitis crónica e infecciones del sistema respiratorio, adicionalmente, se han registrado pacientes con cardiopatías producto de la exposición de este gas contaminante. (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS, 2018).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

A continuación, se identifican las estrategias convencionales implementadas en diferentes regiones del mundo y cuyo objetivo principal es el mejoramiento de la calidad del aire de la región:

### **4.1 Estrategias convencionales**

#### **4.1.1 Beijing -China**

En Beijing (China), desde el año 1979 se empezaron a reglamentar e implementar normatividades ambientales como la ley de protección ambiental en la que considera el inicio del sistema de leyes ambientales en el mencionado país, posteriormente en la década de 1980 apareció el sistema legal para la Prevención y el Control de la Contaminación del Aire (PCAP, por sus siglas en inglés), la ley forestal y la Ley de Prevención y Control de la Contaminación del Aire (APPCL, por sus siglas en inglés), esta última ley se revisó en el año 2000 y junto a su revisión se emitieron reglamentos administrativos enfocados en el control y la contaminación del aire, destacándose gravámenes y uso de tarifas de vertido de contaminantes, abarcando la idea de “desarrollo sostenible”, el uso de sistemas de control de contaminantes atmosféricos en zonas de control (regiones con altas concentraciones de contaminantes) y un sistema de cobranza por emisión de todos los contaminadores, se fortaleció la regulación de las emisiones de las fuentes móviles, permitiendo solamente la fabricación, venta o importación de vehículos que cumplieran con las normas ambientales establecidas y se prohibió el uso de vehículos que en el momento de su fabricación no cumplieran con las normas aplicables en ese momento, por último se acrecentaron las sanciones al incumplimiento de la normatividad ambiental (Feng & Liao, 2016). En el año 2012 se establece el PM<sub>2.5</sub> como el principal contaminante de interés normativo, exigiendo su monitoreo de manera obligatoria, se instituye al Ministerio de Medio Ambiente (MEP, por sus siglas en inglés) y las Oficinas de Protección Ambiental (EPB, por sus siglas en inglés) como responsables del cumplimiento de los límites de emisión de contaminantes, adicionalmente a partir de la fecha se vienen realizando monitoreos de acuerdo a la normatividad ambiental y se brinda información a la ciudadanía sobre el estado de la calidad del aire (Feng & Liao, 2016).

#### **4.1.2 San Pablo-Brasil**

En este país la preocupación enfocada a la calidad del aire se ha venido evidenciando por varios años, por lo que el gobierno en el Área Metropolitana de São Paulo (MASP), ha implementado estrategias de control que tienen como objetivo la minimización de las emisiones de los contaminantes atmosféricos. Cronológicamente desde principios de los años de 1980 se instauraron políticas con el fin de reducir la emisión de contaminantes atmosféricos por parte de las industrias en el MASP, enfocándose principalmente en el cambio del petróleo a la energía eléctrica como fuente de abastecimiento de energía para las industrias (Barreto Carvalho et al., 2015). Complementariamente, en este país durante esta misma década se crearon entidades de control enfocadas a la regulación y protección del medio ambiente, naciendo de esta manera el Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) que lideró el Programa Brasileño de Control de Emisiones de Contaminación del Aire por Vehículos Motorizados (PROCONVE), con el que se obtuvieron resultados en la reducción de emisiones de hasta un 90% para los vehículos livianos y 80% para los vehículos pesados en las concentraciones de los parámetros CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>, en el año 2013 se fundó el Programa Brasileño de Control de Emisiones de Motocicletas (y Similares) (PROMOT), que tenía como base de regulación los estándares aplicados en Europa (Barreto Carvalho et al., 2015).

#### **4.1.3 Latinoamérica**

En esta región se observan estudios enfocados al control de la contaminación atmosférica, como es el artículo científico publicado por Horacio Riojas Rodríguez; Agnes Soares da Silva; José Luis Texcalac Sangrador; Grea Litai Moreno Banda en el año 2016 en el que se buscó inicialmente evaluar la situación del marco jurídico sobre el control de la calidad del aire en todos los países de América Latina y el Caribe y adicionalmente determinar la distribución actual de las estaciones de control del aire y la concentración media de los contaminantes atmosféricos de todas las capitales y ciudades grandes, analizando las implicaciones para el cambio climático y la formulación de políticas públicas; arrojando como resultado de esta identificación documental a nivel regional que solo 77 ciudades ubicadas en 17 de 33 países de América Latina y el Caribe tienen la disponibilidad de conocer la información oficial sobre los contaminantes de la capa más baja de la atmósfera, sondeo alarmante ya que en la mayoría de las ciudades de la región estudiada la concentración media anual de partículas inhalables supera los valores considerados aceptables en las directrices de la Organización Mundial de la Salud sobre la calidad del aire y que pocos son los gobiernos nacionales que han venido adoptando

estas normas, por lo que los autores una vez identificado el estado de la gestión y control de la contaminación atmosférica en América Latina y el Caribe concluyen a manera de recomendación que en los países del área de estudio, se deben actualizar los marcos jurídicos sobre la calidad del aire incorporando los conocimientos actuales acerca de los efectos de la contaminación sobre la salud, ampliar y fortalecer la vigilancia y el control de los contaminantes de la capa más baja de la atmósfera a fin de aumentar la concientización sobre este problema y proteger la salud pública (Riojas Rodríguez, Soares da Silva, Texcalac Sangrador, & Moreno Banda, 2016).

#### **4.1.4 Colombia**

En Colombia, de acuerdo con los registros de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) administradas por diferentes autoridades ambientales, el principal problema de contaminación del aire en el país es la concentración de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, que supera el valor recomendado por la OMS, en particular en los grandes centros urbanos como Bogotá, Medellín y Cali y en municipios con desarrollo de actividades industriales. Se ha registrado que el 17 % de los municipios con estaciones de SVCA alcanzan niveles que superan la norma anual nacional establecida en 25 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub> y el 78 % supera el valor recomendado por la OMS como objetivo intermedio. Por su parte, los inventarios de emisiones de los grandes centros urbanos del país muestran que en el año 2012 las emisiones de PM<sub>2.5</sub> provenían en un 78 % de las fuentes móviles y en un 22 % de las fuentes fijas en Bogotá. En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en 2013, el 82% de las emisiones correspondía al sector transporte y el 18 % al sector industrial (CONPES, 2018).

Para solucionar este problema, el Departamento Nacional de Planeación integrado con el Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Transporte estructuraron en el año 2018 la Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire a través del CONPES 3943. Esta política aporta en la definición de objetivos y metas medibles para el mejoramiento de la calidad del aire; en el reconocimiento de la calidad del aire en el ordenamiento territorial; en la necesidad de promover la investigación en esta materia; en el desarrollo de planes de gestión del riesgo y en la participación ciudadana para la prevención y el control de la contaminación del aire proponiendo acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire a través de la renovación y modernización del parque automotor, la actualización de parámetros de calidad

de los combustibles y biocombustibles, la reducción del contenido de azufre en los combustibles, la reducción de las emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes fijas a partir de la implementación de mejores técnicas y prácticas en la industria y acceso a incentivos, mejoramiento de la cobertura, calidad y disponibilidad de información de emisiones y calidad del aire, el desarrollo de la investigación, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo por contaminación del aire. Para implementar estas soluciones se requiere de la articulación intersectorial en el desarrollo de las acciones para enfrentar el reto que supone el mejoramiento de la calidad del aire. Se estima que el desarrollo de las acciones propuestas alcanzará un valor indicativo cercano a los \$16.637 millones de pesos para los próximos siete años, horizonte de tiempo en el que se planea la consecución de los objetivos de la política en mención (CONPES, 2018).

#### **4.1.5 Bogotá-Colombia**

De acuerdo al reporte del DANE para el año 2018 la capital de la república contaba con más de 7 millones de habitantes convirtiéndola en la ciudad más poblada de Colombia (Departamento Nacional de Estadística, 2018), se ubica en la cordillera de los Andes con alturas que oscilan entre los 2.550 y 3.000 m.s.n.m y se encuentra dividida en 10 localidades conforme a lo establecido en el Acuerdo 02 de 1992 (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2010b). Bogotá ha presentado un proceso acelerado de expansión y crecimiento, sin embargo este fenómeno expansivo trae consigo el aumento de la demanda de servicios y con esto el aumento de la contaminación atmosférica en la ciudad dado el alto consumo de combustibles fósiles para suplir dicha demanda, generando finalmente problemas en la salud de sus habitantes (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2010a).

La problemática ambiental es evidente no solo por la capa gris que cubre la ciudad en los días en que se presenta el fenómeno de la inversión térmica (Ilustración 3), sino que también es indiscutible al observar los datos reportados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), es por ello que la Administración de la ciudad basada en la normatividad que la obliga a tomar acciones al respecto, adoptan el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá – PDDAB mediante el Decreto 98 de 2011, el cual de acuerdo a lo establecido en el párrafo 1 del artículo 2, cuenta con un plazo de ejecución de diez (10) años, evaluado en con una periodicidad bianual, el PDDAB ha sido definido según la normatividad como un

“(…) instrumento de planeación a corto y mediano plazo para Bogotá, D.C., que orienta las acciones progresivas de los actores distritales tendientes a la descontaminación del aire de la ciudad, con el propósito de prevenir y minimizar los impactos al ambiente y a la salud de los residentes (...)”, es importante mencionar que la meta propuesta y establecida en el artículo 4 del Decreto 98 de 2011, menciona que para el año 2020 se reducirá en un 60% las emisiones de material particulado, y se mantendrán los niveles de los demás contaminantes criterio SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y Ozono, teniendo como base el inventario del año 2008, cumpliendo así con los máximos límites permisibles de las normatividad ambiental en el tema de calidad del aire (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011).

**Ilustración 3.** Registro fotográfico de la calidad del aire en Bogotá D.C.



**Fuente:** (Canal RCN, 2019)

El PDDAB se planteó bajo las medidas catalogadas como “Portafolio óptimo de medidas del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá” (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011), estas medidas pueden observarse en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Portafolio óptimo de medidas del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá D.C.

Medida	Sector	Medida	Descripción
1	Industrial	Uso de sistemas de control de emisiones	Instalación de sistemas de control de emisiones seleccionando las industrias con un único criterio de costo-efectividad.

2	Industrial	Conversión de carbón a gas natural y formalización de industrias.	Transformación tecnológica de las fuentes que actualmente usan carbón para que utilicen gas natural. Esto en combinación con la formalización de industrias.
3	Transporte	Uso de sistemas de control de emisiones en vehículos de transporte de carga	Instalar catalizadores oxidativos en los vehículos de transporte de carga que circulen en Bogotá. Este requerimiento aplicará también para nuevos vehículos que entren al parque automotor.
4	Transporte	Uso de sistemas de control de emisiones en motocicletas.	Instalar catalizadores oxidativos y sistemas secundarios de inyección de aire en motocicletas de menos de 250 cc. Este requerimiento aplicará también para nuevos vehículos que entren a formar parte de dicho parque.
5a	Transporte (SITP)	Implementación del sistema integrado de transporte público.	Implementar el SITP con su programa de renovación continua de flota y chatarrización.
5b	Transporte (SITP)	Uso de sistemas de control de emisiones en vehículos que ingresan al SITP	Instalación de filtros de partículas en aquellos buses y busetas que entrarán a formar parte de la flota del SITP.

**Fuente:** (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011)

De acuerdo al deber adquirido, la Secretaria de Ambiente realiza un seguimiento al cumplimiento de los objetivos establecidos en el PDDAB, por ello mediante el Informe Técnico No. 0634 de 2017 identificado con el número de radicado 20171E69406, la entidad informa el avance en cada una de las medidas, en la tabla 3 es posible apreciar según el mencionado informe la concentración promedio presentada en la capital desde el año 2008 hasta el año 2016 de los contaminantes criterio (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2017).

**Tabla 3.** Registro de concentraciones de contaminantes para Bogotá D.C. periodo 2008-2016

Año	Material Particulado (PM <sub>10</sub> ) (24 horas)	Ozono (O <sub>3</sub> ) (8 horas)	Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) (24 horas)	Óxidos de Azufre (SO <sub>2</sub> ) (24 horas)	Monóxido de Carbono (CO) (8 horas)
2008	67	25	40	23	777
2009	59	28	40	27	1207
2010	59	27	39	9,4	1213
2011	52	22	35	9,1	1046
2012	48	23	29	7,9	1043
2013	48	22	30	8,6	954
2014	52	21	31	4,2	987
2015	44	26	35	3,3	882
2016	45	21	32	3,9	951

**Fuente:** (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2017)

En la siguiente tabla es posible apreciar los resultados del seguimiento realizado por la SDA al cumplimiento de los objetivos del PDDAB en cada una de las medidas propuestas (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2017):

**Tabla 4.** Resultados del seguimiento del PDDBA

Medida	Medida	Conclusiones entregadas en el Informe Técnico No. 0634 de 2017
1	Uso de sistemas de control de emisiones	Esta medida debe ser fortalecida para lograr su cabal ejecución y obtener las reducciones de emisiones esperadas. Para lo anterior es necesario abordar acciones como el fortalecimiento del marco regulatorio y de la articulación institucional enfocada al control y seguimiento y también desarrollar lineamientos de instalación y operación de Sistemas de Control de Emisiones en la industria.
2	Conversión de carbón a gas natural y formalización de industrias.	En vista de las barreras encontradas para la implementación de la medida, así como de los instrumentos de que se dispone para tal fin, se considera que esta debe ser reformulada para lograr las reducciones de emisiones esperadas para este sector.

3	Uso de sistemas de control de emisiones en vehículos de transporte de carga	<p>Se debe reestructurar el Programa de Autorregulación, que está en funcionamiento, ya que en la actualidad se ve opacado por varias barreras que disminuyen su alcance e influencia para el sector automotor de carga.</p> <p>El convenio 013 de 2012 entregó como resultado que no era viable la instalar SCE (Catalizadores Oxidativos y Sistemas de Inyección Secundaria) en motos usadas tanto dos tiempos como cuatro tiempos.</p>
4	Uso de sistemas de control de emisiones en motocicletas (Continuación).	<p>Por lo anterior, se debe fortalecer otras estrategias complementarias a la medida, como la generación de espacios de educación e incentivar la cultura por la seguridad vial, Ecoconducción y el buen mantenimiento de las motocicletas, así como la búsqueda de la oferta tecnológica que permitan promover el cambio a motocicletas con control de emisiones. También se considera importante promover el uso en motos (2) tiempos de los aceites recomendados por los fabricantes tipo semisintéticos, ya que según resultados del Convenio 013 de 2015, se lograba una reducción hasta el 17% en hidrocarburos para estas motos.</p>
5a	Implementación del sistema integrado de transporte público.	<p>El Modo 1 del PDDAB, contemplaba el retiro del 34,5% del total de buses a 2020 lo que equivale a 5.580 buses. De acuerdo a la información suministrada por Transmilenio, a la fecha se ha logrado superar dicha cifra y tan solo en 2016 se han chatarrizado un total de 6.377 buses a corte de 4 abril del presente año, con una proyección de 10.935 a 2020, superando la meta propuesta en el 2011 en un 196%.</p> <p>Con respecto al Modo 2 el cual contemplaba la adquisición de cerca de 400 buses nuevos por año durante la vigencia del Plan Decenal, se ha logrado, con corte a 31 de marzo de 2016, un total de 5.001 buses vinculados a la fecha, con una proyección a 2020 de 9.251 buses renovados en el sistema, el equivalente a 231% con respecto a la propuesta del PDDAB 2011.</p>
5b	Uso de sistemas de control de emisiones en vehículos que ingresan al SITP	<p>Pese a que está demostrado con varios casos exitosos a nivel mundial que los Filtros de Partículas Diesel remueven con más del 97% de eficiencia el material particulado y, específicamente de los casos exitosos en la ciudad de Bogotá con vehículos del sistema durante la etapa piloto del proyecto surgieron una serie de barreras de carácter</p>

		financiero, operativo (del sistema) y técnico que hicieron inviable su instalación.
--	--	---

**Fuente:** (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2017)

#### 4.1.6 Área metropolitana del valle de Aburrá-Colombia

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá es la segunda conglomeración urbana más poblada de Colombia, conformada por 10 municipios: Medellín, Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Envigado, Girardota, Itagüí, La Estrella y Sabaneta, este territorio se caracteriza por estar rodeado de montañas, lo que lo convierte en un concavidad alargada de cerca de 60 Kilómetros de largo y un máximo de 7 kilómetros de ancho, topografía que no permite una adecuada circulación horizontal del aire, situación que sumada a las condiciones meteorológicas ayudan a la acumulación de contaminantes, en la ilustración 4 es posible observar los factores que aumentan la concentración de contaminantes atmosféricos en el valle de Aburrá (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA & Clean Air Institute, 2017).

**Ilustración 4.** Factores que aumentan la concentración de contaminantes atmosféricos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá



**Fuente:** (ÁREA METROPOLITANA VALLE DE ABURRÁ - AMVA, 2019)

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá como máxima autoridad ambiental en el perímetro urbano de los municipios que la conforman, basada en los principios de prevención y precaución, así como en el cumplimiento de la normatividad colombiana y consiente de la problemática ambiental en materia de emisiones atmosféricas presente en la región, gracias a los datos reportados por la red de monitoreo, adopta mediante el Acuerdo Metropolitano No. 16 de diciembre de 2016 el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de

Aburra 2017-2030 – PIGECA, en concordancia con el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2008-2020 (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

La cuenca del Valle de Aburra fue clasificada como área fuente de contaminación por material particulado menor de 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>) de acuerdo a lo establecido en el artículo 2 del Acuerdo Metropolitano No. 16 de diciembre de 2016; es así como el parágrafo 2 del mencionado artículo establece que se deben determinar las medidas necesarias para reducir los índices de contaminación atmosférica en el Área metropolitana (Area Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2017). Es por ello que los diez (10) ejes estratégicos contenidos en el PIGECA están encaminados a cumplir unas metas propuestas de reducción de los niveles de contaminación a corto, mediano y largo plazo, contempla adicionalmente el Protocolo Operacional para Enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica - POECA, el cual actúa en episodios de contingencia generados por la mala calidad del aire, logrando con la aplicación de determinadas medidas resultados a corto plazo, superando de esta manera los episodios presentados (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA & Clean Air Institute, 2017). En la tabla 5 es posible apreciar las metas intermedias de concentración para PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y Ozono establecidas en el PIGECA.

**Tabla 5.** Metas intermedias de concentración para PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> establecidas en el PIGECA

Tiempo de exposición	PM <sub>2.5</sub>		PM <sub>10</sub>		Ozono	
	Anual	24 horas	Anual	24 horas	8 horas	8 horas
Línea Base	Prom:33 µg/m <sup>3</sup> , mín 24 µg/m <sup>3</sup> , máx 67 µg/m <sup>3</sup>	Número de Excedencias 23	Prom:55 µg/m <sup>3</sup> , mín 46 µg/m <sup>3</sup> , máx 67 µg/m <sup>3</sup>	Número de Excedencias 12	Percentil 99 8h: 96	Porcentaje de Excedencia de Norma: 28%
Meta a 2019	36 µg/m <sup>3</sup>	21	58 µg/m <sup>3</sup>	10	92 µg/m <sup>3</sup>	26%
Meta a 2023	31 µg/m <sup>3</sup>	19	53 µg/m <sup>3</sup>	9	85 µg/m <sup>3</sup>	23%
Meta a 2027	26 µg/m <sup>3</sup>	17	48 µg/m <sup>3</sup>	8	78 µg/m <sup>3</sup>	20%

Meta a 2030	23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	7	72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18%
-------------	-----------------------------	----	-----------------------------	---	-----------------------------	-----

**Fuente:** (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA & Clean Air Institute, 2017)

Con el propósito de cumplir con los objetivos y metas propuestas, el PIGECA cuenta con una estructura de cinco (5) ejes transversales y diez (10) ejes temáticos, estos últimos cuentan con unas líneas de acción específicas que buscan intervenir escenarios puntuales que contribuyen al estado de la calidad del aire de la región, en la ilustración 5 es posible apreciar dicha estructura (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA & Clean Air Institute, 2017).

**Ilustración 5.** Estructura del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburra 2017-2030 – PIGECA

Ejes temáticos:



**Fuente:** (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA & Clean Air Institute, 2017)

#### 4.1.7 Cali-Colombia

Santiago de Cali es la tercera ciudad más poblada de Colombia, la ciudad presenta una topografía plana, sin embargo, en su área de influencia se pueden identificar tres regiones: una región montañosa que bordea la ciudad en el occidente, una región de valle ubicado desde el sur hasta el norte y por último una región marítima sobre la costa pacífica (ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI, 2019).

El DAGMA, como autoridad ambiental en el perímetro urbano del Municipio de Santiago de Cali, basado en la normatividad colombiana encabezada por la Constitución Política Nacional de 1991, así como en el Plan de Desarrollo Municipal 2016-2019 y Plan de

Ordenamiento Territorial de la ciudad de Cali, adopta mediante la Resolución No. 4133.010.21.1378 de diciembre de 2018 el Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali – PALSC – el cual se desarrolla en torno a tres (3) ejes y seis (6) estrategias (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC & Universidad del Valle, 2017), las cuales pueden apreciarse en la ilustración 6:

**Ilustración 6.** Estructura del Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali – PALSC

**Estrategias**



**Ejes estratégicos**



**Fuente:** (Elaboración propia)

El PALSC cuenta con un periodo de alcance de 10 años (inicia en el año 2018 y finaliza en el año 2027), por lo que se constituye en tres fases: corto, mediano y largo plazo, en dicho plan se establecen los siguientes objetivos y metas, los cuales buscan mejorar la calidad del aire de la ciudad implementando medidas integrales, articuladas y coordinadas entre los diferentes actores (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC & Universidad del Valle, 2017).

**Tabla 6.** Objetivos y metas del Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali

Objetivos Específicos		Metas	
<b>Objetivo 1</b>	Establecer las bases que aseguren el logro de objetivos cuantificables de mejora de la calidad del aire.	<b>1.1.</b>	Sistema de gestión de la información integral de vigilancia de la calidad del aire (inventarios de emisiones, datos de monitoreo, control de fuentes de emisiones, salud, movilidad y riesgos), fortalecido y operando eficientemente.

<p><b>Objetivo 2</b></p>	<p>Identificar, evaluar y priorizar un conjunto de medidas de alto impacto en concertación con los actores del sector.</p>	<p><b>2.1.</b></p> <p><b>2.2.</b></p>	<p>Estrategias intersectoriales para prevenir y minimizar la contaminación atmosférica, implementadas y evaluadas.</p> <p>Participación y cooperación efectiva de las diferentes partes interesadas (actores) relacionadas con la prevención y control de la contaminación del aire.</p>
<p><b>Objetivo 3</b></p>	<p>Proteger la salud pública del municipio de Santiago de Cali, con relación a la calidad del aire.</p>	<p><b>3.1</b></p> <p><b>3.2</b></p>	<p>Efectos en la salud humana por efecto de los contaminantes atmosféricos identificados.</p> <p>Estimación de efectos en la salud y costos económicos.</p>
<p><b>Objetivo 4</b></p>	<p>Desarrollar una cultura ciudadana proactiva y corresponsable en el municipio de Santiago de Cali.</p>	<p><b>4.1</b></p> <p><b>4.2</b></p>	<p>Prácticas de conducción eficiente adoptadas.</p> <p>Aumento del uso del transporte no motorizado.</p>
<p><b>Objetivo 5</b></p>	<p>Fortalecer las capacidades institucionales públicas y privadas.</p>	<p><b>5.1</b></p> <p><b>5.2</b></p> <p><b>5.3</b></p> <p><b>5.4</b></p>	<p>Mecanismos y acuerdos institucionales implementados, para la gestión integrada de la calidad del aire.</p> <p>Plan de mejoramiento al sistema de vigilancia implementado.</p> <p>Planes de contingencia implementados.</p> <p>Plataforma para la comunicación de la información del sistema de alertas y calidad del aire, en operación.</p>
<p><b>Objetivo 6</b></p>	<p>Elevar la productividad y la competitividad, y fomentar el desarrollo bajo en emisiones en Santiago de Cali.</p>	<p><b>6.1</b></p> <p><b>6.2</b></p>	<p>Planes empresariales de distribución baja en emisiones implementados.</p> <p>Prácticas de conducción ecoeficientes asumidas por proveedores logísticos empresariales.</p>

**Fuente:** (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC & Universidad del Valle, 2017)

El PALSC espera dar cumplimiento a los siguientes límites máximos, los cuales corresponden a los límites máximos permisibles en el año 2030 establecidos en la Resolución 2254 de 2017 (ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI, 2018):

**Tabla 7.** Límites máximos permisibles en el año 2030 establecidos en la Resolución 2254 de 2017

Contaminante	Nivel máximo permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de exposición
PM <sub>10</sub>	30	Anual
PM <sub>2.5</sub>	15	Anual
SO <sub>2</sub>	20	24 horas
NO <sub>2</sub>	40	Anual

**FUENTE:** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)

## 4.2 Estrategias Innovadoras

### 4.2.1 Eliminación húmeda de material particulado

La precipitación y el viento son dos condiciones meteorológicas que afectan directamente la concentración de material particulado en la atmósfera, interviniendo en los procesos de eliminación húmeda y seca respectivamente. Uno de los mecanismos más importantes que tiene la atmósfera para su autolimpieza es la precipitación, la cual está compuesta por dos etapas, eliminación en la nube y debajo de la nube, esta última corresponde al proceso en el cual las gotas de agua atrapan, a medida que caen, las partículas de aerosol. La llovizna tiene un efecto negativo en la disminución de la concentración de PM<sub>2.5</sub>, mostrando resultados de -16.5% a -36.5%, este fenómeno se atribuye al pequeño tamaño de la partícula de agua, al extenso tiempo de flotación y a la débil capacidad para capturar las partículas, lo que les permite actuar como núcleos de condensación generando así el aumento de la concentración de los aerosoles. Sin embargo la llovizna tienen un efecto positivo en la eliminación de material particulado con un diámetro de partícula mayor encontrando valores entre 31.7% a 38.4% (Zheng, Xu, Li, Chen, & Li, 2019).

La lluvia ligera y las grandes precipitaciones (grandes gotas de agua) muestran porcentajes de eficiencia de eliminación tanto para PM<sub>2.5</sub> como para PM<sub>10</sub> de 19.1% a 68.5% y 31.7% a 86.3%, respectivamente con precipitaciones con una duración de 2 a 10 horas, confirmando con estos resultados que la efectividad de la eliminación de material particulado es mayor cuando la precipitación es intensa y de mayor duración, así como demostrando que

la eficiencia es mayor con precipitaciones nocturnas, dado que se presenta mayor concentración de PM. Muchos gobiernos como el de Beijing (China) evalúan la posibilidad de disminuir la carga contaminante del aire utilizando la precipitación artificial o la pulverización de agua (niebla), sin embargo aún no existe un conocimiento sólido relacionado con las características de la eliminación húmeda que les permita comprender las reglas generales del proceso (Zheng et al., 2019). A continuación se destacan los principales resultados del trabajo desarrollado Zuofang Zheng, Guirong Xu, Qingchun Li, Conglan Chen, Jiangbo Li en el año 2019:

**Tabla 8.** Clasificación de las precipitaciones

Clasificación	Intensidad de la precipitación (mm)			
	3 horas	6 horas	12 horas	24 horas
Llovizna	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Lluvia ligera	0.1 – 1.9	0.1 – 3.9	0.1 – 4.9	0.1 – 9.9
Lluvia moderada	2.0 – 6.9	4.0 – 12.9	5.0 – 14.9	10.0 – 24.9
Lluvia Pesada	7.0 – 14.9	13.0 – 24.9	15.0 – 29.9	25.0 – 49.9

**Fuente:** (Zheng et al., 2019)

**Tabla 9.** Eficiencia de remoción y la duración efectiva de la precipitación

Partículas	Precipitación	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
PM <sub>2.5</sub>	Llovizna	-16.5% / 6 h	-36.5% / 2 h	-32.3% / 8 h	19.1% / 3 h
	Lluvia ligera	25.9% / 4 h	23.9% / 2 h	42.9% / 6 h	
	Lluvia moderada	51.4% / 9 h	47.1% / 6 h	68.5% / 8 h	
	Lluvia Pesada	67.8% / 8 h	59.2% / 6 h	68.3% / 9 h	
PM <sub>10</sub>	Llovizna	-	38.4% / 2 h	31.7% / 3 h	43.9% / 2 h
	Lluvia ligera	49.5% / 2 h	40.8% / 2 h	51.9% / 6 h	
	Lluvia moderada	75.5% / 5 h	52.6% / 4 h	59.1% / 7 h	
	Lluvia Pesada	86.3% / 8 h	62.8% / 6 h	82.4% / 10 h	

**Fuente:** (Zheng et al., 2019)

#### 4.2.2 Implementación de estructuras verdes en calles cerradas y avenidas

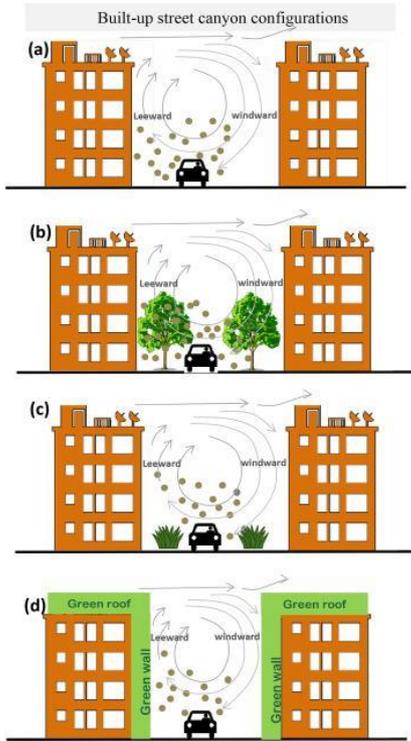
Gracias a los diferentes inventarios de emisiones es posible asegurar que las fuentes móviles realizan la mayor contribución a la contaminación atmosférica y de acuerdo a las Naciones Unidas la población vive en mayor proporción en áreas urbanas (54% en 2014) y se predice que este porcentaje aumentará al 66% para el 2050; lo que generaría mayor número de

mortalidad y morbilidad ocasionada por la contaminación ambiental en las grandes urbes. La implementación de estructuras verdes (árboles, barreras verdes, techos y paredes verdes) se ha considerado como una medida de control pasivo en la planificación urbana en aquellas urbes en crecimiento ya que influyen en los patrones de dispersión local y favorecen la deposición y eliminación de los contaminantes de la atmosfera (Kumar et al., 2016). Se encontraron resultados en los cuales se indica que la presencia de árboles en una calle con edificaciones en ambos lados aumenta la concentración de los contaminantes atmosféricos, ya que los árboles disminuyen la velocidad del viento, afectando el intercambio de aire contenido en el interior de la calle y el presente en la parte superior de las edificaciones, mientras que los setos de menor altura y grosor que los árboles (pero mayor densidad de hojas) tienen el efecto contrario, en algunos estudios se evidencia que estas barreras redujeron en un 24% a un 61% la exposición a los contaminantes atmosféricos (Abhijith et al., 2017).

Por su lado los árboles y las barreras de vegetación a lo largo de una autopista urbana tienen efectos positivos en la reducción de la contaminación atmosférica, ya que el aire contaminado fluye sobre la vegetación o la atraviesa, creándose detrás de las barreras de vegetación zonas de baja concentración de contaminantes, muchos estudios encontrados en la literatura indican reducciones entre el 37.7y el 63.6%de concentración de contaminantes atmosféricos. (Lin et al., 2016)

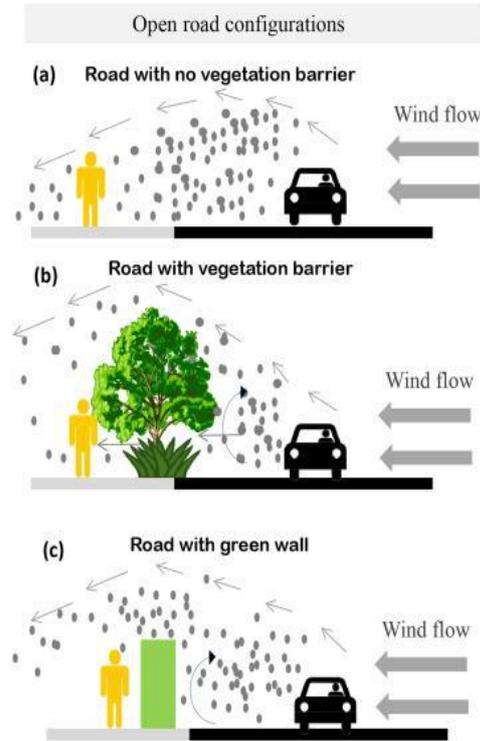
Las paredes verdes poseen capacidades para disminuir la contaminación atmosférica, las cuales no alteran el intercambio de aire contenido en el interior de la calle y el presente en la parte superior de las edificaciones, de acuerdo al estudio presentado por Pugh et al., en el 2012 en una calle con edificaciones en ambos lados, la presencia de paredes verdes contribuyó en una reducción de la concentración de hasta 35% para NO<sub>2</sub> y un 50% para PM<sub>10</sub>. Los techos verdes reducen hasta en un 32% de la concentración de contaminantes, aportando como valor agregado la reducción de hasta 2 °C al nivel de la respiración al enfriar el aire que se encuentra en movimiento descendente (Abhijith et al., 2017).

**Ilustración 7.** Patrones de flujo y dispersión de contaminantes en una calle con diferentes tipos de vegetación.



**Fuente:** (Abhijith et al., 2017)

**Ilustración 8.** Patrones de dispersión en autopistas urbanas con diferentes tipos de vegetación.



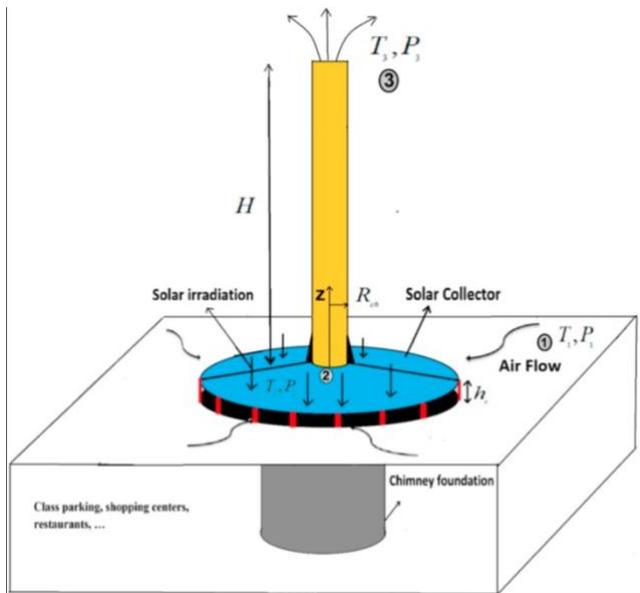
Las estructuras verdes traen consigo una serie de beneficios adicionales como: reducción de la contaminación auditiva, disminución del uso de energía debido a la mitigación en la sensación de calor, adecuado manejo de aguas lluvias y contribución positiva al paisaje urbano. (Escobedo, Kroeger, & Wagner, 2011)

#### 4.2.3 Ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas

El viento es un mecanismo natural de ventilación, sin embargo, las grandes ciudades en las cuales los edificios se construyen unos cerca de los otros, dificultan que el viento sople entre las edificaciones, ocasionando que el aire contaminado quede atrapado en estos espacios, adicionalmente se puede presentar inversión térmica, fenómeno en el que la densidad del aire desciende con la altura dificultando las corrientes convectivas ascendentes; ocasionando que el aire no pueda elevarse. La chimenea gigante ayudará a ventilar y así disminuir la concentración local de los contaminantes en la atmósfera. (Ghanbari & Rezazadeh, 2019).

La chimenea tendrá un colector el cual absorbe la radiación solar, permitiendo que el aire que se encuentra dentro de la chimenea aumente su temperatura, la diferencia de densidad entre el aire caliente y el aire del exterior hace que se aplique el principio de la flotabilidad (el aire se eleva a través de la chimenea), podría incorporarse un purificador de aire en esta trayectoria y así descontaminarlo en gran medida (Ghanbari & Rezazadeh, 2019).

**Ilustración 9.** Esquema de la chimenea de ventilación gigante



Subíndice 1: Condiciones del aire antes de ingresar a la chimenea.

Subíndice 2: Condiciones del aire en la entrada de la chimenea.

Subíndice 3: Condiciones del aire a la salida de la chimenea.

**Fuente:** (Ghanbari & Rezazadeh, 2019)

#### 4.2.4 Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano

Arroyave-Maya, Posada-Posada, Nowak y Hoehn (2019) analizaron en su estudio la estructura del bosque urbano del Valle de Aburrá, estimando y valorando su aporte a la remoción de contaminantes atmosféricos mediante el software *i-Tree Eco*. Este software tomó la información de los árboles, de la calidad del aire y del clima durante un año completo según la metodología establecida por el Manual de *i-Tree Eco*. Donde para esta recopilación de datos se estipularon 398 parcelas de muestreo forestal y para las condiciones climáticas y de contaminación, se recurrió a información secundaria. Como resultado se obtuvo un 23% de cobertura arbórea en el área de estudio y una remoción de 229 toneladas de contaminantes por año. A raíz de esto, se recomendó estrategias para la optimización de este servicio y la creación de mecanismos para compensar la pérdida de coberturas arbóreas.

Por su parte Nowak, Hirabayashi, Doyle, McGovern, & Pasher (2018), analizaron el control de la contaminación del aire a través de los servicios ecosistémicos de los árboles urbanos en Canadá. Lo anterior consistió en cuatro tipos de análisis para estimar la cubierta total de árboles y el índice de área foliar diariamente para tener en cuenta la variabilidad estacional, el flujo horario de contaminantes de ida y vuelta a las hojas, los efectos de la eliminación de la contaminación por hora en la concentración de contaminantes en la atmósfera; y los impactos en la salud y el valor monetario del cambio en la concentración de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y CO. Todo lo anterior se analizó con el software *i-Tree Eco*, lo cual reveló que los árboles de 86 ciudades canadienses eliminaron 16.500 toneladas (t) de contaminación del aire en 2010 (rango: 7500-21.100 t), con efectos en la salud humana valorados en 227,2 millones de dólares canadienses (rango: 52,5-402,6 millones de dólares). La eliminación anual de la contaminación varió entre las ciudades y llegó a alcanzar las 1.740 t en Vancouver, Columbia Británica. Los impactos generales sobre la salud incluyeron la prevención de 30 incidencias de mortalidad humana (rango: 7-54) y 22.000 incidencias de síntomas respiratorios agudos (rango: 7900-31.100) en estas ciudades.

#### **4.2.5 Mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas**

Carvalho et al. (2019), analizó los efectos de cuatro estrategias con estufas de biomasa para la reducción de emisiones contaminantes del aire provenientes de la cocina tradicional en el condado de Kisumu (Kenia), África. Esta investigación se realizó utilizando el sistema de Planificación de Alternativas Energéticas a largo plazo, entre los años 2015 y 2035. Se establecieron diferentes escenarios utilizando (A) *Business as Usual* (BAU), la cual se desarrolló teniendo en cuenta los registros y tendencias históricos del uso de energía en los hogares en función del crecimiento demográfico y urbanización; Estufas de Cocción Mejorada (ICS), las cuales son estufas de leña que siguen las normas sobre eficiencia térmica y umbrales de emisión establecidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y los objetivos establecidos en el Plan de Acción Nacional de Kenia, incluyendo el desarrollo de productos financieros tales como microcréditos, esquemas de ahorro de combustible y sistemas de financiamiento de carbono; Estufas de Gasificación de Pellets (PGS) donde el bagazo de la caña de azúcar se mezcla con la biomasa leñosa hacia el granulado de biomasa utilizando una pequeña parte de la energía producida por la unidad de descentralizados de gasificación en lecho fijo, y Estufas de Biogás (BGS) las cuales se integran digestores de biogás que

transforman el estiércol y los residuos domésticos en metano y otros gases combustibles o la adopción de biogás embotellado producido a partir de residuos sólidos municipales, ambos sistemas para examinar el impacto en el ahorro de energía y la mitigación de la contaminación del aire; y también se evaluó un Escenario Integrado (INT) entre ICS, PGS y BGS. En los resultados obtenidos, el escenario BAU ofrece un menor consumo energético, sin embargo, el BGS ofrece la mayor reducción en las emisiones de GEI (37,6%), CH<sub>4</sub> (94,3%), COVNM (85,0%), CO (97,4%), PM<sub>2.5</sub> (64,7%) y BC (48,4%), y el PGS la mayor reducción en las emisiones de N<sub>2</sub>O (83,0%) y NO<sub>x</sub> (90,7%).

#### **4.2.6 Uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica**

Wang et al. (2019) analizó la transmisión de ultra-alto voltaje (UHV) como una medida importante para la prevención y/o control de la contaminación de aire en China, lo que se logró trasladando los centros de generación de energía a sitios y ubicaciones remotas con fuentes de energía renovable y transmitiendo la energía generada a través de las líneas de UHV a centros de alta demanda, es decir, consistió en la transmisión de corriente alterna (CA) a tensiones de 1000 kV o superior (UHV AC), así como la transmisión de corriente continua (DC) a voltajes de ±800 kV o mayor (UHV DC). Conjuntamente, evaluaron la eficacia del control de la contaminación del aire a través de este método con datos del 2017 y estimaron el potencial futuro de la transmisión del UHV para reducir la contaminación en China, basándose en los objetivos del UHV para 2020. Los resultados obtenidos para el 2017, reflejan que el uso de la transmisión UHV resultó en una reducción del 55% de los contaminantes del aire en todo el país. Con lo anterior podría alcanzarse el objetivo nacional de reducción de contaminantes del 34% para 2020.

#### **4.3 Ventajas y desventajas de las estrategias innovadoras identificadas.**

La problemática evidenciada por la mala calidad del aire a nivel mundial ha generado la necesidad de implementar estrategias enfocadas en la prevención, control, medición y reducción de las emisiones atmosféricas, es común encontrar estrategias “convencionales” de tipo normativo o técnico tales como: uso de sistemas de control de emisiones en fuentes fijas y móviles, conversión tecnológica, implementación y estimulación del uso del sistema integrado de transporte público (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011), renovación y modernización del parque automotor, uso

eficiente y la mejora en la calidad de los combustibles, levantamiento de información relacionado con el inventario de emisiones, medición de los contaminantes mediante las redes de monitoreo, ordenamiento territorial, estipulación de límites máximos permisibles de emisión e inmisión de contaminantes, establecimiento de niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire (CONPES, 2018), entre otras. Por otro lado, encontramos las estrategias “innovadoras” las cuales están surgiendo, en gran medida, debido a que a pesar de la implementación de las estrategias convencionales las cuales son necesarias, aparentemente no son suficientes para lograr una adecuada calidad del aire. A continuación, se presenta un cuadro comparativo en que se exponen las ventajas y desventajas de la implementación de estas estrategias innovadoras, cuya ejecución al igual que cualquier otra medida dependen principalmente de la economía, tecnología, desarrollo, clima, topografía y fenómenos meteorológicos del país o la región en donde se pretendan desarrollar.

**Tabla 10.** Ventajas y desventajas de las estrategias innovadoras identificadas.

<b>Eliminación húmeda de material particulado.</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En caso de estar ubicados en lugares de ocurrencia alta de precipitaciones naturales no requiere de inversión económica.</li> <li>▪ Es el principal mecanismo de autolimpieza de la atmósfera.</li> <li>▪ Resultados a corto plazo.</li> <li>▪ Cualquier precipitación independientemente de su magnitud y duración tiene un efecto positivo en PM<sub>10</sub>.</li> <li>▪ El proceso de descontaminación muestra un efecto positivo en la reducción de material particulado, eficiencias hasta de 86.3% para PM<sub>10</sub> y 68.5% para PM<sub>2.5</sub> en presencia de lluvias fuertes y prolongadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La concentración de contaminantes depende en gran medida de las condiciones meteorológicas, los fenómenos atmosféricos e incluso la topografía, en este caso en particular la precipitación es crucial.</li> <li>▪ La llovizna tiene un efecto negativo en la eliminación de PM<sub>2.5</sub>.</li> <li>▪ Para obtener eficiencias muy elevadas se requiere de precipitaciones con tiempos de duración elevados.</li> <li>▪ Para obtener mejores resultados se requiere precipitaciones en horario nocturno.</li> <li>▪ En caso de implementar lluvias artificiales se requiere de inversión económica.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entre mayor sea el diámetro de la partícula, mayor es el grado de eficiencia de remoción.</li> <li>▪ Aplicable en países que cuenten con buena economía y tecnología de punta para la implementación de técnicas que ocasionen precipitaciones.</li> </ul>	
<b>Implementación de estructuras verdes en calles cerradas y avenidas</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las estructuras verdes contribuyen positivamente en la descontaminación de sus entornos ya que influyen en los patrones de dispersión y contribuyen en la deposición y eliminación de contaminantes.</li> <li>▪ Los setos tienen un efecto positivo en el mejoramiento de la calidad del aire en calles cerradas (edificios en ambos costados).</li> <li>▪ Tanto las paredes como los techos verdes presentan un efecto positivo en la reducción de material particulado en calles cerradas y avenidas.</li> <li>▪ La presencia de vegetación espesa, densa y alta en las avenidas tiene un impacto positivo en el mejoramiento de la calidad del aire.</li> <li>▪ La implementación de techos y paredes verdes requiere de menores exigencias de gestión al compararlos con los árboles y setos.</li> <li>▪ Se obtienen beneficios adicionales como reducción de la contaminación auditiva,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se requiere de una planificación urbana previa, ya que requiere de un diseño de infraestructura.</li> <li>▪ Los árboles de gran envergadura tienen resultados desfavorables en el aporte para la disminución de contaminación en calles cerradas, ya que generan alteraciones en los patrones de flujo de aire.</li> <li>▪ La capacidad de eliminación de contaminantes de las paredes y techos verdes es menor en comparación con los árboles y setos (barreras vegetales).</li> <li>▪ Los techos verdes presentan menor impacto positivo en relación al mejoramiento de la calidad del aire al compararlos con las paredes verdes.</li> <li>▪ El material particulado es retenido temporalmente por las estructuras verdes y luego puede volver a ser suspendido por acción del viento o depositado en la matriz suelo al ser lavado por precipitaciones.</li> </ul>

<p>disminución del uso de energía debido a la mitigación en la sensación de calor, adecuado manejo de aguas lluvias y contribución positiva al paisaje urbano.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eliminación de contaminantes gaseosos por absorción a través de las estomas de las hojas o las superficies de las plantas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los árboles de gran altura pueden generar problemas a largo plazo en el cableado eléctrico, de igual manera las raíces pueden estropear las edificaciones o infraestructura ubicadas cerca a los mismos.</li> </ul>
---	--

### **Ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se alimenta de energía solar.</li> <li>▪ Contribución a la ventilación natural de grandes áreas.</li> <li>▪ Evita que el aire contaminado quede atrapado entre los espacios de grandes edificios.</li> <li>▪ Ayuda a que no se presente inversión térmica en las zonas de influencia de la chimenea.</li> <li>▪ Disminuye la concentración local de los contaminantes en la atmósfera.</li> <li>▪ Podría incorporarse un purificador de aire en esta trayectoria y así descontaminarlo en gran medida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costos muy elevados en la implementación, mantenimiento y operación de la infraestructura.</li> <li>▪ Se requiere contar con espacios amplios para la ubicación de la infraestructura.</li> <li>▪ El impacto generado por la megaestructura será limitado a su entorno.</li> <li>▪ Dada la altura de la chimenea, su construcción requerirá de espacios con características muy específicas.</li> </ul>

### **Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cuantificación de los beneficios ecosistémicos como la remoción de contaminantes de los bosques urbanos.</li> <li>▪ Con el uso del software i-Tree Eco es posible observar los beneficios de los bosques urbanos frente al aumento de la urbanización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los árboles deben ser plantados de manera estratégica para lograr un efecto significativo en la calidad del aire del área.</li> <li>▪ Para el uso del software i-Tree Eco se requiere de información relacionada con los árboles, la calidad del aire del entorno</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El aumento de la cobertura arbórea tiene un efecto positivo en relación al mejoramiento de la calidad del aire.</li> <li>▪ Eliminación de contaminantes gaseosos por absorción a través de las estomas de las hojas o las superficies de las plantas.</li> <li>▪ Reducción en la morbilidad y mortalidad atribuible a la mala calidad del aire.</li> </ul>	<p>y condiciones meteorológicas de al menos un año.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los planes estratégicos gubernamentales generalmente no incluyen el aumento de la cobertura arbórea dentro de sus estrategias encaminadas en el mejoramiento de la calidad del aire.</li> </ul>
---	--

**Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los árboles de gran altura pueden generar problemas a largo plazo en el cableado eléctrico, de igual manera las raíces pueden estropear las edificaciones o infraestructura ubicadas cerca a los mismos.</li> <li>▪ El material particulado es retenido temporalmente por las estructuras verdes y luego puede volver a ser suspendido por acción del viento o depositado en la matriz suelo al ser lavado por precipitaciones</li> </ul>

**Mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reconversión tecnológica, sustitución de carbón vegetal por biomasa leñosa producida a base de agrosilvicultura o biogás generado a partir de desechos agrícolas.</li> <li>▪ Estrategia que satisface la demanda de energía de los hogares, siendo fácilmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La utilización de cocinas tradicionales (uso de leña) representa un gran riesgo para la salud de las personas y aporta gran cantidad de contaminantes a la atmósfera.</li> <li>▪ Contaminación del aire al interior de las viviendas debido a la combustión ineficiente y a la escasa ventilación.</li> </ul>

<p>accesible y asequible en zonas rurales y periurbanas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estrategia que permite el aprovechamiento, uso adecuado y controlado de la biomasa tradicional (leña, carbón vegetal, estiércol animal y residuos agrícolas) para la cocción de los alimentos, la producción de calor, electricidad y fertilizantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estrategia de reconversión a mediano plazo.</li> <li>▪ Altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y partículas (PM) (Pereira et al., 2017) asociadas a la producción de leña y carbón vegetal.</li> <li>▪ Existen conocimientos incipientes que favorezcan al desarrollo de este tipo de estrategias a través del uso de biomasa.</li> </ul>
---	---

**Mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mitigación de las emisiones generadas.</li> <li>▪ Ahorro de energía en los hogares.</li> <li>▪ Este tipo de tecnologías de combustión de (ICS) se ciñen a las normas sobre eficiencia térmica y umbrales de emisión definidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO).</li> <li>▪ El uso de sistemas de cocción limpios contribuye a la consecución de los 17 objetivos del desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas, al establecer una medida que mitiga el cambio climático y reduce las desigualdades sociales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las estufas de biomasa actualmente no son equivalentes a las estufas de gas en términos de eficiencia y limpieza.</li> <li>▪ Las conclusiones expuestas son parten de resultados de proyecciones futuras, es decir se maneja una incertidumbre en cuanto a su aplicación.</li> <li>▪ El uso de combustibles a base de carbón vegetal contribuye a la consecución de procesos de deforestación.</li> <li>▪ La aplicación de estas tecnologías depende en gran medida del apoyo gubernamental que reciban.</li> </ul>

**Uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El uso de la transmisión UHV favorece a la reducción del 55% de los contaminantes del aire en todo el país.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estrategia a implementar a largo plazo.</li> <li>▪ Los costos de implementación son muy elevados.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Una estrategia relevante en pro del mejoramiento de la calidad del aire es la transmisión de la transmisión de ultra-alto voltaje (UHV).</li> <li>▪ Fomenta el uso de energías renovables (Energías Eólicas y Fotovoltaicas), provocando una transición que evite el uso de energía contaminantes (Térmicas y similares).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los centros de generación de energía deben estar en sitios remotos, por lo que generalmente necesitan de fuentes de energía independientes, principalmente de carácter renovable.</li> <li>▪ Su aplicabilidad estará limitada por las características de emisión y transmisión de diversos contaminantes atmosféricos.</li> </ul>
---	--

**Uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Según estudios complementarios se estima que la transmisión de UHV puede satisfacer los requisitos de asignación de recursos energéticos a gran escala entre regiones.</li> <li>▪ Favorece a la capacidad de autolimpieza de la atmosfera ante la presencia de sus contaminantes.</li> <li>▪ Permite la reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos en las áreas de recepción trasladando la generación a lugares remotos con mayor capacidad de asimilación ambiental.</li> <li>▪ Actúa como una medida de prevención y control de contaminantes atmosféricos a gran escala, principalmente a nivel regional.</li> <li>▪ Mejora la calidad del medio ambiental y a la vez satisface la necesidad de uso de energía eléctrica de los pobladores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La aplicación de estas tecnologías depende en gran medida del apoyo gubernamental que reciban.</li> <li>▪ Reduce la contaminación en el área de recepción de la energía, sin embargo, genera contaminantes en el área de envío.</li> <li>▪ Medida que para su funcionamiento dependerá de la interacción de los factores: suministro de energía, clima, emisiones de gases de efecto invernadero y condiciones atmosféricas.</li> <li>▪ Bajo casos excepcionales este tipo de tecnologías puede agravar el evento de contaminación atmosférica en una región.</li> <li>▪ Dependerán de la capacidad de autolimpieza del ambiente (Capacidad atmosférica), específicamente en su componente aire.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El estudio puntual no considera factores ambientales complementarios como: humedad y precipitación</li> </ul>
--	--

#### **4.4 Evaluación la aplicabilidad de las estrategias implementadas en ciudades con problemas de contaminación atmosférica a nivel regional.**

Una vez revisada las características principales de las estrategias innovadoras expuestas, se procede a presentar la aplicabilidad que pueden tener estas a nivel regional para el control o prevención de esos problemas de contaminación atmosféricas. Vale la pena aclarar que según la información asociada se considerará la aplicabilidad de estas medidas en las principales ciudades de Colombia con problemas de contaminación atmosférica (Bogotá, Cali y Área Metropolitana del Valle de Aburrá), análisis basado en el numeral inmediatamente anterior, ya que utiliza las ventajas y considera las desventajas identificadas para establecer la viabilidad de implementación.

En este orden de ideas, para este análisis se considera inicialmente la estrategia innovadora denominada “Eliminación húmeda de material particulado”, su aplicabilidad es viable siempre que se cuente en el área a implementar condiciones con alta ocurrencia de precipitaciones naturales, ya que este contexto favorecerá a la evidencia de los resultados a corto plazo reflejados en la reducción principalmente de material particulado, con eficiencias hasta de 86.3% para PM10 y 68.5% para PM2,5 que serán garantizadas ante la presencia de lluvias fuertes y prolongadas. Complementariamente, para la obtención de los resultados esperados a nivel regional se debe contar con un respaldo económico amplio que garantice la implementación inicial y el establecimiento de mejoras a través de proyectos de investigación, principalmente de la lluvia o precipitación inducida (de carácter artificial). En cuanto a su aplicación al contexto colombiano, se considera que gracias a los periodos lluviosos presentados anualmente en el país y que son caracterizados por ser cíclicos, existe una probabilidad alta de que la eliminación de material particulado se de por los eventos naturales, sin embargo, la consecución de este no libera la promoción de esta alternativa ante la ocurrencia de algún evento extremo que busque solucionar algún estado de emergencia latente.

La “Implementación de estructuras verdes en calles cerradas y avenidas” en Colombia representa una medida de control atmosférico aplicable, principalmente por la amplia gama de especies vegetales utilizables y disponibles en el país. No obstante, las especies a utilizar entre

las ciudades Bogotá, Cali y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá variaran en función de las condiciones naturales y climáticas que diferencian a estas tres regiones. Una vez seleccionada las especies y la ubicación de las mismas a través de sus estructuras en las calles y avenidas se observarán los resultados positivos asociados a la descontaminación de sus entornos al influir en los patrones de dispersión, deposición y eliminación de contaminantes de partículas, al reducir la contaminación auditiva, disminuir del uso de energía debido a la mitigación en la sensación de calor, contribuir positivamente al paisaje urbano y eliminar los contaminantes gaseosos por absorción a través de las estomas de las hojas o las superficies de las plantas.

A nivel general en el país se presentan las condiciones naturales óptimas para la implementación de la “Ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas”, ya que por su ubicación geográfica la radiación solar es favorable para puesta en marcha del sistema fotovoltaico que alimenta al equipo de energía para su labor, lo que garantiza que el sistema desarrolle sus funciones de contribución a la ventilación natural de grandes áreas, evite el confinamiento del aire contaminado entre los espacios de grandes edificios y disminuya la concentración local de los contaminantes en la atmósfera. Se considera por parte de los autores de la monografía que la implementación de esta estrategia a nivel nacional tendría mayor eficiencia, importancia y conveniencia en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, ya que su utilización ayuda a que no se presente el fenómeno de inversión térmica en las zonas de influencia de la chimenea, procesos antrópico-natural evidenciado históricamente en esta región.

Al igual a la estrategia anteriormente mencionada que utilizaba especies vegetales se presenta la “Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano”, la cual comparte el argumento de aplicabilidad a nivel nacional al presentarse en nuestro territorio una amplia biodiversidad en especies vegetales en el horizonte urbano. La incidencia que presenta esta medida en relación a la capacidad de asimilación de los contaminantes (Toneladas de contaminantes removidos) es mucho mayor, esta se apoya del programa *I-Tree* para su ejecución a través de la observación de los beneficios de los bosques urbanos frente al aumento de la urbanización, generando resultados como la eliminación de contaminantes gaseosos por absorción a través de las estomas de las hojas o las superficies de las plantas y reflejando que el aumento de la cobertura arbórea tiene un efecto positivo en relación al mejoramiento de la calidad del aire, favoreciendo la reducción en los índices de morbilidad y mortalidad atribuibles

a la mala calidad del aire. En refuerzo a lo anterior se debe mencionar que esta estrategia ha presentado resultados positivos a nivel nacional, específicamente en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tal y como lo expresa Arroyave-Maya, Posada-Posada, Nowak y Hoehn, en su artículo *“Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá”*.

La “Mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas”, es implementable en zonas rurales y periurbanas en los que se presenten problemas de contaminación atmosférica principalmente producto de la combustión de carbón vegetal, convirtiéndose en una medida de mitigación de las emisiones generadas y de ahorro de energía en los hogares; especialmente por ser agente de reconversión tecnológica, que sustituye el carbón vegetal por la biomasa leñosa producida a base de agrosilvicultura o biogás generado a partir de desechos agrícolas, permitiendo el aprovechamiento, uso adecuado y controlado de la biomasa tradicional (leña, carbón vegetal, estiércol animal y residuos agrícolas) para la cocción de los alimentos, la producción de calor, electricidad y fertilizantes, ajustándose a lo definido por las normas sobre eficiencia térmica y umbrales de emisión definidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y contribuyendo a la consecución de los 17 objetivos del desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas, con enfoque de mitigación del cambio climático y reducción las desigualdades sociales. No obstante, su aplicabilidad en las zonas de interés del presente estudio (Bogotá, Cali y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá), se limita o se ve afectada al tenerse una disponibilidad y cobertura extensa del servicio público de gas, lo que deja en un segundo plano la necesidad de uso de esta medida.

Como estrategia integradora de regiones se observa el “Uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica”, esta se caracteriza por la utilización de la transmisión de Ultra-Alto Voltaje (UHV), que satisface los requisitos de asignación de recursos energéticos entre zonas, favoreciendo su aplicabilidad a través de la unificación de las áreas de interés (Bogotá, Cali y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá) en función de una medida de gestión que prevenga y controle los contaminantes atmosféricos a gran escala, partiendo del uso de energías renovables (Energías Eólicas y Fotovoltaicas), que favorecen a la capacidad de autolimpieza de la atmósfera ante la presencia de sus contaminantes y a la cobertura del servicio de energía eléctrica entre sus pobladores, presentando casos

exitosos que han generado como resultado la reducción de hasta el 55% de los contaminantes del aire en todo un país.

Finalmente, se debe aclarar que el fortalecimiento de estas estrategias innovadoras a nivel nacional, presentará resultados robustos cuando por iniciativa del gobierno se promueva la implementación de las mismas a través de los distintos mecanismos de incentivos existentes.

#### **4.5 Dificultades asociadas a estrategias no convencionales**

Con el paso del tiempo los gobiernos son más conscientes de la problemática ambiental que se está presentando a nivel mundial, por ello es común encontrar en los esquemas gubernamentales planes, políticas, programas y normas encaminadas a la prevención, control, medición y reducción de las emisiones atmosféricas; sin embargo a pesar de la implementación de estas estrategias, es evidente que en ciertas regiones no son suficientes las acciones realizadas y se hace necesario empezar a analizar estrategias no convencionales como por ejemplo las exhibidas en el presente documento: 1) eliminación húmeda de material particulado, 2) implementación de estructuras verdes en calles cerradas y avenidas, 3) ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas, 4) remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano, 5) mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas y el 6) uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica; estrategias que según los diferentes estudios realizados pueden aportar significativamente a la obtención de los objetivos propuestos por los países o regiones en cuanto al mejoramiento de la calidad del aire, no obstante la mayoría de estas alternativas requieren de una fuerte inversión económica, tecnología de punta, planeación, estudios previos, asistencia técnica, acciones de seguimiento - con el fin de medir la eficiencia de la medida implementada -, lo que puede generar mucha incertidumbre o riesgos que prefieren no enfrentar los diferentes gobiernos, que eligen continuar con las estrategias convencionales a pesar de notar que no logren las metas planeadas. Por esto, se quiere hacer un llamado para creer en lo nuevo, en lo inusual, en lo poco común, la incertidumbre del éxito de la aplicación de una medida no convencional puede reducirse significativamente con el estudio preliminar de la misma, en el cual se vea reflejado los “pro” y los “contra” no solo de manera subjetiva, sino de manera cuantitativa.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el paso de los días es evidente el incremento de la morbilidad a raíz de la mala calidad del aire, complicaciones de salud que pueden desembocar en la muerte (DNP, 2018), es por ello que diferentes entidades gubernamentales han implementado estrategias convencionales cuyos objetivos se centran en la prevención, control, medición y reducción de las emisiones atmosféricas y así mejorar los respectivos índices de calidad, como es el caso de Beijing y el Área Metropolitana de São Paulo (MASP), regiones en las cuales se han implementado estrategias desde hace aproximadamente 40 años; enfocadas en sectores como el industrial con el fomento de la reconversión tecnológica (Barreto Carvalho et al., 2015), en las fuentes móviles (vehículos y motocicletas) logrando resultados muy positivos en el MASP, reducciones de hasta un 90% para los vehículos livianos y 80% para los vehículos pesados en las concentraciones de los parámetros CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub> (Barreto Carvalho et al., 2015), adicionalmente en Beijing se permite solamente la fabricación, venta o importación de vehículos que cumplan con las normas ambientales establecidas y se prohibió el uso de vehículos que en el momento de su fabricación no cumplieran con las normas aplicables en ese momento, así mismo se incrementaron las sanciones al incumplimiento de la normatividad ambiental (Feng & Liao, 2016). Sin embargo a pesar de ver las numerosas estrategias implementadas en determinados países, en Latinoamérica según el artículo científico publicado por Horacio Riojas Rodríguez, Agnes Soares da Silva, José Luis Texcalac Sangrador y Grea Litai Moreno Banda en el año 2016, solo 77 ciudades ubicadas en 17 de 33 países de América Latina y el Caribe tienen la disponibilidad de conocer el estado de la calidad del aire de sus regiones, resultado que generan una alarma inmediata ya que la gran mayoría de las urbes latinoamericanas superan la concentración media anual de material particulado establecida por la Organización Mundial de la Salud (Riojas Rodríguez et al., 2016).

Por su parte Colombia es consciente de la problemática ambiental referente a los niveles de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) que se presentan en diferentes ciudades, principalmente en Bogotá D.C., Área Metropolitana del Valle de Aburra y Cali, con base en los resultados de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), el gobierno nacional estructuró en el año 2018 la Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire a través del CONPES 3943, en la cual se plantean objetivos y metas medibles y se establecen una serie de estrategias convencionales direccionadas en la reducción de la emisión de contaminantes a través de la renovación y modernización del parque automotor, control en las fuentes fijas, mejoramiento

de la calidad de los combustibles, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo por contaminación del aire (CONPES, 2018). En las principales ciudades del país se han implementado de manera específica planes en pro del mejoramiento de la calidad del aire, en Bogotá D.C., se adoptan el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá – PDDAB mediante el Decreto 98 de 2011 (Alcaldía de Bogotá & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ, 2011), en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se adopta mediante el Acuerdo Metropolitano No. 16 de diciembre de 2016 el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburra 2017-2030 – PIGECA, en concordancia con el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2008-2020 (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA, 2018), adicionalmente se contempla el Protocolo Operacional para Enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica - POECA, el cual actúa en episodios de contingencia generados por la mala calidad del aire, logrando con la aplicación de determinadas medidas resultados a corto plazo, superando de esta manera los episodios presentados (Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA & Clean Air Institute, 2017), por su parte Cali adopta mediante la Resolución No. 4133.010.21.1378 de diciembre de 2018 el Programa de Aire Limpio Para Santiago de Cali – PALSC, en el cual se establecen objetivos y metas en pro del mejoramiento de la calidad del aire, implementando medidas integrales, articuladas y coordinadas entre los diferentes actores (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC & Universidad del Valle, 2017).

Gracias a la bibliografía consultada ha sido posible evidenciar la necesidad de la implementación de las diferentes estrategias convencionales nombradas a lo largo de documento, sin embargo todo indica que estas no son suficientes para lograr los ambiciosos objetivos propuestos por la Organización Mundial de la Salud en cuanto a los límites máximos permisibles, es aquí en donde toman protagonismo las estrategias innovadoras, las cuales arrojan resultados muy positivos en cuanto al mejoramiento de la calidad del aire, se analizaron estrategias como la disminución de la concentración de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) mediante la precipitación (eliminación húmeda) en la cual se indicaron porcentajes de remoción para  $PM_{10}$  de 86.3% en condiciones de lluvia pesada en por lo menos 8 horas de duración y para  $PM_{2.5}$  se encontraron porcentajes de remoción de 68.5% en condiciones de lluvia moderada en por los menos 8 horas de duración, por su parte la implementación de setos en calles cerradas (edificios en ambos costados) pueden reducir en un 24% a un 61% la exposición a los contaminantes atmosféricos (Abhijith et al., 2017), así mismo la presencia de árboles y barreras de vegetación a lo largo de una autopista reducen entre el 15% y el 60% de

concentración de contaminantes atmosféricos (Abhijith et al., 2017), según Pugh et al., la presencia de paredes verdes en una calle cerrada contribuye en una reducción de la concentración de hasta 35% para NO<sub>2</sub> y un 50% para PM<sub>10</sub>, y los techos verdes reducen hasta en un 32% de la concentración de contaminantes (Abhijith et al., 2017), vale la pena mencionar el software *i-Tree Eco* el cual puede demostrar con cálculos la importancia de la existencia de bosques urbanos, los cuales aportan significativamente en el mejoramiento de la calidad del aire, Arroyave-Maya, Posada-Posada, Nowak y Hoehn (2019) analizaron en su estudio la estructura del bosque urbano del valle de Aburrá encontrando que por la presencia de una cobertura arbórea del 23% en el área de estudio se logró la remoción de 229 toneladas de contaminantes por año, así mismo Nowak, Hirabayashi, Doyle, McGovern, & Pasher (2018), analizaron el impacto de los árboles urbanos en Canadá, encontrando que los árboles de 86 ciudades canadienses eliminaron 16.500 toneladas (t) de contaminación del aire en 2010 (rango: 7500-21.100 t).

De Igual manera existen estrategias que requieren de una fuerte inversión económica y tecnológica como lo es el uso de chimeneas gigantes para la ventilación de ciudades que cuenten con infraestructuras que no permitan la adecuada dispersión de los contaminantes, la chimenea gigante ayudará a ventilar y así disminuir la concentración local de los contaminantes en la atmosfera e incluso se podría incorporar un purificador de aire en el interior de la misma y descontaminar el aire en gran medida (Ghanbari & Rezazadeh, 2019).

## 6. CONCLUSIONES

- A nivel mundial la problemática de calidad del aire ha obligado a los diferentes gobiernos a implementar planes, programas y estrategias convencionales que permitan ver resultados a corto, mediano y largo plazo, en relación al mejoramiento de los índices de calidad del aire y con esto la protección de la salud de la población; estas acciones principalmente se enfocan en reconversión tecnológica de fuentes fijas, renovación del parque automotor, optimización de la calidad del combustible, producción más limpia y consumo sostenible, accesibilidad a incentivos, desarrollo de la investigación, ordenamiento del territorio, gestión del riesgo por contaminación del aire, implementación de normatividad ambiental y mejoramiento de las vías de comunicación (pavimentación), sin embargo los resultados obtenidos con estas estrategias “tradicionales” no han sido suficientes para cumplir con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud.
- Producto del desarrollo investigativo, en los últimos años se han propuesto varias estrategias no convencionales para mejorar la calidad del aire, técnicas como: la eliminación húmeda de material particulado, la implementación de estructuras verdes y bosques urbanos, disminución de la contaminación local mediante el uso de gigantes chimeneas de ventilación, reconversión tecnológica de elementos vitales como las estufas domésticas y el uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica, técnicas que al obtener los resultados positivos expuestos en las diferentes investigaciones, junto a las estrategias tradicionales seguramente lograrían brindar una calidad del aire óptima para el bienestar de la población ubicada en la zona intervenida.
- Todas las estrategias propuestas exponen resultados significativamente positivos en relación con la disminución de la concentración de contaminantes, resaltando esta característica como la principal ventaja observada, así como el bajo costo de la implementación de algunas de las técnicas expuestas; sin embargo estrategias como la “Ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas” y el “uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica” requieren de inversiones muy elevadas, que sin duda al no contar con un

gobierno cuya prioridad sea el medio ambiente serían muy difíciles de implementar debido a falta de presupuesto.

- La implementación de las estrategias innovadoras depende en gran medida de la economía, tecnología, desarrollo, clima, topografía y fenómenos meteorológicos del país o la región en donde se pretendan implementar, impedimentos que en su mayoría pueden superarse si el gobierno del país interesado se lo propone, demostrando el interés en garantizar un ambiente sano a la población de su Ciudad o región.
- La aplicabilidad de las estrategias innovadoras denominadas “Eliminación húmeda de material particulado”, “Implementación de estructuras verdes en calles cerradas y avenidas”, “Ventilación de grandes urbes utilizando gigantes chimeneas”, “Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano”, “Mitigación de la contaminación atmosférica en los hogares con estrategias integradas de biomasa y cocinas” y el “uso de la transmisión de ultra alta tensión para la prevención y el control de la contaminación atmosférica” en ciudades o regiones con problemas de contaminación atmosférica a nivel regional como lo son Bogotá, Cali y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá es buena, dado no se evidencia ningún obstáculo que descarte de manera inmediata su implementación.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., ... Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments - A review. *Atmospheric Environment*, 162, 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014>
- Alcaldía de Bogotá, & SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ. *DECRETO 98.* , (2011).
- ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI. *Resolución No. 4133.010.21.1378.* , (2018).
- ALCALDIA DE SANTIAGO DE CALI. (2019). *Datos de Cali y Valle del Cauca*. Retrieved from [http://www.cali.gov.co/gobierno/publicaciones/227/datos\\_de\\_cali\\_y\\_el\\_valle\\_del Cauca/](http://www.cali.gov.co/gobierno/publicaciones/227/datos_de_cali_y_el_valle_del Cauca/)
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA. *ACUERDO METROPOLITANO No 16.* , (2017).
- ÁREA METROPOLITANA VALLE DE ABURRÁ. (2019). Condiciones especiales del valle de aburrá. Retrieved October 3, 2019, from <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>
- Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA. *Resolución Metropolitana 2231.* , (2018).
- Área Metropolitana Valle de Aburrá - AMVA, & Clean Air Institute. *Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (PIGECA 2017-2030).* , (2017).
- Arroyave-Maya, M. del P., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E. (2019). Air pollution removal by the urban forest in the Aburra Valley. *Colombia Forestal*, 22(1), 5–16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>
- Barreto Carvalho, V., Dias Freitas, E., Droprinchinski Martins, L., Martins, J., Mazzoli, C., & Andrade, M. (2015). Air quality status and trends over the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil as a result of emission control policies. *Enviromental Science & Policy*,

47, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.11.001>

Canal RCN. (2019). Alcaldía de Bogotá declarará alerta amarilla por calidad del aire. Retrieved October 3, 2019, from <https://noticias.canalrcn.com/nacional-bogota/alcaldia-bogota-declarara-alerta-amarilla-calidad-del-aire>

Carvalho, R. L., Lindgren, R., García-López, N., Nyambane, A., Nyberg, G., Díaz-Chavez, R., & Boman, C. (2019). Household air pollution mitigation with integrated biomass/cookstove strategies in Western Kenya. *Energy Policy*, 131(January), 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.026>

Congreso de la República de Colombia. *LEY 99.* , (1993).

CONPES. *POLÍTICA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE.* , Pub. L. No. CONPES 3943, 86 (2018).

CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL. *POLÍTICA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE.* , Pub. L. No. CONPES 3943, 86 (2018).

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, & Universidad del Valle. (2017). *Programa Aire Limpio Cali*. Cali, Colombia.

Departamento Nacional de Estadística. (2018). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda: tercera entrega*. 66. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-3ra-entrega.pdf>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2018). *Calidad del aire: Una prioridad de política pública en Colombia* (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, Ed.). Retrieved from [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentación Calidad del Aire 15\\_02\\_2018.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentación%20Calidad%20del%20Aire%2015_02_2018.pdf)

DNP, D. N. D. P. (2015). *VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL EN COLOMBIA 2015*. Retrieved from [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoración económica de la degradación](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoración%20económica%20de%20la%20degradación)

ambiental.pdf

- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011, August). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, Vol. 159, pp. 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Feng, L., & Liao, W. (2016). Legislation, plans, and policies for prevention and control of air pollution in China: achievements, challenges, and improvements. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1549–1558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.013>
- Ghanbari, M., & Rezazadeh, G. (2019). Giant chimney for air ventilation of metropolises. *Atmospheric Pollution Research*, 10, 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.010>
- IDEAM. (2017). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia* (Vol. 2403). Bogota D.C.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2019). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. Retrieved October 3, 2019, from <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- Kumar, P., de Fatima Andrade, M., Ynoue, R. Y., Fornaro, A., de Freitas, E. D., Martins, J., ... Morawska, L. (2016). New directions: From biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of São Paulo. *Atmospheric Environment*, 140, 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.059>
- Lin, M. Y., Hagler, G., Baldauf, R., Isakov, V., Lin, H. Y., & Khlystov, A. (2016). The effects of vegetation barriers on near-road ultrafine particle number and carbon monoxide concentrations. *Science of the Total Environment*, 553, 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.035>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. *Resolución 601.* , (2006).
- MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Resolución 910.* , (2008).
- MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. *Política de Prevención y control de la contaminación del aire.* , (2010).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Resolución 1111.* , (2013).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *DECRETO 1076.* , (2015).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Resolución 2254.* , (2017).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Contaminación Atmosférica.

Retrieved October 3, 2019, from

<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Ministerio del Medio Ambiente. *Resolución 619.* , (1997).

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE COLOMBIA. *Decreto 948 de 1995: "Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la pre.* , (1995).

National Renewable Energy Laboratory. (2006). Industrial Technologies Program. In *Energy Tips – Steam*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39308.pdf>

Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health.

*Urban Forestry and Urban Greening*, 29(November 2017), 40–48.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>

Onursal, B., & Gautam, S. P. (1997). CONTAMINACIÓN POR VEHÍCULOS

AUTOMOTORES Experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina.

In *Banco Mundial*. Retrieved from

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/001083/Course2/Lecturas/Vehiculos/chapter0.pdf>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD - OMS. (2018). Calidad del aire ambiente

(exterior) y salud. Retrieved October 8, 2019, from [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD - OPS. (2016). Contaminación del

Aire Ambiental. Retrieved October 8, 2019, from

[https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12918:amb](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:amb)

ient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es

Riojas Rodríguez, H., Soares da Silva, A., Texcalac Sangrador, J. L., & Moreno Banda, G. L. (2016). Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: implications for climate change. *Pan American Journal of Public Health*, 40(3), 150–159.

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ. *Anexo del Decreto “Por medio del cual se adopta el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá.”*, (2010).

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ. (2010b). *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá*. Retrieved from [http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886) – PDDAB

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ. *Informe Tecnico No. 00634-MODIFICACIÓN DEL DECRETO 98 DE 2011.*, (2017).

Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC. (2019). Calidad de Aire. Retrieved October 3, 2019, from <http://www.siac.gov.co/calidadaire>

Wang, Y., Li, M., Wang, L., Wang, H., Zeng, M., Zeng, B., ... Sun, C. (2019). Can remotely delivered electricity really alleviate smog? An assessment of China's use of ultra-high voltage transmission for air pollution prevention and control. *Journal of Cleaner Production*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118430>

World Health Organization. (2018). Global Ambient Air Quality Database (update 2018). Retrieved May 17, 2019, from WHO website: <https://www.who.int/airpollution/data/cities/en/>

Zheng, Z., Xu, G., Li, Q., Chen, C., & Li, J. (2019). Effect of precipitation on reducing atmospheric pollutant over Beijing. *Atmospheric Pollution Research*, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.04.001>